

Visa du chef département l'Institut des
Sciences et Technologies

Signature:.....

Date:.....

Simulation numérique de l'écoulement turbulent Dans un canal

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

Encadreur: M.TRARI Tayeb.

Signature:

Date:

Réalisé par :

Étudiante: Hassene Fadhila

Signature :

Date :

Membres du jury

MERGHACHE S.M

BAGHDAD M.

TRARI T.

MCA

MCA

MAA

Président

Examineur

Encadreur

Remerciements

En préambule à ce mémoire je remercie ALLAH qui m'aide et me donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

*J'exprime mes profonds remerciements à mon directeur de thèse, **MTRARI Tayeb** pour l'aide compétente qu'il m'a apportée, pour sa patience et son encouragement. Son œil critique m'a été très précieux pour structurer le travail et pour améliorer la qualité des différentes sections.*

Mes vifs remerciements vont également aux membres de jury pour le grand honneur qu'ils ont bien voulu examiner ce travail.

Mes remerciements s'étendent également à tous mes enseignants durant les années des études.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes

Je vous aime.

DÉDICACE

JE DÉDIE CE TRAVAIL

À MES PARENTS

À MES FRÈRES ALI & AHMED

À MES SŒURS FERIEL & NESRINE

À TOUTE MA FAMILLE

À TOUS MES AMIS ZINA, FATIHA, FATIMA, HAKIMA,

HANA, RABIA & LINDA

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	02
DEDICACES.....	03
SOMMAIRE	04
LISTE DES FIGURES	06
LISTE DES TABLEAUX	07
NOMENCLATURE.....	07
ABREVIATIONS	08
INTRODUCTION GENERALE.....	10

CHAPITRE 1 Etude Bibliographique

1.1 Étude Bibliographique.....	13
1.2 Turbulence développée dans un canal plan.....	14

CHAPITRE 2: Formulation Mathématique et modélisation de la turbulence

2.1 La nature de la turbulence	17
2.2 Le caractère turbulence des écoulements	17
2.3 Analyse numérique des Dynamique des fluides numérique.....	18
2.3.1 Dynamique des fluides numérique (CFD).....	18
2.4 Simulation des écoulements turbulents	18
2.4.1 Simulation directe (DNS)	18
2.4.2 Simulation des grandes échelles (LES)	19
2.4.3 La modélisation par l'approche RANS	19
2.5 Quelle méthode choisir.....	20
2.6 But de la modélisation de la turbulence	20
2.7 Modèles statistiques de turbulence de type RANS	21
2.8 Le modèle de turbulence $R_{ij} - \epsilon$ <i>SSG</i> (Speziale, Sarkar & Gatski)	22
2.9 Méthode numérique.....	23
2.9.1 Méthode des volumes finis.....	23
2.10 Equations de Navier-Stokes	24
2.11 Couche limite pariétale turbulente	25
2.11.1Hypothèses simplificatrices dans la couche limite.....	26

CHAPITRE 3:ETUDE DUCAS

3.1. Canal plan.....	28
3.2Géométrie du problème	28
3.3 Hypothèses simplificatrices.....	29
3.4 Présentation des logiciels du calcul.....	29

3.4.1. Logiciel de maillage gridmesh "GMSH"	29
3.4.1.1 les modules de "GMSH"	30
3.4.2 Maillage	30
3.4.2.1 Composants du maillage	30
3.4.2.2. Maillage 2D	31
3.4.2.3 Maillage 3D	31
3.4.2.4 Module de maillage(Mesh module)	31
3.4.2.5 physical groupe	32
3.4.3 Code Saturne	32
3.4.4 EnSight	33
3.4.4. 1 Géométrie	33
3.4.4.2 Valeurs variables	34

CHAPITRE 04 RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 Visualisation des résultats (champs) sous EnSight.....	36
4.2 Interprétation des résultats.....	38
CONCLUSION GENERALE:	45
BIBLIOGRAPHIE	46
ANEXE A.....	48
ANEXE B.....	57
RESUME.....	66
ملخص 66	
ABSTRACT	66

Liste des Figure :

Figure	Titre	Page
Chapitre 2		
Fig.1	Control volume of cell-centered (a) and cell-vertex (b) scheme (dual control volume)	24
Fig.2	couche limite sur une plaque plane	26
Chapitre 3		
Fig.3	géométrie du canal plane	29
Fig.4	version Gmsh	29
Fig.5	La génération du maillage (2-D) et Domaine de calcul.	31
Fig.6	La génération du maillage (3-D) et Domaine de calcul.	31
Fig.7	Menu du module mesh	32
Fig.8	groupe physique	32
Fig.9	Interface graphique de Code_ Saturne.	33
Fig.10	Interface graphique d'EnSight.	34
Fig.11	Champ de vitesse moyenne U	36
Fig.12	Champ d taux de dissipation	36
Fig.13	Champ de tentions de Reynold (R11)	36
Fig.14	Champ de tentions de Reynold (R22)	36
Fig.15	Champ de tentions de Reynold (R33)	37
Fig.16	Champ de tentions de Reynold (R12)	37
Fig.17	Champ de tension de Reynold (R13)	37
Fig.18	Champ de tension de Reynold (R23)	37
Fig.19	Profil de Pression moyenne comparai à DNS.	38
Fig.20	Profil de Vitesse moyenne comparai à DNS.	38
Fig.21	Profil de Vitesse logarithmique comparai à LES et DNS.	39
Fig.22	Profil de tension de Reynolds 11.	40
Fig.23	Profil de tension de Reynolds12.	40
Fig.24	Profil de tension de Reynolds 22.	40
Fig.25	Profil de tension de Reynolds 33.	41

Liste de tableur :

Tableur	Titre	Page
Chapitre 2		
Schéma.1	intérêts de la CFD	18
Schéma.2	Défieront entre la méthode RANS et LES	20
Tab.1	Évaluation des stratégies de calcul et de leur disponibilité pour des applications industrielles coûteuses (type aérodynamique automobile ou aéronautique). D’après Spalart (1999).	21
Tab.2	Modèles statistiques de turbulence de type RANS	21
Chapitre 3		
Schéma.3	composants du maillage	30

NOMENCLATURE

Symbole	Dénomination	Unités
Φ_{ij}	Corrélation pression taux déformation.	
P_{ij}	Les termes de production (modèle $R_{ij} - \epsilon SSG$).	
d_{ijk}	Les termes de diffusion (modèle $R_{ij} - \epsilon SSG$).	
ϵ_{ij}	Les termes de dissipation (modèle $R_{ij} - \epsilon SSG$).	
$C_\epsilon, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, C_{\epsilon 4}$	Constantes de turbulence (modèle $R_{ij} - \epsilon SSG$).	
S_{ij}	Tenseur de déformation [1/s].	
E	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente par unité de masse [$m^2 \cdot s^3$].	
δ_{ij}	Symbole de Kronecker	
q_j	le flux de chaleur	
M	Viscosité dynamique	(Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)
P	Masse volumique	(Kg.m ⁻³)
σ_{ij}	Tenseur des contraintes visqueuses	(Kg.m ⁻¹ .s ⁻²)
E_i	Energie interne spécifique	(J.m ³ .kg ⁻¹)
E_t	Energie totale spécifique	(J.m ³ .kg ⁻¹)
P	Pression	(Pa)
E	la dissipation d'énergie cinétique fluctuante	

Indices

div Divergence.

grad Gradient.

exp Exponentielle.

Abréviations

(CFD) Computational fluid dynamics
(RANS) Reynolds averaged Navier Stokes
(DNS) Direct Numerical Simulation
(LES) Large Eddy Simulation
(EDF) Electricité De France
(SST) Shear Stress Transport
(k-ε) modèle de Turbulence
(RSM) Reynolds- Stress Model

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

La mécanique des fluides numérique est une discipline passionnante à l'interface entre les mathématiques, physiques et l'informatique. [1]

Les équations générales de la mécanique des fluides permettent de modéliser plusieurs aspects des écoulements des fluides. Des solutions analytiques et numériques ont déjà été apportées à des problèmes spécifiques en proposant certaines hypothèses simplificatrices sur l'écoulement et son comportement.

Ces hypothèses sont liées notamment: au nombre de dimensions spatiales considérées, à la géométrie, aux fluctuations des vitesses et de la pression dans le temps et l'espace, aux conditions initiales et aux conditions aux limites, et à l'action visqueuse.

Pour un écoulement turbulent simulé par la modélisation RANS, le système d'équations présente un problème de fermeture relié à la présence des termes associés aux contraintes de Reynolds.

La recherche sur le phénomène de la turbulence a permis de développer plusieurs concepts et approches reliés, notamment, à la viscosité turbulente, à l'isotropie locale de la turbulence et aux équations de transport des termes fluctuants afin de résoudre le problème de fermeture du système d'équations de Navier-Stokes.

De telles approches sont en effet valides pour plusieurs écoulements en milieux naturels. Les modèles numériques classiques demeurent cependant limités par les hypothèses concernant les caractéristiques de l'écoulement formulées lors de la mise en équation du phénomène physique. Les approches traditionnelles se révèlent ainsi inadaptées à l'analyse de phénomènes hydriques et de problématiques plus complexes.

La turbulence et l'étude d'écoulements turbulents persistent d'une grande actualité scientifique.

Malgré les progrès réalisés au cours du siècle dernier concernant la caractérisation de la turbulence, ce domaine d'étude à ce jour reste incomplet.

Au cours des dernières années, plusieurs travaux ont été entrepris, afin d'une part de solutionner, pour des cas plus généraux d'écoulements turbulents, les équations fondamentales de la mécanique des fluides et d'autre part, d'en faciliter le processus de résolution mathématique. . [2]

La simulation en mécanique des fluides (CFD : Computation Fluid Dynamics) est reconnue aujourd'hui comme l'un des outils incontournable de conception est largement utilisée dans l'industrie.

La méthode des volumes finis est une véritable expérience numérique, donc est la base des codes de simulation numérique car il solutionne les problèmes à résoudre pouvant être en régime stationnaire ou in stationnaire.

La simulation numérique offre la possibilité de contrôle de la turbulence. Elle permet de faire varier les paramètres extérieurs tels que le nombre de Reynolds (Influence de l'inertie), et aussi les conditions initiales et aux limites.

Notre modélisation est réalisée par le logiciel Code saturne d'Electricité De France, modèle numérique tridimensionnel en volumes finis utilisant les équations de Navier- Stokes.

Les objectifs principaux du présent mémoire qui traite le comportement dynamique d'un écoulement turbulent sans échange de chaleur dans un canal plan par simulation numérique RANS et le modèle Rij- ϵ SSG comme modèle de turbulence, peuvent être résumé par les points suivants :

- L'élaboration d'un maillage 3D tout en optimisant ΔX^+ , ΔY^+ et ΔZ^+ .
- Etudier la dynamique de l'écoulement et le développement de la turbulence dans un canal plan.
- simulation numérique par le code du calcul CFD

Organisation de travail

Le présent projet comporte quatre chapitres :

Après cette brève introduction, nous abordons dans le premier chapitre une étude bibliographique des chercheurs qu'ils mettent les équations des phénomènes physiques.

Le deuxième chapitre est consacré à la méthode numérique et la modélisation de la turbulence.

Le cas du canal plan est présenté dans le troisième chapitre.

Le dernier chapitre de ce mémoire est dédié à la présentation et la discussion des résultats.

CHAPITRE 1
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Étude Bibliographique

C'est au début des années 50 que l'étude des écoulements turbulents a connu un important développement. Les recherches ont permis d'avancer d'une façon très importante dans la compréhension et la description de ce phénomène. [3]

En 1854 une première description d'un régime d'écoulement, que nous appelons aujourd'hui turbulent, caractérisé par l'existence de fluctuation irrégulière.

En 1883, Osborne Reynolds réalisé le premier travail systématique sur la turbulence; son expérience Sur les écoulements dans les conduites a montré que l'écoulement devient turbulent lorsque le rapport non dimensionnel $Re = UL/\nu$, dépasse une certaine valeur critique. Reynolds a également séparé les variables turbulentes en faisant la somme de la moyenne et de la fluctuation et aboutit au concept de stress turbulent. Est aussi il est aussi il écrivit les équations qui décrivent le comportement statistique d'un écoulement turbulent en effectuant la moyenne de l'équation de continuité et de l'équation de Navier-Stokes.

En 1915, Taylor introduisit également l'idée de mélanger la longueur, En 1921, a introduit L'idée de la fonction de corrélation, il a montré que la distance racine-moyenne-carré d'une particule à partir de son point source augmente initialement avec le temps. Taylor a jeté les bases d'une théorie statistique de la turbulence (1935-1936).

Au cours des années 1920, Prandtl et son élève, Von-Karman, développèrent les théories Semi-Empiriques de la turbulence, la plus réussie d'entre elles étant la longueur de mélange. En devinant à la forme correcte de la longueur de mélange, Prandtl a pu déduire que le profil de vitesse près d'un mur plein est logarithmique.

L. Richardson en 1922, écrivit le premier livre sur la prévision numérique du temps, suggérant que l'énergie cinétique turbulente soit transférée des grands tourbillons jusqu'à sa destruction par dissipation visqueuse. Cette idée de cascade d'énergie spectrale prenait une forme quantitative dans les mains de Kolmogorov et Obukhov. Richardson a également proposé que le coefficient de diffusion effectif d'une zone de turbulence soit proportionnel à $L^4 / 3$, où L est l'échelle de la zone, ce que l'on appelle loi de Richardson des quatre tiers, qui a ensuite été jugée conforme aux cinq tiers de la loi de Kolmogorov. Loi du spectre.

En 1941, Kolmogorov, il en déduit que le spectre de la sous-gamme d'inertie doit être proportionnel à $\varepsilon^{2/3} k^{-5/3}$, où k est le nombre d'onde. À travers l'hypothèse que les statistiques des petites échelles sont isotropes et ne dépendent que de deux paramètres, la viscosité cinématique et le taux de dissipation ε . Il a déduit que la plus petite échelle devait être de taille $\eta = (\nu^3 / \varepsilon)^{1/4}$, sa deuxième hypothèse était que, à des échelles identiques, inférieure à L et supérieure à η , il doit

exister une sous-plage inertielle dans laquelle ne joue aucun rôle, dans cette plage les statistiques dépendent uniquement ε .

Avec l'émergence des ordinateurs, il devint possible de calculer numériquement des solutions pour les écoulements turbulents. Ceci est apparu dans les années 1960 et a connu une croissance rapide depuis.

Le développement des superordinateurs et des méthodes de modélisation permettent maintenant d'étudier des problèmes qui étaient jusqu'à récemment trop complexes pour les ressources disponibles. La modélisation de la turbulence demeure néanmoins un défi de taille. [4]

1.1 Turbulence développée dans un canal plan

L'importance des structures cohérentes pour la dynamique de la turbulence pariétale est reconnue depuis longtemps (Robinson, 1991). Des études expérimentales ont identifié diverses structures types qui sont observées fréquemment et qui contribuent de manière significative aux quantités statistiques. Dans la zone de proche paroi, où on trouve le maximum de la production de l'énergie cinétique turbulente, les stries et les tourbillons longitudinaux sont les mieux documentés. Une série d'études numériques a pu établir que ces deux types de structures sont les protagonistes principaux d'un processus cyclique, faiblement non-linéaire, qui est capable de régénérer et maintenir le mouvement turbulent près de la paroi sans l'intervention de l'écoulement turbulent extérieur

Dans la zone logarithmique de la couche limite se trouvent des structures extrêmement allongées dans la direction longitudinale, dites large-scale motions. La plupart des simulations directes précédentes a été effectuée dans des domaines de calcul trop petits pour pouvoir représenter ces LSM et seulement les calculs plus récents ont pu les simuler. Ces structures sont responsables d'une grande partie de la tension de Reynolds la zone logarithmique, ce qui se manifeste par leur impression sur les spectres de l'énergie cinétique. L'origine des LSM ainsi que leur interaction avec les structures de la zone de tampon n'ont pas encore été définitivement éclairées à ce jour.

Une possible interprétation affirme qu'elles sont associées à une hiérarchie spatio-temporelle de tourbillons en λ .

Même si les mécanismes de la zone pariétale sont loin d'être tous élucidés, l'approche par caractérisation des structures cohérentes a ouvert une toute nouvelle perspective. En premier lieu, une compréhension plus détaillée du mécanisme par lequel la turbulence extrait de l'énergie de l'écoulement moyen permet le dessin de stratégies de contrôle plus efficace. [5]

Seront abordés certains travaux de recherche consacrés à l'étude, la modélisation mathématique et à la simulation de l'écoulement turbulent dans un canal :

S. Lyons et al [6]. Ils ont utilisé la simulation numérique directe de l'écoulement turbulent avec canal pleinement et ils ont étudié le transfert thermique passif entre les parois du canal, et ont aussi résolu numériquement l'équation in-stationnaire tridimensionnelle de Navier-Stokes et l'équation de convection avec une grille de 1064960 points et le nombre de Reynolds, basé sur la demi-largeur du canal et sur la vitesse débitante, est de 2262 et le nombre de Prandtl est égal à un.

J. Kim et al [7]. ont présenté une simulation numérique directe d'un débit de canal turbulent avec trois scalaires passifs à différents nombres de Prandtl moléculaire effectuée. Les champs calculés sont également examinés pour étudier la structure spatiale des champs scalaires et les champs scalaires sont fortement corrélés à la vitesse longitudinale. Ils ont étudié la distribution de probabilités conjointes entre les fluctuations de température et de vitesse sont également examinées et ils suggèrent qu'il pourrait être possible de modéliser les flux scalaires dans la région de paroi d'une manière similaire aux contraintes de Reynolds.

F. Kramer et al [8]. ont étudié les aspects de la turbulence de paroi, tels que les profils de vitesses moyenne et fluctuante, les structures cohérentes, et la pression pariétale, à partir de résultats de LES de canal plan turbulent cette simulation compressible permettant de résoudre directement le champ acoustique, on cherchera à identifier l'empreinte de ce champ dans le spectre de pression pariétale.

M. Klein[9], a effectué une variation systématique du modèle et de la grille afin de séparer l'influence de l'erreur numérique et la contribution du terme du modèle. L'une des raisons est que l'erreur de discrétisation numérique ainsi que la contribution du modèle à l'échelle de la sous-grille dépendent de la résolution de la grille et que les deux termes interagissent. Donc il présente dans cet article, nous étudions d'abord la précision des estimateurs à réseau unique pour évaluer la quantité d'énergie cinétique turbulente non résolue. Dans la deuxième partie, il parle sur la sensibilité des résultats de la simulation à l'erreur de modélisation ainsi que l'erreur numérique seront examinées dans le contexte de la LES avec filtrage implicite. Ceci sera réalisé en effectuant une grille systématique et une variation du modèle. L'analyse est appliquée à un écoulement de canal turbulent, isotherme, turbulent.

Conclusion:

Dans ce chapitre a été passé en revue le fondement théorique et les travaux de recherches réalisées dans ce domaine. Cette partie d'étude a été effectuée que ce soit pour les écoulements turbulents. L'accent a été mis sur les difficultés que présentent les écoulements turbulents, puis nous avons abordé différentes méthodes de modélisation qui permettent d'approximer la solution de ce type de problèmes.

CHAPITRE 2
LAMETHODE NUMERIQUE ET
MODELISATION DE LA TURBULENCE

2. Introduction

Avant d'aborder le cas du canal plan, il est de mise de présenter un rappel théorique sur la nature de la turbulence ainsi que les méthodes numériques et les types de simulation numérique.

2.1 La nature de la turbulence

La plupart des fluides présents dans la nature et l'ingénierie sont turbulents. La nature de la turbulence peut donc être communément observée. Cependant, il est très difficile de définir avec précision la turbulence et tout ce que l'on peut faire est de répertorier certaines de ses caractéristiques.

Un écoulement turbulent se produit toujours avec un nombre de Reynolds élevé, prenant souvent l'origine de l'instabilité de l'écoulement laminaire lorsque le nombre de Reynolds augmente. La turbulence est rotative et tridimensionnelle et se caractérise par des niveaux élevés de tourbillon fluctuant. Les écoulements bidimensionnels ne présentent pas d'étirement de vortex, ce qui constitue un mécanisme important de maintien du tourbillon, et les fluctuations turbulentes sont donc essentiellement des fluctuations de tourbillon tridimensionnelles.

Les écoulements turbulents sont toujours dissipatifs. La dissipation est l'augmentation de l'énergie interne aux dépens de l'énergie cinétique de la turbulence due au travail de déformation des contraintes visqueuses. Par conséquent, un apport d'énergie continu est impératif pour compenser ces pertes visqueuses, faute de quoi la turbulence décroît rapidement.

La turbulence est un phénomène continu et est régie par les équations de la mécanique des fluides. Même les plus petites échelles d'un écoulement turbulent sont beaucoup plus grandes que n'importe quelle échelle de longueur moléculaire.

Enfin, la turbulence est une caractéristique de l'écoulement, pas celle des fluides. La plupart des dynamiques de turbulence sont les mêmes, quel que soit le fluide, liquide ou gazeux, si le nombre de Reynolds est suffisamment élevé.

2.2 Le caractère turbulence des écoulements

Les inconnues des équations de Navier-Stokes sont des quantités instantanées et locales: u_j , ρ , p , h . Pour connaître la nature laminaire ou turbulente de l'écoulement, on définit un nombre sans dimension, le nombre de Reynolds de l'écoulement, en fonction d'une vitesse et d'une longueur caractéristiques:

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

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 n'est pas bien connue et 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).

Le nombre de Reynolds, joue un rôle important dans l'approche de la résolution numérique d'un écoulement. [12]

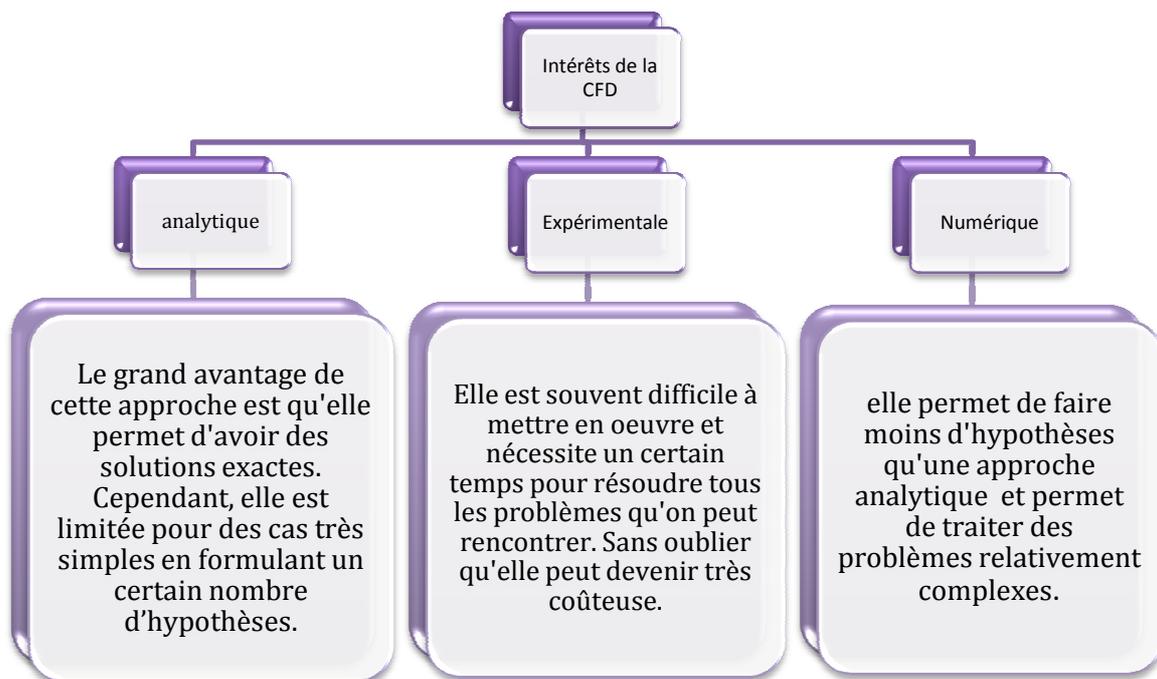
2.3 Analyse numérique des Dynamique des fluides numérique

2.3.1 Dynamique des fluides numérique (CFD)

Les quatre dernières décennies ont vu une quantité considérable d'études et de développement rapide dans le domaine de l'analyse numérique; il a trouvé une application répandue dans diverses branches de l'ingénierie, des sciences pures et appliquées, ainsi que de la médecine.

La CFD (Computational Fluid Dynamics) est l'étude des écoulements de fluide par des méthodes numériques. La résolution s'effectue généralement en discrétisant un volume de calcul en un maillage d'une multitude de petits éléments (plusieurs millions dans certains cas). . [10]

Schéma 1 - intérêts de la CFD [11]



Dans le domaine de l'écoulement des fluides, les différentes méthodes développées qui peuvent être identifiées comme des approches numériques ou informatiques sont collectivement désignées comme des méthodes dans la dynamique des fluides numériques. Il s'agit de la simulation numérique directe (DNS), de RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) et de Large Eddy (Méthodes de simulation (LES)).

2.4 Simulation des écoulements turbulents

2.4.1 Simulation Numérique Directe (DNS)

La méthode DNS (Direct Numerical Simulation) est utilisée pour résoudre entièrement le spectre de la turbulence et ce sans aucune modélisation. Ceci nécessite un maillage suffisamment fin pour capturer jusqu'à la plus petite échelle de turbulence. Le coût de calcul exorbitant de cette méthode la rend inappropriée pour la majorité des problèmes d'ingénierie, mais elle demeure essentielle pour notre compréhension fondamentale de la physique de la turbulence, la grande valeur du DNS réside dans sa capacité à fournir une grande quantité d'informations sur le domaine des flux. En conséquence, il s'agit d'un outil précieux pour l'étude de la physique de la turbulence.

2.4.2 Simulation des grandes échelles (LES)

En LES (*Large Eddy Simulation*), les échelles de turbulence plus petites que la taille du maillage sont filtrées et modélisées alors que les grandes échelles contenant la majeure partie de l'énergie de l'écoulement, sont entièrement simulées.

Cette méthode nécessite par contre une discrétisation très fine près d'un corps en raison des très petites échelles de turbulence présentes dans la mince couche limite le long des parois. Cependant, les LES nécessitent plus de ressources informatiques que RANS et ne sont pas encore applicables à tous les problèmes d'ingénierie.

2.4.3 La modélisation par l'approche RANS

Les modèles RANS ne prédisent que la partie moyenne de l'écoulement avec une modélisation pour les termes du tenseur de Reynolds. Toutes les échelles de la turbulence sont ainsi modélisées et non simulées. On peut ainsi utiliser des maillages beaucoup plus grossiers qu'en DNS car seul l'écoulement moyen du fluide doit être prédit. Cependant, comme on ne dispose pas de valeurs instantanées, certaines applications ne peuvent aboutir avec ces modèles de turbulence : l'évaluation de la fatigue thermique, la détermination de spectres d'efforts d'un fluide sur une structure solide etc. Parmi les modèles RANS les plus utilisés dans l'industrie, on compte le $k-\epsilon$ et le $k-\omega$ SST qui sont des modèles du premier ordre (la modélisation des tensions de Reynolds utilise l'hypothèse de Boussinesq).

Les modèles du deuxième ordre comme le $Rij-\epsilon$ ou le SSG prédisent chacune des composantes du tenseur de Reynolds qui sont ensuite injectées dans les équations de Navier-Stokes pour prédire les composantes de vitesse moyennes.

La méthode RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) consiste à résoudre un écoulement moyen et à modéliser les fluctuations de la turbulence par une viscosité turbulente. La méthode URANS est une extension in-stationnaire du RANS qui permet de résoudre les très grandes (lentes) fluctuations temporelles de l'écoulement.

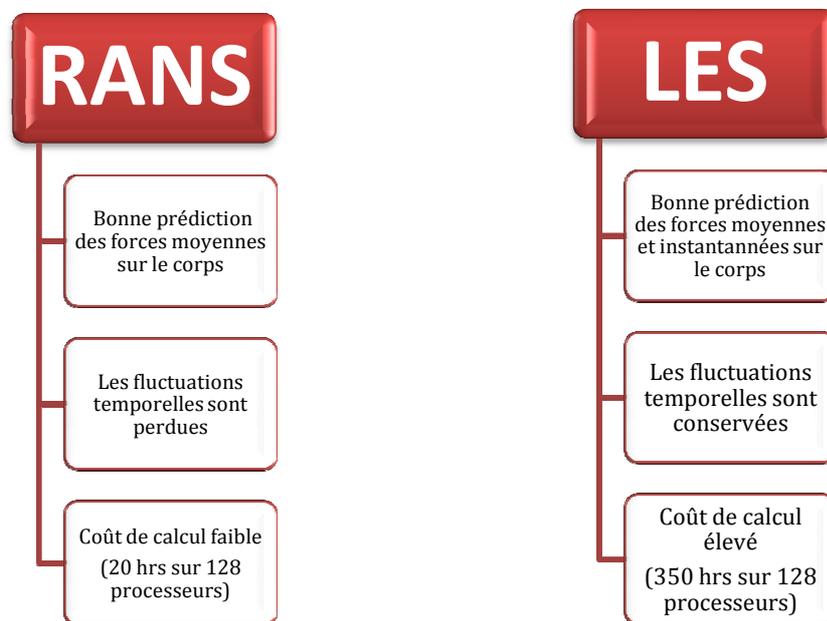
RANS fonctionne bien dans les couches limites et nécessite considérablement moins de ressources informatiques que les LES. Cependant, il est incapable de gérer des flux massivement séparés.

Les dimensions du champ d'écoulement sont limitées aux dimensions de la géométrie, par exemple. Dans le cas d'une géométrie bidimensionnelle, seule une solution de champ d'écoulement bidimensionnelle peut être obtenue.

2.5 Quelle méthode choisir ?

Chaque approche de modélisation de la turbulence peut être utile selon l'application et les quantités physiques d'intérêt. Il y a un compromis à faire entre la simplicité du calcul et la richesse de l'information obtenue. Il incombe à l'aérodynamicien de bien choisir la méthodologie appropriée à ses besoins. [13]

Schéma 2 -Défieront entre la méthode RANS et LES



2.6 But de la modélisation de la turbulence :

- Remplacer les équations de Navier- Stokes par un modèle.
- La résolution du système d'équations (le modèle) doit être la moins chère possible : le calcul en une nuit est réclamé pour les études paramétriques et encore plus court pour l'optimisation.
- Le modèle doit être prédictif : on ne doit avoir besoin que des conditions de l'écoulement \Rightarrow aucune connaissance a priori de la solution.
- Le modèle doit représenter au mieux la physique de l'écoulement.

La modélisation de la turbulence est la science qui consiste à construire ces modèles, dans le but de leur utilisation par les ingénieurs. Cette science est à la recherche d'un but inaccessible : fournir un modèle simple, peu coûteux et fiable dans toutes les situations... [14]

Tableau 1- Évaluation des stratégies de calcul et de leur disponibilité pour des applications industrielles coûteuses (type aérodynamique automobile ou aéronautique). D'après Spalart (1999).

Stratégie	Dépendance en Re	Empirisme	Maillage	Pas de temps	Disponibilité
RANS	Faible	Fort	10^7	10^3	1985
LES	Moyenne	Faible	$10^{11.5}$	$10^{6.7}$	2045
DNS	Forte	Aucun	10^{16}	$10^{7.7}$	2080

2.7 Modèles statistiques de turbulence de type RANS

Tableau 2- Modèles statistiques de turbulence de type RANS. [15]

Avantages	Modèles	Inconvénients
Robuste, économique et relativement précis. Adapté aux écoulements à grand nombre de Reynolds.	Standard $k - \epsilon$	Résultats médiocre pour des écoulements complexes (fort gradient de pression, rotation et swirl).
Modèle recommandé pour les problèmes liés aux turbomachines (à comparer au Réalisable $k - \epsilon$). La version SST $k - \omega$ consiste en une transition entre le modèle $k - \omega$ standard (développé pour les nombres de Reynolds modérés et les couches limites) et une version haute Re du $k - \epsilon$ lorsqu'on est loin des parois.	SST et Standard $k - \omega$	Nécessite une plus grande résolution du maillage aux frontières (pas de lois aux murs).
Le modèle le plus complet physiquement (transport et anisotropie de la turbulence sont pris en compte).	Reynolds-Stress Model (RSM)	Requiert plus de temps CPU. Les équations de quantité de mouvement et de transport de la turbulence sont étroitement liées.

2.8 Le modèle de turbulence $R_{ij} - SSG$ (Speziale, Sarkar & Gatski)

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

$$\frac{\partial y}{\partial t} (\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho U_k \overline{u_i u_j}) = \frac{\partial}{\partial x_k} d_{ijk} + \rho (P_{ij} + \Phi_{ij} - \epsilon_{ij}) \quad (2)$$

Où les termes de corrélation pression-déformation (Φ_{ij}), de diffusion (d_{ijk}) et de dissipation (ϵ_{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) :

$$d_{ijk} = \left(\mu \delta_{kl} + C_s \frac{\rho K}{\epsilon} \overline{u_i u_j} \right) \frac{\partial}{\partial x_l} (\overline{u_i u_j}) \quad (3)$$

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

$$\epsilon_{ij} = \frac{2}{3} \epsilon \delta_{ij} \quad (4)$$

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

$$\Phi_{ij} = \Phi_{ij}^{(1)} + \Phi_{ij}^{(2)} + \Phi_{ij}^{(\omega)} \quad (5)$$

$$\frac{\Phi_{ij}^{(1)}}{\epsilon} = -C_1 \left[1 - \left(1 - \frac{1}{C_1} \right) f_\omega \right] \alpha - C'_1 (1 - f_\omega) \left(\alpha^2 - \frac{1}{3} \alpha_2 I \right) \quad (6)$$

$$\frac{\Phi_{ij}^{(2)}}{\epsilon} = c_{01} \left(S - \frac{1}{3} S_1 I \right) + C_{11} \left(S \alpha + \alpha S - \frac{2}{3} \{ \alpha S \} I \right) + C_{12} (W \alpha - \alpha W) \quad (7)$$

$$\Phi_{ij}^{(\omega)} = f_\omega \left\{ 0.45 \left[P - \frac{2}{3} P I \right] - 0.03 \left[Q - \frac{2}{3} P I \right] + 0.08 \kappa (2S) \right\} \quad (8)$$

$$P = P_{ij} = -(\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u_i u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k}) \quad (9)$$

$$Q = Q_{ij} = -(\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} + \overline{u_i u_k} \frac{\partial U_k}{\partial x_i}) \quad (10)$$

Avec :

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

$$C'_1 = -1.05 ;$$

$$C_{01} = 0.8 + 0.65 \alpha_2^{1/2} ;$$

$$C_{11} = 0.625 ;$$

$$C_{12} = 0.2 ;$$

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

Les lettres en gras représentent des tenseurs: $\alpha = \alpha_{ij}, I = \delta_{ij}$. Les symboles

α_2, S_1, S_2 et P sont des contractions des tenseurs associés : $P = \frac{1}{2} P_{ij}$ ou $P = \frac{1}{2} \sqrt{P_{ij} P_{ji}}$,

$\alpha_2 = \alpha_{ij} \alpha_{ji}, S_1 = S_{kk}, S_2 = S_{ij} S_{ji}$.

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 ϵ , son équation s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (U_k \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} d^{(\epsilon)}_k + [C_{\epsilon 1} (1 + C_{\epsilon 4} f_{\omega}) p - C_{\epsilon 2} f_{\epsilon}] \frac{\epsilon}{k} + \xi \quad (11)$$

Où :

$$d^{(\epsilon)}_k = (v \delta_{kl} + C_{\epsilon 1} \frac{k}{\epsilon} \overline{u_l u_l}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_l} \quad (12)$$

$$f_{\epsilon} = \left[\left(-2 + \frac{7}{9} C_{\epsilon 2} \right) \frac{\epsilon \epsilon}{k} \frac{\epsilon^2}{2k} \right] f_{\omega} \quad (13)$$

$$R_t = \frac{k^2}{v \epsilon} \epsilon = \epsilon - 2 \frac{v k}{y^2} \quad (14)$$

Et les coefficients : $(C_{\epsilon}, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, C_{\epsilon 4}) = (0.15, 1.35, 1.8, 1.0)$ [16]

2.9 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.

2.9.1 Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis utilise directement les lois de conservation – la Globalisation intégrale des équations de Navier-Stokes / Euler. Il a été utilisé pour la première fois par McDonald 1421 pour la simulation d'écoulements invisibles bidimensionnels.

La méthode des volumes finis discrétise les équations qui régissent en divisant d'abord l'espace physique en un certain nombre de volumes de contrôle.

Il existe plusieurs possibilités pour définir la forme et la position du volume de contrôle par rapport à la grille. Deux approches de base peuvent être distinguées:

- Schéma centré sur les cellules (Fig. 1a) - les quantités d'écoulement sont stockées ici dans les centroïdes des cellules de la grille. Ainsi, les volumes de contrôle sont identiques aux cellules de la grille.

- Schéma de sommet de cellule (Fig. 2b) - Ici, les variables de flux sont stockées aux points de la grille. Le volume de contrôle peut alors être soit l'union de toutes les cellules partageant le point de la grille, soit un volume centré autour du point de la grille.

Le principal avantage de la méthode des volumes finis est que la discrétisation spatiale est effectuée directement dans l'espace physique. Ainsi, il n'y a pas de problème de transformation entre systèmes de coordonnées, comme dans le cas de la méthode des différences finies. Par rapport aux différences finies.

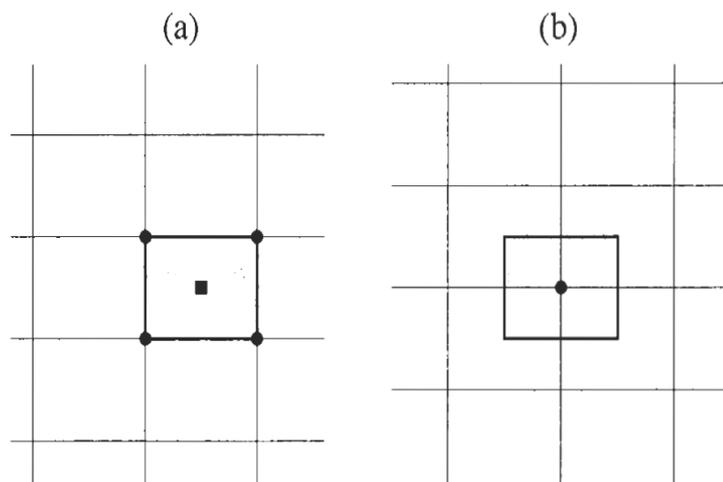


Fig. 1- Volume de contrôle des schémas cellule centrée (a) et cellule-sommet (b)

La méthode des volumes finis est très flexible - elle peut être appliquée assez facilement sur des grilles structurées ainsi que sur des grilles non structurées. Cela rend la méthode des volumes finis particulièrement adaptée au traitement des écoulements dans des géométries complexes.

Puisque la méthode des volumes finis est basée sur la discrétisation directe des lois de conservation, la masse, la quantité de mouvement et l'énergie sont également conservées par le schéma numérique. Cela conduit à une autre caractéristique importante de la méthode, à savoir la capacité de calculer correctement les solutions faibles des équations de gouvernance.

Il est intéressant de noter que, dans certaines conditions, il est possible de démontrer que la méthode des volumes finis est équivalente à la méthode des différences finies ou à la méthode des éléments finis d'ordre inférieur. En raison de ses propriétés attrayantes, la méthode des volumes finis est aujourd'hui très répandue et largement utilisée. [18]

2.10 Equations de Navier-Stokes

Le système d'équations de départ est basé sur le principe de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie et constitue les équations de Navier-Stokes.

Les équations de Navier-Stokes régissent le comportement de fluides vérifiant l'hypothèse du milieu continu. Ces équations sont basées sur la conservation de trois grandeurs principales: la masse, la quantité de mouvement et l'énergie totale. Il en découle une équation différentielle pour chacune de ces grandeurs :

- Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (15)$$

- Conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (16)$$

Où ρ est la masse volumique, P la pression statique, u_i la composante de la vectrice vitesse selon la direction i , σ_{ij} est le tenseur des contraintes visqueuses, E_t l'énergie totale spécifique, et q_j le flux de chaleur. L'énergie totale s'exprime ainsi :

$\rho E_t = \rho E_t + \frac{\rho}{2} u_i u_i$ avec E_t , l'énergie interne spécifique, Le tenseur des contraintes visqueuses s'écrit :

$$\sigma_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}, \quad (17)$$

2.11 Couche limite pariétale turbulente

La principale caractéristique d'une couche limite pariétale est que, à cause de sa viscosité, le fluide a une vitesse nulle à la paroi : c'est la condition de non-glissement. Les effets dus à la présence d'une paroi sont confinés dans une zone proche de celle-ci appelée couche limite pariétale. Son épaisseur est définie comme la distance à la paroi δ telle que : $u_\delta = 0.99u_\infty$, avec u_∞ la vitesse « Amont » non perturbée par la paroi.

Dans un premier temps et afin de comprendre les mécanismes simples mis en jeu dans la couche limite turbulente, nous considérons que l'écoulement est pleinement turbulent et stationnaire en moyenne. D'autre part, la composante longitudinale de vitesse u est prédominante devant la composante normale à la paroi v et les gradients longitudinaux sont considérés comme faibles devant les gradients normaux à la paroi (dans cette première approche le gradient longitudinal de pression est considéré comme nul). Comme les écoulements d'intérêt dans cette étude sont caractérisés par leur faible vitesse, la dissipation visqueuse est négligée. Pour clarifier le contexte limité de cette section, les nombreuses hypothèses utilisées sont listées ci-après : **[19]**

2.11.1 Hypothèses simplificatrices dans la couche limite

Cette figure reprend les Hypothèses simplificatrices dans la couche limite sur une plaque plane

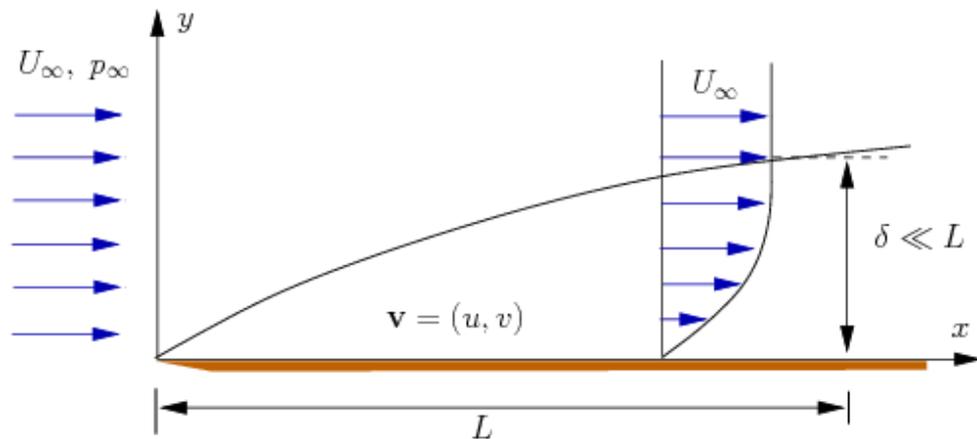


Fig. 2- couche limite sur une plaque plan.

- ✓ Vitesse parallèlement à la plaque U_∞
- ✓ Vitesse perpendiculairement à la plaque V_0
- ✓ Longueur parallèlement à la plaque L
- ✓ Longueur perpendiculairement à la plaque
- ✓ Pression p d'ordre ρ/u^2
- ✓ Temps L/U_∞ [20]

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné quelques notions sur les caractéristiques et la classification des écoulements ainsi la modélisation numérique de la turbulence et son influence sur la validation des résultats obtenues par des chercheurs.

CHAPITRE 3

ETUDE DU CAS

3. Introduction

On se propose de simuler avec *Code Saturne* le cas du canal plan. On donne ci-dessous une représentation générale du cas (figure.3). Pour une simulation avec un modèle RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes).

3.1 Canal plan :

Les écoulements des fluides dans les canaux plans entièrement développés est le cas test le plus théorique utilisé pour comprendre les mécanismes qui génèrent ou caractérisent la turbulence des parois. Il est donc utilisé pour valider la modélisation de la turbulence.

Le cas du canal plan est choisi pour plusieurs raisons :

- Premièrement, il s'agit du flux de couche limite le plus simple et le plus idéalisé. Le flux est statistiquement homogène dans les directions de flux, de portée et de temps, ce qui diminue les coûts de calcul.
- Deuxièmement, il s'agit du flux le plus étudié et la base de connaissances est abondante.
- Troisièmement, malgré la simplicité géométrique, l'écoulement des canaux est un cas de test très sensible pour les simulations RANS.

3.2 Géométrie du problème:

Nous considérons l'écoulement à travers une conduite rectangulaire de hauteur $L_y = 2h$. nous supposons que la conduite est très longue ($L_x / h \gg 1$) et a un grand rapport d'aspect ($L_z / h \gg 1$). Les parois inférieure et supérieure sont localisées à $y = 0$ et $y = 2h$ respectivement. L'écoulement est considéré statistiquement stationnaire, les statistiques de vitesse ne dépendent que de y . L'écoulement est caractérisé par le nombre non dimensionnel $Re^* = 642$, basé sur la vitesse de frottement u^* et la demi-largeur du canal h , $Re^* = hu^* / \nu$, où ν est la viscosité cinématique du fluide.

La figure (3) montre la configuration générale du cas à étudier $h = 1$, $L_x = 7.85$, $L_y = 2$ et $L_z = 3.14$. x , y et z sont les coordonnées dans les directions de flux, de paroi normale et d'étendue, respectivement. Les composantes de la vitesse dans ces directions sont respectivement u , v et w . Des conditions périodiques sont imposées dans les directions de flux et de sens. L'écoulement est entraîné par une chute de pression constante $\frac{\Delta P}{L_x}$ imposée comme terme source dans l'équation de quantité de mouvement de la composante de vitesse en fonction du flux. L'intégration de l'équation du moment conduit à: $\frac{\Delta P}{L_x} = \frac{\tau_w}{h}$ où τ_w est la contrainte de cisaillement du mur. Ceci nous mène à ajouter un terme explicite dans la routine `ustns.F`

`xuet = Re * nu / hh`

`do iel = 1, ncel`

$$\text{crvexp}(\text{iel}) = \text{volume}(\text{iel}) * (\text{propce}(\text{iel}, \text{iprom})) * \text{xuet}^{**2}$$

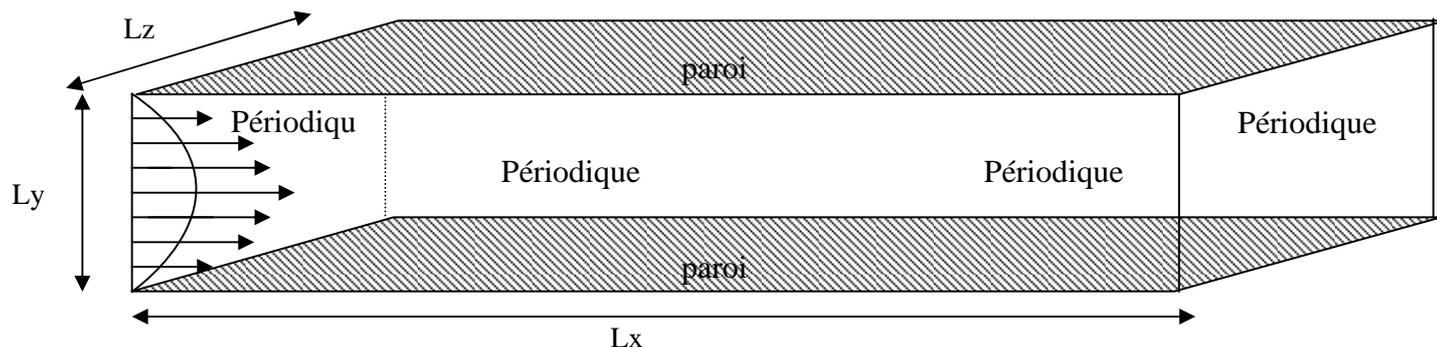


Fig. 3 - géométrie du canal plan.

3.3 Hypothèses simplificatrices:

D'hypothèses simplificatrices. Pour cette cas, c'est une

- L'écoulement adimensionnel ;
- L'écoulement est incompressible et stationnaire ;
- Les propriétés physique du fluide (μ, ρ_f) ;
- Le nombre de Reynolds basé sur la vitesse débitante et la hauteur de la marche est :
 $Re = 642.54$;

3.4 Présentation des logiciels du calcul

Nous avons utilisé plusieurs logiciels pour notre étude et sont les suivants :

3.4.1 Logiciel de maillage gridmesh "GMSH"

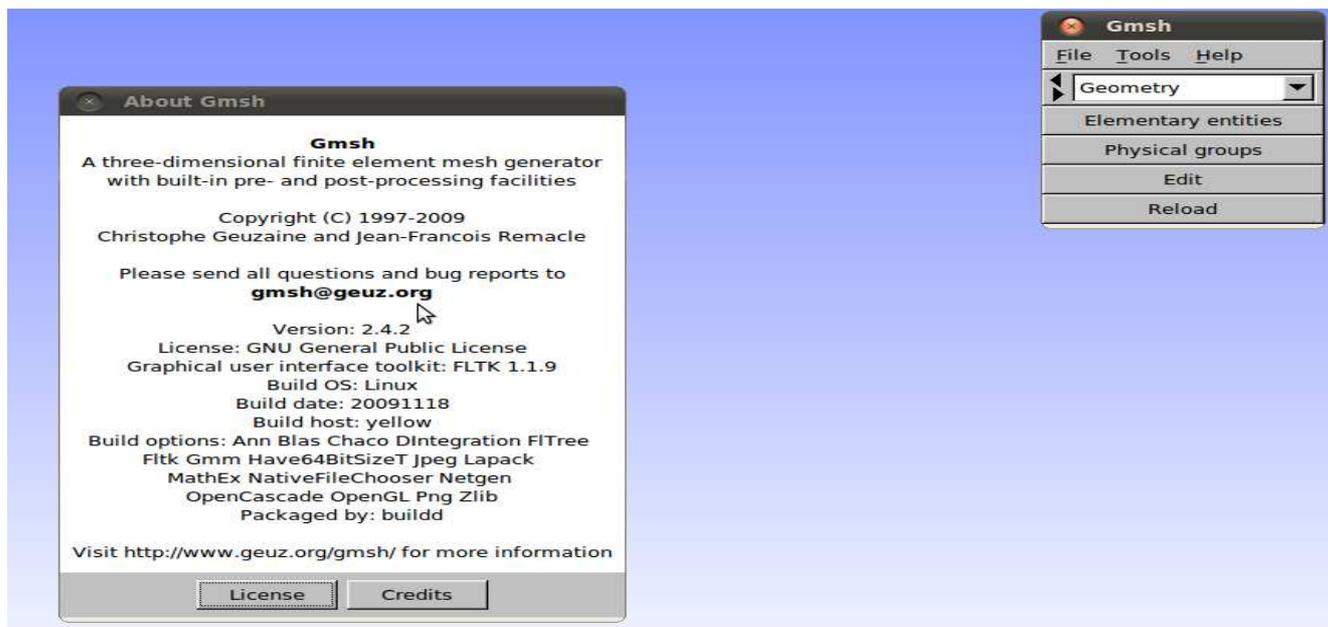


Fig.4 - version Gmsh

Est un logiciel de maillage par éléments finis développé par Christophe Geuzaine et Jean-François Remacle. Utilise pour une représentation de frontière pour décrire les géométries. Les modèles sont créés dans un flux ascendant en définissant successivement des points, des lignes

orientées (segments de droite, cercles, ellipses, splines, ...), des surfaces orientées (surfaces planes, surfaces, surfaces triangulées, ...) et des volumes. Des groupes d'entités géométriques (appelés «groupes physiques») peuvent également être définis à partir de ces entités géométriques élémentaires. Le langage de script de Gmsh permet de paramétrer toutes les entités géométriques.

Gmsh est construit autour de quatre modules: géométrie, maillage, solveur et post-traitement. Toutes les instructions géométriques, maillages, solveur de post-traitement sont prescrites de manière interactive via l'interface utilisateur graphique (GUI) ou dans des fichiers texte utilisant le propre langage de script de Gmsh.[21]

Pour la création de maillage nous avons aussi utilisé des routines fortran (annexes A et B)

3.4.1.1 Les modules de 'GMSH'

- un module de géométrie,
- un module de maillage,
- un module solveur,
- un module de post-traitement.

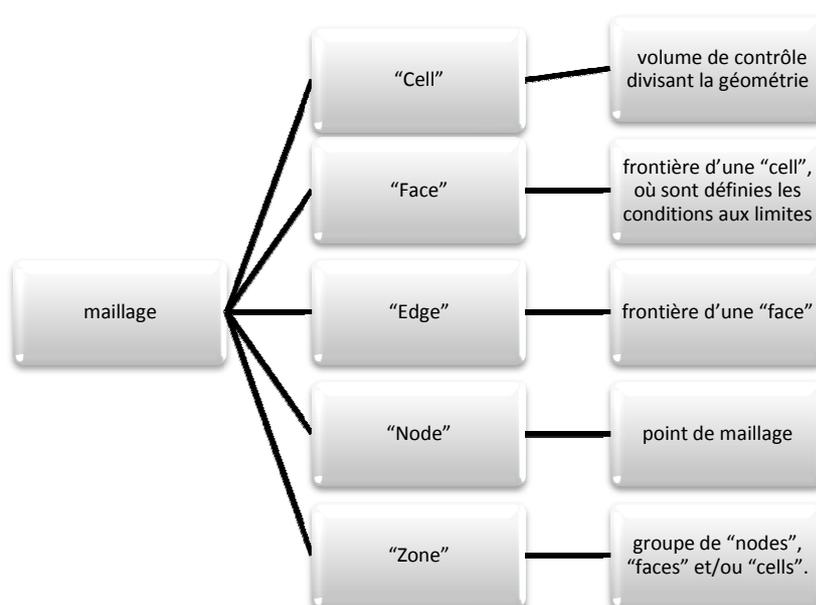
3.4.2 Maillage

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD. Une bonne qualité de maillage repose sur la minimisation des éléments présentant des « distorsions » (skewness en anglais), et sur une bonne « résolution » dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc, ..). Un bon maillage doit également être suffisamment « lisse ».

[15]

3.4.2.1 Composants du maillage

Schéma3 - composants du maillage



3.4.2.2 Maillage 2D

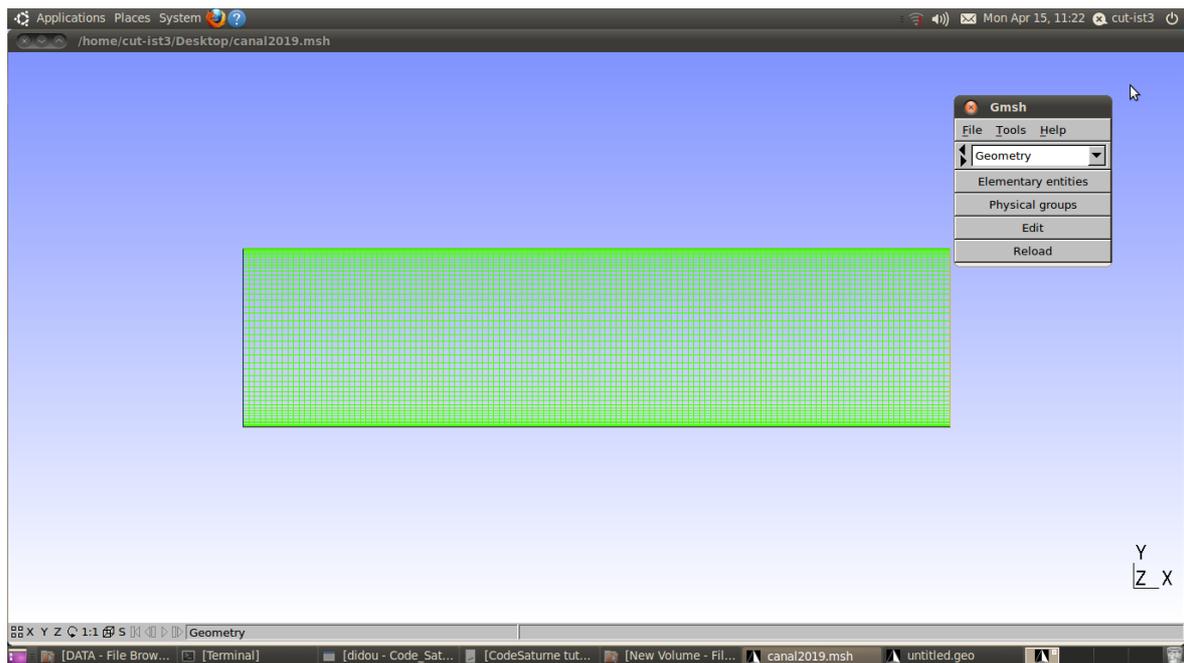


Fig. 5- La génération du maillage (2-D) et Domaine de calcul.

3.4.2.3 Maillage 3D

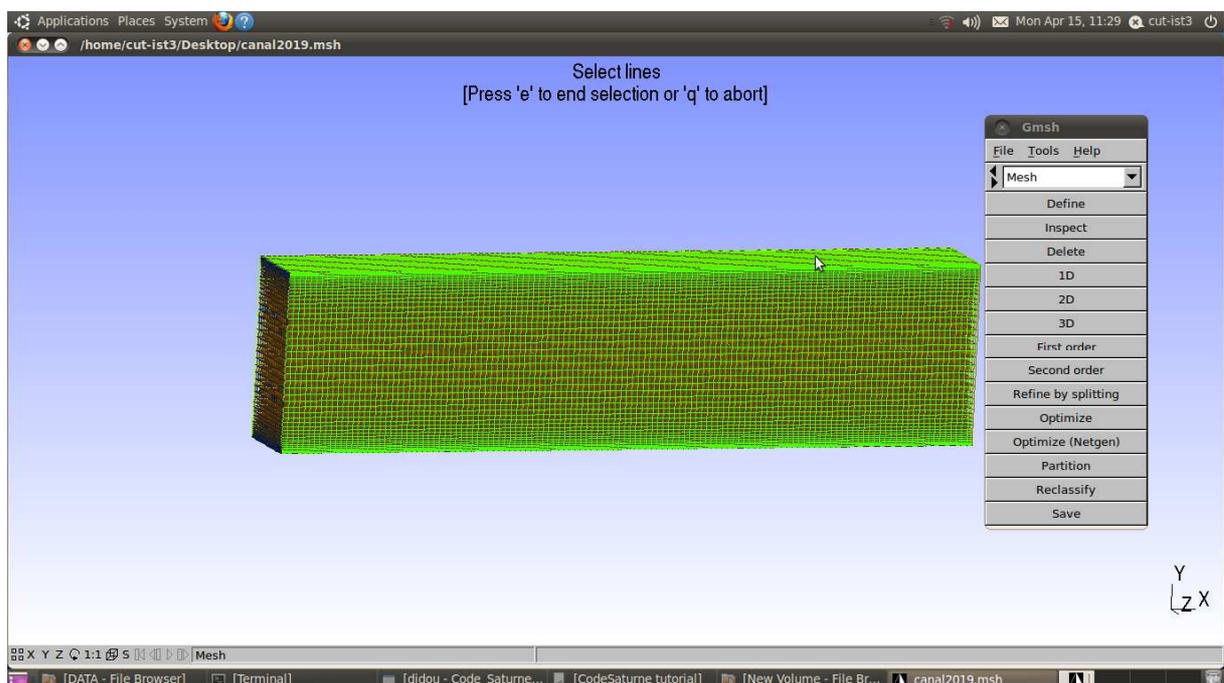


Fig. 6- La génération du maillage (3-D) et Domaine de calcul.

3.4.2.4 Module de maillage(Mesh module)

Le module de maillage Gmsh regroupe plusieurs algorithmes de maillage 1D, 2D et 3D, tous produisant des grilles se conformant au sens des éléments finis:

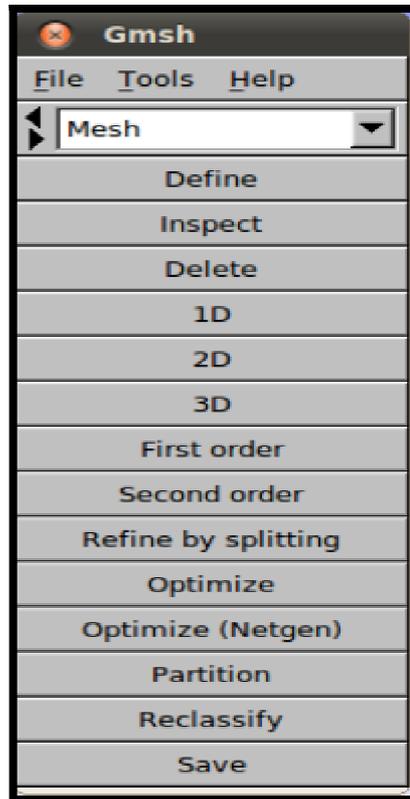


Fig. 7- Menu du module mesh.

3.4.2.5 physical groupe

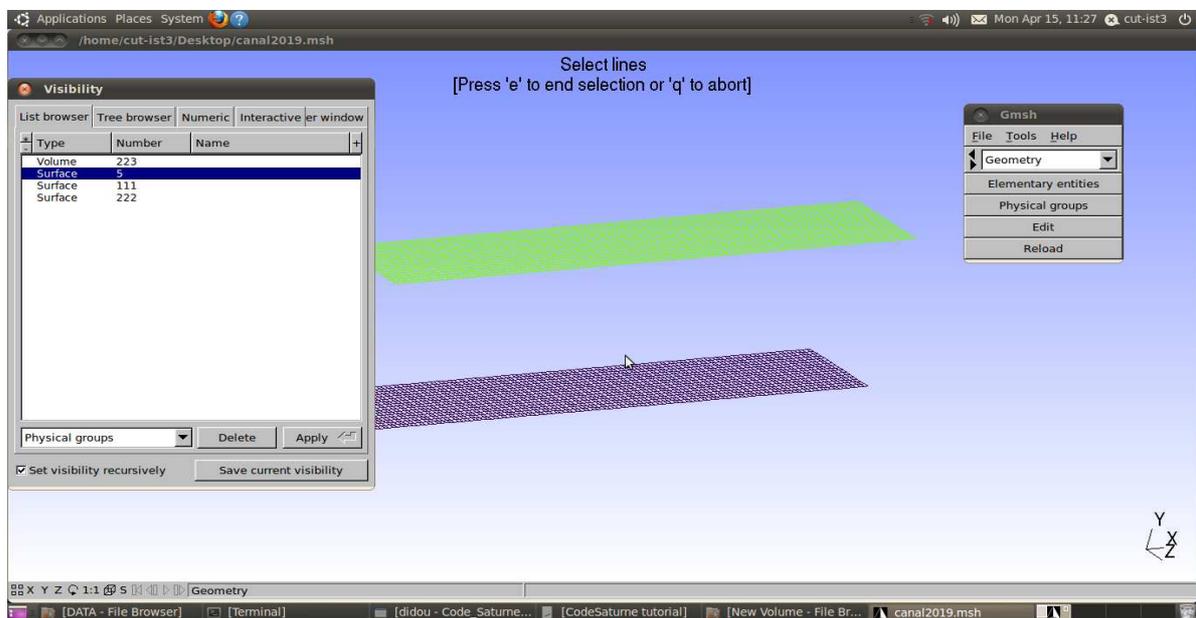


Fig. 8 - groupe physique.

3.4.3 Code Saturne

Code_Saturne est un code de mécanique des fluides généraliste pouvant simuler des écoulements laminaires ou turbulents, incompressibles ou faiblement dilatables, sur des maillages structurés ou non structurés (voir Archambeau et al. [Archambeau 2004]) Développé par EDF.

Ce code, « open source », Le code est massivement parallèle et dispose de modules permettant la prise en compte de physiques particulières. On distingue ainsi, entre autres, un module atmosphérique, un module de magnétohydrodynamique, un module de turbomachine, etc.

On se borne ici à une présentation brève du module de base de Code_Saturne ainsi que de la discrétisation utilisée pour la résolution des équations. Le code résout les équations de Navier-Stokes pour un fluide incompressible avec les équations éventuelles des modèles de turbulence et permet également la résolution d'équations de transport de scalaires comme la température où la concentration d'une espèce. [22]

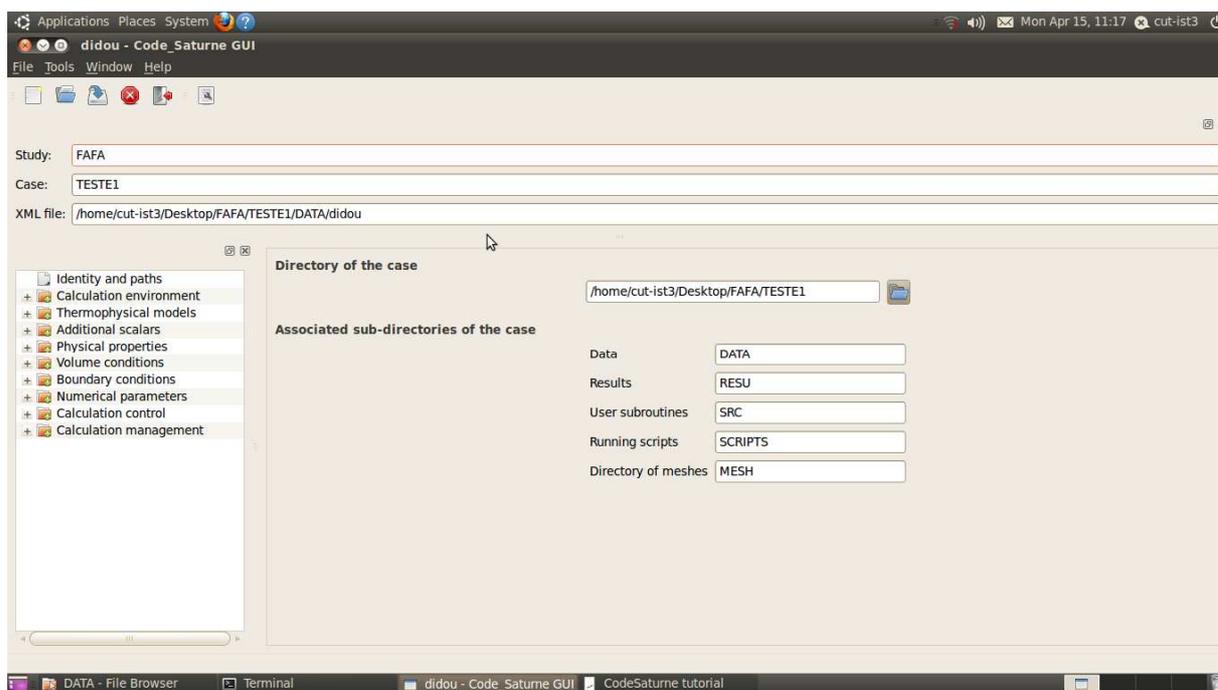


Fig. 9-Interface graphique de Code_Saturne.

3.4.4 EnSight

EnSight (for Engineering inSight) fournit aux ingénieurs et aux scientifiques un progiciel de post-traitement graphique facile à utiliser. EnSight fournit des outils puissants et faciles à utiliser via une interface conviviale.

Le traitement EnSight commence par votre modèle. Généralement, les éléments de votre modèle sont regroupés en plusieurs parties. Dans EnSight, presque toutes les informations sont associées à des pièces et presque toutes les actions sont appliquées à des pièces.

3.4.4. 1 Géométrie

Une partie est composée de nœuds et d'éléments (les éléments sont des ensembles de nœuds connectés selon une forme géométrique particulière). Chaque nœud, qui est partagé par ses éléments adjacents, est défini par son emplacement de coordonnées dans le cadre de référence du modèle.

3.4.4. 2 Valeurs variables

Les fichiers de données compatibles EnSight fournissent des valeurs variables au niveau des nœuds de chaque partie, des centres d'éléments ou des deux. En cas de besoin (ou sur demande), EnSight trouvera la valeur d'une variable à n'importe quel point sur ou dans un élément en utilisant la fonction de forme de cet élément. [23]

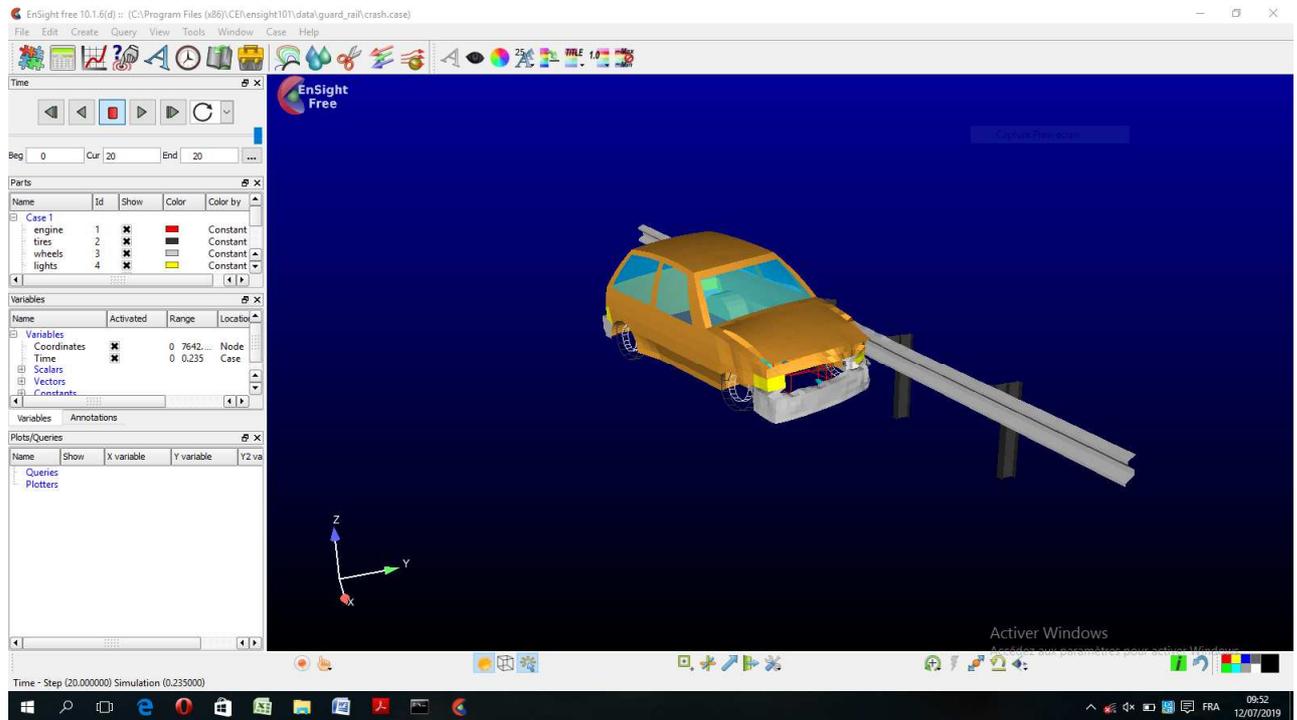


Fig. 10-Interface graphique de EnSight.

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 principaux résultats obtenus par la modélisation numérique d'un écoulement turbulent incompressible dans un canal plan.

4.1 Visualisation des résultats (champs) sous Enight

Les champs observés pour Code_Saturne sont très satisfaisants. On observe bien l'intensité des champs dans les différentes parties du canal. La vitesse est maximale au centre du canal (figure 11), alors que le taux de dissipation y est faible (figure 12).

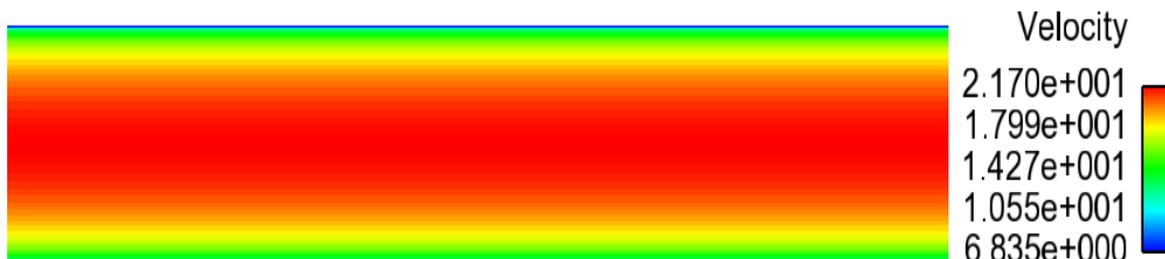


Fig.11- Champ de vitesse moyenne U

Sur la figure 11 on observe la distribution du champ de vitesse moyen, il est clair que la vitesse est maximale au centre et nulle à aux parois du fait de présence des forces de frottement entre les particules fluides et les parois du canal.



Fig.12- Champ du taux de dissipation

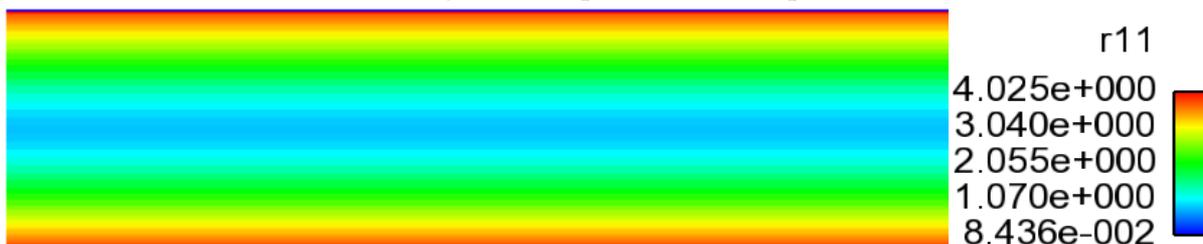


Fig.13- Champ de tension de Reynold (R11)

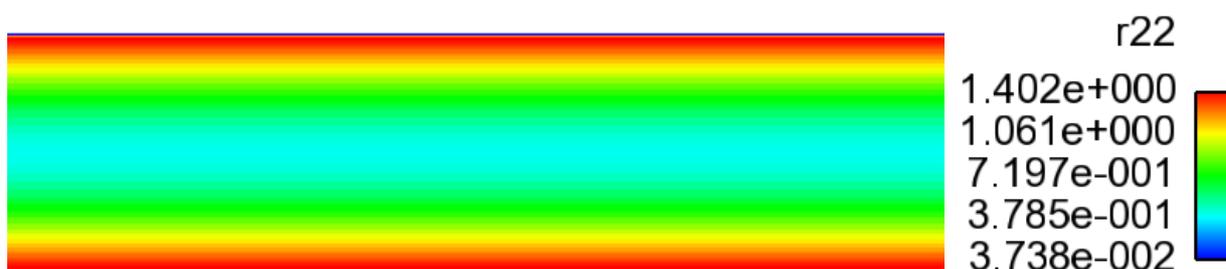


Fig.14- Champ de tension de Reynold (R22)

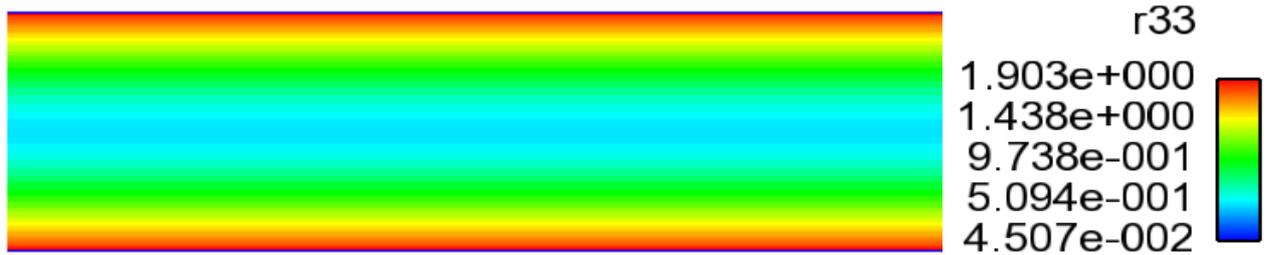


Fig.15- Champ de tension de Reynold (R33)

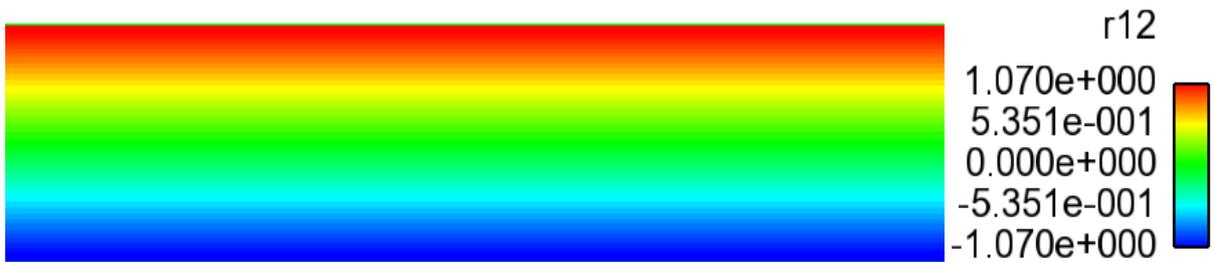


Fig.16- Champ de tensions de Reynold (R12)

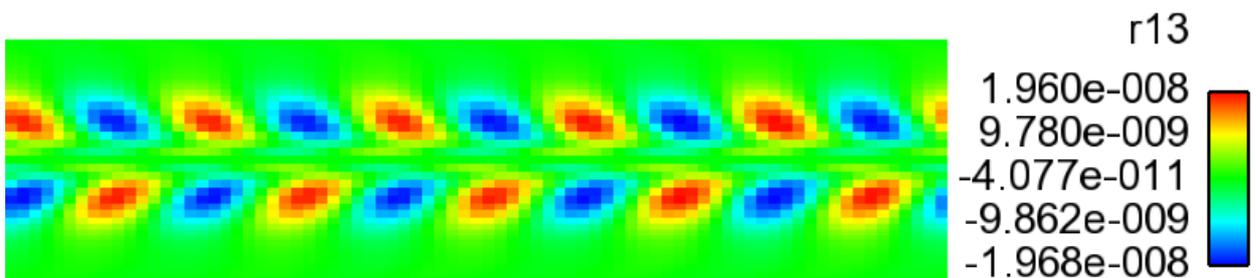


Fig.17- Champ de tension de Reynold (R13)

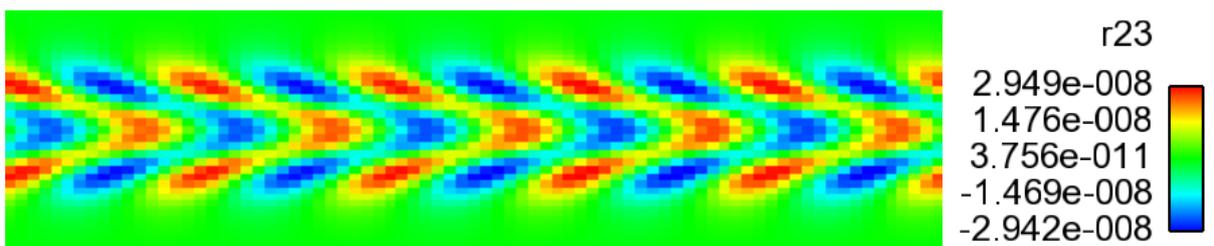


Fig.18- Champ de tension de Reynold (R23)

- Nous poursuivons l'analyse avec les composantes non diagonales du tenseur de contraintes de Reynolds. La symétrie de l'écoulement de canal implique que les composantes xz et yz du tenseur de contraintes de Reynolds sont égaux à zéro. Par conséquent, la seule composante restante à analyser est la composante xy , dont le négatif est appelé contrainte de cisaillement turbulent.

4.2 Interprétation des résultats

Je comparé le résultat du calcul RANS avec le résultat DNS /LES j'ai utilisé le référence [24], [25]

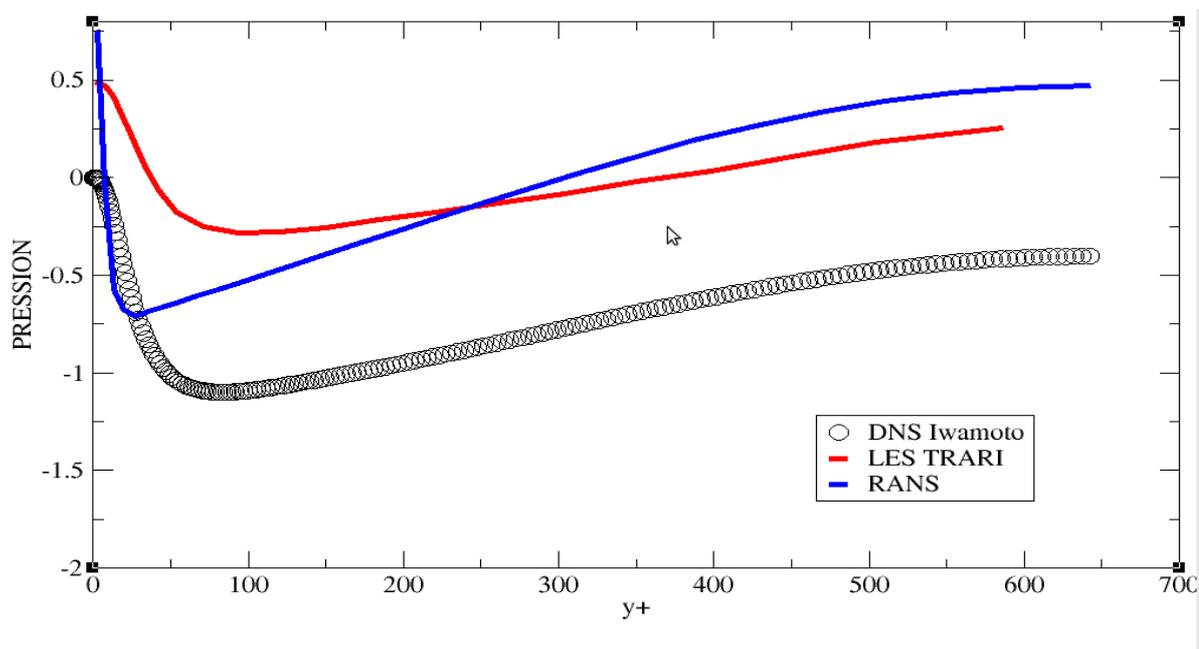


Fig.19- Profil de Pression moyenne comparai à DNS.

La figure (19) ci-dessus représente le profile de pression à comparais par le résultat de DNS. Nous remarquons la chute de pression. Dans les deux cas RANS et DNS, l'allure du profil bien la même. L'écart entre les deux profiles est du au fait que les valeurs obtenues par la DNS sont dimensionnalisés ce qui n'est pas le cas des résultats obtenus par la présente simulation RANS.

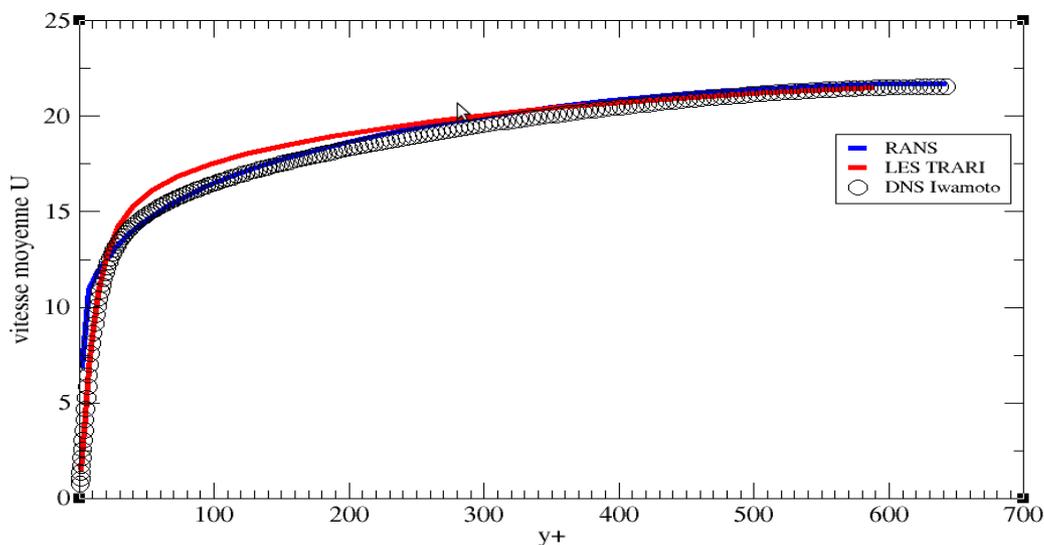


Fig.20- Profil de Vitesse moyenne

Les résultats obtenus en fin de simulation montre un profil de vitesse pleinement développé tout au long du canal, la vitesse est maximale au centre et nulle à la paroi.

Sauf une légère discontinuité dans la zone proche paroi, on voit bien que profil issu de la simulation RANS adhère parfaitement avec celui obtenu par la DNS d'IWAMOTTO et all.

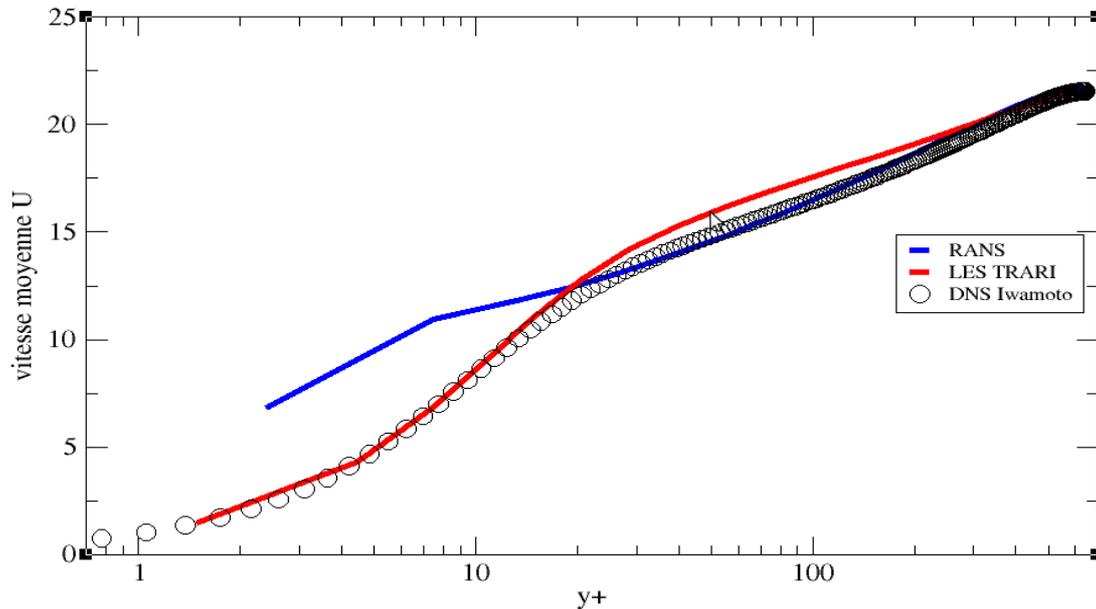


Fig.21- représentation logarithmique du profil de vitesse

La fig. (21) montre illustre une représentation logarithmique du profile de vitesse, dans cette figure on remarque :

- la zone proche paroi n'est pas suffisamment bien résolue, ceci est le point faible de la modélisation RANS classique, on constat la non linéarisation du profil de vitesse dans cette zone d'où l'intérêt de l'utilisation d'un modèle de paroi. En s'éloignant de la couche visqueuse et en allant jusqu'au centre du canal les résultats de la modélisation RANS se confondent avec celle de la modélisation DNS et LES exprimant parfaitement le comportement universel des profils de vitesses tel qu'il est exprimé par la formule de Reitchard

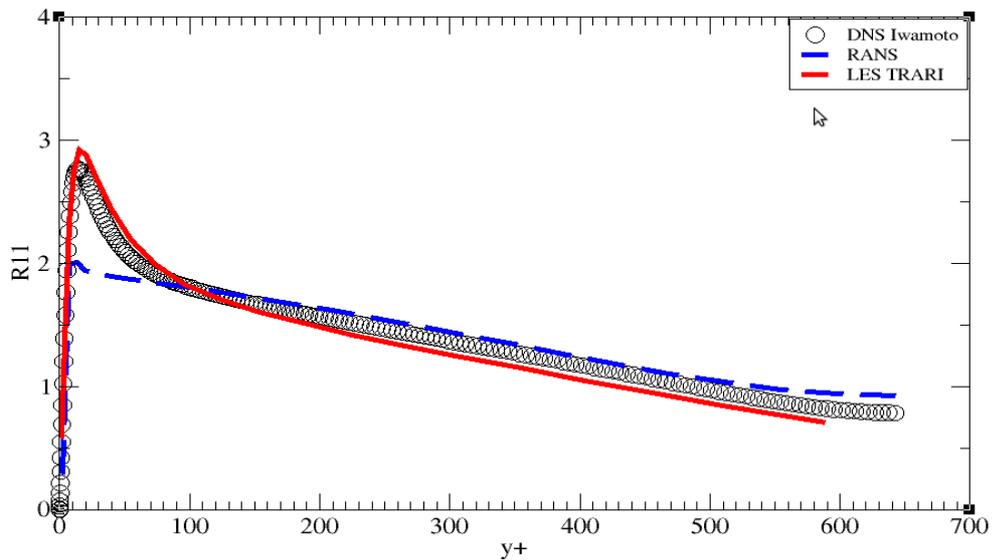


Fig.22- Profil de tension de Reynolds 11.

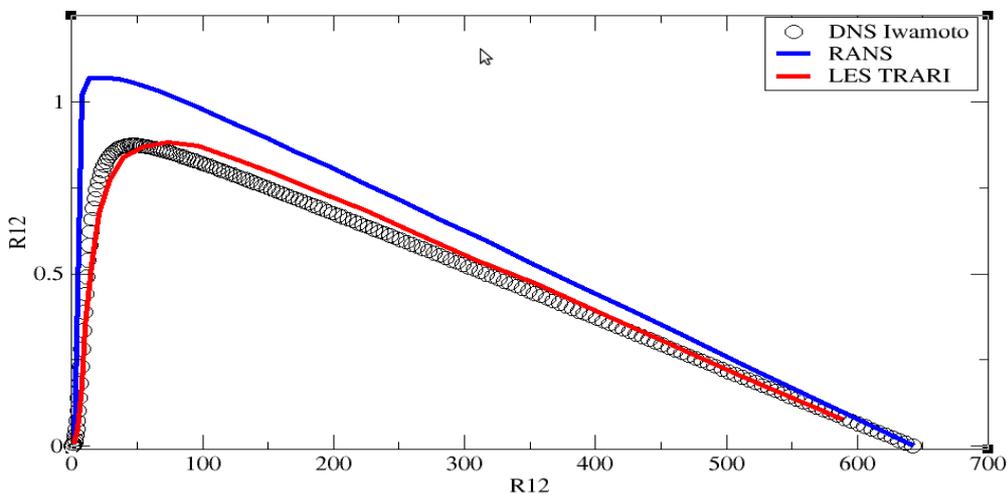


Fig.23- Profil de tension de Reynolds 12.

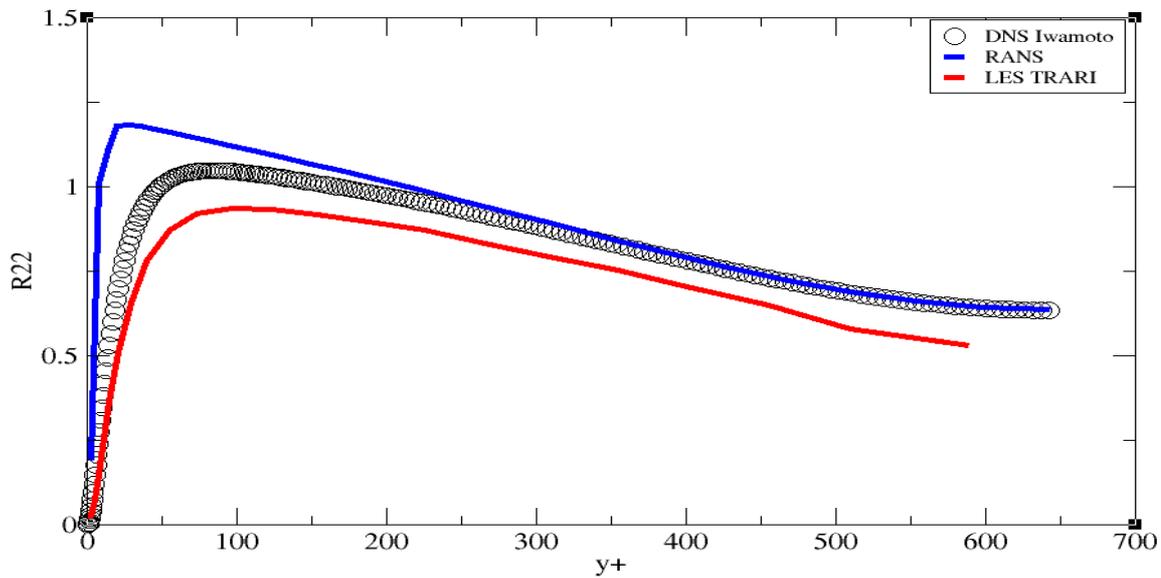


Fig.24- Profil de tension de Reynolds 22.

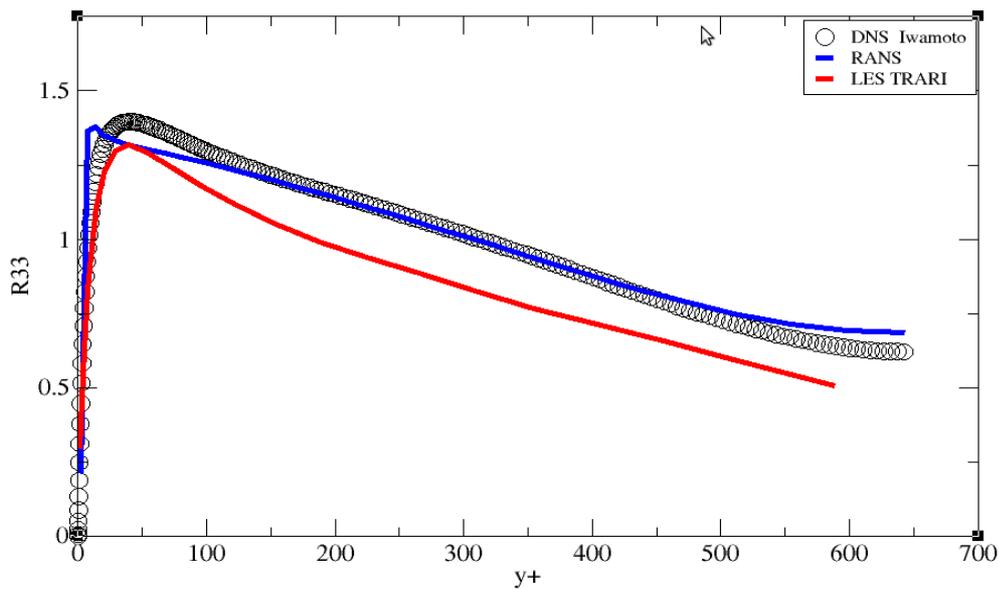


Fig.25- Profil de tension de Reynolds 33.

Les figures (21, 23, 24,25) sont présentés les composants du tenseur de Reynolds à savoir R11, R12, R22, et R33 respectivement. On remarque la position et la valeur des pics est mieux définie par la LES que par RANS. En s'éloignant vers le centre du canal les résultats obtenus par la modélisation RANS se confondent avec ceux issus de la simulation DNSd'Iwamoto.

Les composantes du tenseur de contraintes de Reynolds sont les grandeurs primaires décrivant les fluctuations turbulentes.

- Nous poursuivons l'analyse avec les composantes non diagonales du tenseur de contraintes de Reynolds. La symétrie de l'écoulement de canal implique que les composantes xz et yz du tenseur de contraintes de Reynolds sont égaux à zéro. Par conséquent, la seule composante restante à analyser est la composante xy , dont le négatif est appelé contrainte de cisaillement turbulent.
- les contraintes visqueuses ne jouent un rôle important que dans la région de la paroi visqueuse, $y^+ < 50$, et par conséquent, en dehors de cette région, on peut s'attendre à ce que le profil de la contrainte de cisaillement turbulente soit de forme linéaire.

Conclusion

Les résultats obtenus étaient très concluantes mais pas assez satisfaisantes dans la zone proche paroi, le traitement adéquat de la sous-couche visqueuse ($y^+ < 5$) est mieux effectué par l'approche LES ou encore mieux par la DNS. Cependant l'approche RANS demeure assez concluante en ce qui est de recueillir des données statistiques de l'écoulement du fluide.

CONCLUSION
GENERALE

Conclusion et recommandations

Dans le but de définir un maillage optimum pour la simulation numérique de l'écoulement turbulent en canal plan par l'approche RANS, nous avons élaboré plusieurs maillages tout en prenant comme critères la distance adimensionnelle à la paroi dans les trois directions de l'espace ΔX^+ , ΔY^+ , ΔZ^+ . Après avoir lancé plusieurs calculs, nous avons retenus un maillage avec $\Delta X^+=33$, $\Delta Y^+=14$, $\Delta Z^+=21$ et qui s'avèrent comme étant des valeurs limites pour une approche RANS, mais ce qui est plus intéressant est de pouvoir donner une signification physique à ces valeurs numériques ce qui nous fait penser aux échelles de turbulences,

Un maillage élaboré sur la base de la micro-échelle de Taylor fut mis au point, cependant la non disponibilité d'une station de calcul et la limite des moyens mis en place au niveau de notre établissement a contraint le lancement des calculs, nous espérons pouvoir l'effectuer dans le futur proche.

Tout en prenant en compte le gain en temps de calcul, les limites en moyens de calculs (outil informatique) d'une part, et la consistance des résultats numériques d'une autre part, nous recommandons l'approche hybride RANS-LES qui répond à de tels soucis.

Bibliographie:

- [1] BEKKOUCHE, M., TRARI, M., 2013. Etude numérique comparative entre deux conditions thermiques symétriques (Flux, Température) appliquée, dans les échangeurs de chaleur ;
- [2] DIAF, A., 2011. CONTRIBUTION A L'ETUDE DES ECOULEMENTS DE SURFACE PAR METHODES NUMERIQUES;
- [3] SOUIADI, L., 2013. LA CONVECTION MIXTE DANS UN CANAL HORIZONTAL MUNI DE BLOCS CHAUFFES ;
- [4] Pijush K. Kundu, David R. Dowling, in Fluid Mechanics (Sixth Edition), 2016
- [5] Markus, U., 2006. Etude des Écoulements en Conduite. Méthodes Numériques et Analyse ;
- [6] Lyons, S., Han ratty, T., McLaughlin, J., 1991. Simulation numérique directe du transfert de chaleur passif dans un écoulement turbulent en canal ;
- [7] Kim, J., Moin, P., 1989. Transport of Passive Scalars in a Turbulent Channel Flow;
- [8] Kramer, F., 2009. Etude numérique d'écoulements de paroi compressibles : méthodes d'intégration temporelle semi-implicites et application au canal plan turbulent ;
- [9] Klein, M., 2005. An Attempt to Assess the Quality of Large Eddy Simulations in the Context of Implicit Filtering;
- [10] Antoine DEVESA, M., 2006. Modélisation de paroi pour la simulation d'écoulements instationnaires non-isothermes ;
- [11] Ulka, G., 2006. Quality Criteria for Large Eddy Simulation;
- [12] SOUIADI, L., 2012. LA CONVECTION MIXTE DANS UN CANAL HORIZONTAL MUNI DE BLOCS CHAUFFES ;
- [13] Perron, C., M. Boudreau, É. Gauthier, O. Gauvin Tremblay, P. Côté. La turbulence en CFD : Modélisation et Simulation ;
- [14] Rémi, M., 2006. Modélisation aux moyennes de Reynolds ou modélisation RANS (Reynolds-averaged Navier Stokes) ;
- [15] Nouri, H., Ravelet, F., 2013. Introduction à la simulation numérique des écoulements. Application au transfert thermique sur plaque plane avec StarCCM+ ;
- [16] 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;
- [17] Gueraoui, K., 2010. Analyse numérique. Méthode des volumes finis. Faculté des sciences, Université Mohammed v– Agdal, Rabat ;
- [18] Blazek, J., 2001. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications;
- [19] Antoine DEVESA, M., 2006. Modélisation de paroi pour la simulation d'écoulements instationnaires non-isothermes ;
- [20] Adil, R., 2011. (Université de Caen) Couches Limites ;
- [21] Christophe, G., Jean-François, R., 1997-2005. Gmsh Reference Manual ;

- [22]Jean-François, W., 2016. Lois de paroi adaptatives pour un modèle de fermeture du second ordre dans un contexte industriel ;
- [23]EnSight User Manual, Copyright 1994–2005, Computational Engineering International, Inc. All rights reserved. Printed in the United States of America;
- [24] TRARI, T., 2007.Large Eddy Simulation of Turbulent Channel Flow on Non-conforming Mesh Following Taylor micro-scales;
- [25] Iwamoto, K., 2002.Database of Fully Développé Channel Flow ;

ANEXE A

PROGRAM CANALREG

```

C          *****
IMPLICIT NONE
C
C dimension :
C
      DOUBLE PRECISION l1,l2,l3,r
      integer n,ndim,n1,n2,n3,iout
      integer icoul1,icoul2,icoul3,icoul4,icoul5,icoul6
      double precision dy0,alpha
      character*10 file1
      character*3 char
      double precision test,yplus,Re
C
C  DOMAIN DIMENSIONS
C
      10 continue
         ndim = 3
iout = 0
C
write(*,*) 'with regular refinement '
      write(*,*) 'give the output file name '
      write(*,*) 'with unv extension if you want'
      write(*,*) 'do not exceed 10 characters'
      read(*,100) file1
      write(*,200) file1
      write(*,*) file1
      write(*,*) 'give l1 : x lenght'
      read(*,*) l1
      write(*,*) 'give l2 : y lenght'
      read(*,*) l2
      write(*,*) 'give l3 : z lenght'
      read(*,*) l3
      write(*,*) 'give n1 : number of nodes in x direction '
      write(*,*) 'take care, it is the number of cells + 1'
      read(*,*) n1

```

```

write(*,*) 'give n2 : number of nodes in y direction '
read(*,*) n2
write(*,*) 'give n3 : number of nodes in z direction '
read(*,*) n3
write(*,*) 'No refinement '
write(*,*) 'give the coulour of the faces at y = 0'
read(*,*) icoul1
write(*,*) 'give the coulour of the faces at x = 11'
read(*,*) icoul2
write(*,*) 'give the coulour of the faces at y = 12'
read(*,*) icoul3
write(*,*) 'give the coulour of the faces at x = 0'
read(*,*) icoul4
write(*,*) 'give the coulour of the faces at z = 0'
read(*,*) icoul5
write(*,*) 'give the coulour of the faces at z = 13'
read(*,*) icoul6

```

C

```

write(*,*) 'creating ',file1
write(*,*) '....'

```

C

```

CALL CREATE
& (l1,l2,l3,r,ndim,
& icoul1,icoul2,icoul3,icoul4,icoul5,icoul6,
& N1, N2, N3,file1,alpha,dy0,n)
write(*,*) 'finished'
write(*,*) 'good luck for the fluid part of your work ...'
write(*,*) 'not always as easier as this mesh generator'
write(*,*) 'do you want to create another file ?'
write(*,*) 'yes or no'
read(*,100) char
20 continue
if(char.ne.'yes'.and.char.ne.'no') then
write(*,*) 'did you read the line above ????'
write(*,*) 'yes or no, nothig else'

```

```

    read(*,100) char
    goto 20
endif
if(char.eq.'yes') then
    goto 10
else
    write(*,*) 'Bye'
    stop
endif
100 format(A)
200 format('the output file is ',A10)
    stop
    end
C
C *****
C
    subroutine create
& (l1,l2,l3,r,ndim,
& icoul1,icoul2,icoul3,icoul4,icoul5,icoul6,
& N1, N2, N3,file1,alpha,dy0,n)
C
    implicit none
C
    DOUBLE PRECISION l1,l2,l3,r
    INTEGER N1, N2, N3
    integer i,j,k,inode,ielem,indic1,indic2,indic3,indic4,indic5,ii
integer inode1,inode2,inode3,inode4,ndim
    integer inode5,inode6,inode7,inode8
    integer n,icoul1,icoul2,icoul3,icoul4,icoul5,icoul6
    double precision dx,dy,dz,alpha,dy0
    double precision xyz(NDIM)
character*10 file2,file1
    integer connec(8)

    dx = l1/float(N1-1)
    dy = l2/float(N2-1)

```

```

dz = 13/float(N3-1)
C
C
C
open(file=file1,unit=21,form='formatted')
rewind(21)
indic1 = -1
c  write(21,1001) indic1
indic1 = 151
c  write(21,1001) indic1
indic1 = -1
c  write(21,1001) indic1
indic1 = -1
write(21,1001) indic1
indic1 = 2411
write(21,1001) indic1
C
indic1 = 0
indic2=11
indic3=1
do k=1,N3
  do j=1,N2
    do i=1,N1
      inode = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
      xyz(1) = float(i-1)*dx
      xyz(2) = float(j-1)*dy
      xyz(3) = float(k-1)*dz
      write(21,1002) inode,indic3,indic3,indic2
      write(21,1003) (xyz(ii),ii=1,3)
    enddo
  enddo
enddo
C
C  do inode=1,N1*N2
C  write(22,*) xyz(inode,1),xyz(inode,2)

```

```

C   enddo
    indic1 = -1
    write(21,1001) indic1
    indic1 = -1
    write(21,1001) indic1
    indic1 = 2412
    write(21,1001) indic1
    do k=1,N3-1
        do j=1,N2-1
            do i=1,N1-1
                ielem = i+(j-1)*(N1-1)+(k-1)*(N1-1)*(N2-1)
                inode1 = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
inode2 = inode1 + 1
                inode3 = inode2 + N1
                inode4 = inode3 - 1
                inode5 = inode1 + N1*N2
                inode6 = inode5 + 1
                inode7 = inode6 + N1
                inode8 = inode7 - 1
                connec(1) = inode1
                connec(2) = inode2
                connec(3) = inode3
                connec(4) = inode4
                connec(5) = inode5
                connec(6) = inode6
                connec(7) = inode7
                connec(8) = inode8
                indic1 = 115
inode2 = 1
                indic3 = 8
                indic4 = 2
                write(21,1004) ielem,indic1,indic2,indic2,indic4,indic3
                write(21,1005) (connec(ii),ii=1,indic3)
            enddo
        enddo
    enddo
enddo
enddo
enddo

```

C

```

k=1
  do j=1,N2-1
    do i=1,N1-1
      ielem =ielem+1
      inode1 = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
inode2 = inode1 + 1
      inode3 = inode2 + N1
      inode4 = inode3 - 1
inode1 = 94
      indic2 = 2
      indic3 = 4
      indic4 = 2
      indic5 = icoul5
      write(21,1004) ielem,indic1,indic5,indic2,indic5,indic3
write(21,1005) inode1,inode2,inode3,inode4
    enddo
  enddo

```

C

C

```

k=N3-1
  do j=1,N2-1
    do i=1,N1-1
c      ielem = ielem+i+(j-1)*(N1-1)+(k-1)*(N1-1)*(N2-1)
      ielem =ielem+1
      inode1 = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
inode5 = inode1 + N1*N2
      inode6 = inode5 + 1
      inode7 = inode6 + N1
      inode8 = inode7 - 1
inode1 = 94
      indic2 = 3
      indic3 = 4
      indic4 = 2
      indic5 = icoul6

```

```

        write(21,1004) ielem,indic1,indic5,indic2,indic5,indic3
write(21,1005) inode5,inode8,inode7,inode6
        enddo
enddo
C
C
    do k=1,N3-1
        j=1
        do i=1,N1-1
C          ielem = ielem+i+(j-1)*(N1-1)+(k-1)*(N1-1)*(N2-1)
          ielem =ielem+1
          inode1 = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
inode2 = inode1 + 1
          inode5 = inode1 + N1*N2
          inode6 = inode5 + 1
          inode7 = inode6 + N1
          inode8 = inode7 - 1
indic1 = 94
          indic2 = 4
          indic3 = 4
          indic4 = 2
          indic5 = icou11
          write(21,1004) ielem,indic1,indic5,indic2,indic5,indic3
write(21,1005) inode1,inode2,inode6,inode5
          enddo
        enddo
C
    do k=1,N3-1
        j=N2-1
        do i=1,N1-1
          ielem =ielem+1
          inode1 = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
inode2 = inode1 + 1
          inode3 = inode2 + N1
          inode4 = inode3 - 1
          inode5 = inode1 + N1*N2

```

```

        inode6 = inode5 + 1
        inode7 = inode6 + N1
        inode8 = inode7 - 1
    indic1 = 94
        indic2 = 4
        indic3 = 4
        indic4 = 2
        indic5 = icoul3
        write(21,1004) ielem,indic1,indic5,indic2,indic5,indic3
write(21,1005) inode3,inode4,inode8,inode7
        enddo
    enddo
C
C
    do k=1,N3-1
        do j=1,N2-1
            i=1
                ielem =ielem+1
                inode1 = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
inode2 = inode1 + 1
                inode3 = inode2 + N1
                inode4 = inode3 - 1
                inode5 = inode1 + N1*N2
                inode6 = inode5 + 1
                inode7 = inode6 + N1
                inode8 = inode7 - 1
            indic1 = 94
                indic2 = 6
                indic3 = 4
                indic4 = 2
                indic5 = icoul4
                write(21,1004) ielem,indic1,indic5,indic2,indic5,indic3
write(21,1005) inode1,inode5,inode8,inode4
                enddo
        enddo
    enddo
C

```

```

do k=1,N3-1
  do j=1,N2-1
    i=N1-1
    ielem =ielem+1
    inode1 = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
inode2 = inode1 + 1
    inode3 = inode2 + N1
    inode4 = inode3 - 1
    inode5 = inode1 + N1*N2
    inode6 = inode5 + 1
    inode7 = inode6 + N1
    inode8 = inode7 - 1
inode1 = 94
    indic2 = 7
    indic3 = 4
    indic4 = 2
    indic5 = icoul2
    write(21,1004) ielem,indic1,indic5,indic2,indic5,indic3
write(21,1005) inode6,inode2,inode3,inode7
    enddo
enddo
    indic1 = -1
    write(21,1001) indic1
    close(21)
C
1001 FORMAT(I6)
1002 FORMAT(4I10)
1003 FORMAT(3(2X,D23.16))
1004 FORMAT(6I10)
1005 FORMAT(8I10)
1006 FORMAT(4I10)
2001 FORMAT(68X,A22)
C
    return
    end

```

ANEXE B

PROGRAM ECRUNV

```

C          *****
IMPLICIT NONE
C
C dimension :
C
  DOUBLE PRECISION l1,l2,l3,r
  integer n,ndim,n1,n2,n3,iout
  integer icoul1,icoul2,icoul3,icoul4,icoul5,icoul6
  double precision dy0,alpha,y1, y2
  character*10 file1
  character*3 char
  double precision test,yplus,Re
C
C  DOMAIN DIMENSIONS
C
  10 continue
ndim = 3
  iout = 0
C
  write(*,*) 'with hyperbolique function (Vasilyev, JCP 157)'
  write(*,*) 'give the output file name '
  write(*,*) 'with unv extension if you want'
  write(*,*) 'do not exceed 10 characters'
  read(*,100) file1
  write(*,200) file1
  write(*,*) file1
  write(*,*) 'give l1 : x lenght'
  read(*,*) l1
  write(*,*) 'give l2 : y lenght'
  read(*,*) l2
  write(*,*) 'give l3 : z lenght'
  read(*,*) l3
  write(*,*) 'give n1 : number of nodes in x direction '
  write(*,*) 'take care, it is the number of cells + 1'

```

```

read(*,*) n1
write(*,*) 'give n2 : number of nodes in y direction '
read(*,*) n2
if(mod(N2,2).ne.1) then
  write(*,*) 'N2 must be odd'
  write(*,*) 're-try again'
  read(*,*) n2
40 continue
  if(mod(N2,2).ne.1) then
    iout = iout + 1
    write(*,*) 'ooooh, I said N2 must be odd'
    if(iout.eq.3) then
      write(*,*) 'You are really not reading the comments'
      write(*,*) 'CIAO'
      stop
    endif
    write(*,*) 'give me an odd number please'
    read(*,*) n2
    goto 40
  endif
endif
write(*,*) 'give n3 : number of nodes in z direction '
read(*,*) n3
write(*,*) 'the refinement is only in y direction'
write(*,*) 'the refinement is from y = l2/2 to y=0 and y =l2'
write(*,*) 'r is the ratio of hyperbolique function'
write(*,*) 'give r'
read(*,*) r
n = (N2-1)/2
alpha = r
write(*,*) 'give the Reynolds number to estimate y+'
read(*,*) Re
yplus = (l2/2. - l2/2.*
& tanh(alpha*float(n+1-2)/float(n))/tanh(alpha)) * Re / 2.0D0

y1 = l2/2.0D0-l2/2.0D0 *
```

```

&   tanh(alpha*float(n+1-n)/float(n))/tanh(alpha)
      y2 = 12/2.0D0-12/2.0D0 *
&   tanh(alpha*float(n+1-(n+1))/float(n))/tanh(alpha)
write(*,*) 'y+ a la paroi = ',yplus
      write(*,*) 'dy+ a la paroi = ',2.D0*yplus
      write(*,*) 'dy+ au centre du canal = ',(y2-y1)*Re
write(*,*) 'delta x+ = ',11/float(n1-1)*Re
      write(*,*) 'delta z+ = ',13/float(n3-1)*Re
      write(*,*) 'the reason of the geometric serie is ',alpha
      write(*,*) 'give the coulour of the faces at y = 0'
      read(*,*) icoul1
      write(*,*) 'give the coulour of the faces at x = 11'
      read(*,*) icoul2
      write(*,*) 'give the coulour of the faces at y = 12'
      read(*,*) icoul3
      write(*,*) 'give the coulour of the faces at x = 0'
      read(*,*) icoul4
      write(*,*) 'give the coulour of the faces at z = 0'
      read(*,*) icoul5
      write(*,*) 'give the coulour of the faces at z = 13'
      read(*,*) icoul6

C
      write(*,*) 'creating ',file1
      write(*,*) '....'

C
      CALL CREATE
& (11,12,13,r,ndim,
& icoul1,icoul2,icoul3,icoul4,icoul5,icoul6,
& N1, N2, N3,file1,alpha,dy0,n,Re)
      write(*,*) 'finished'
      write(*,*) 'good luck for the fluid part of your work ...'
      write(*,*) 'not always as easier as this mesh generator'
      write(*,*) 'do you want to create another file ?'
      write(*,*) 'yes or no'
      read(*,100) char

```

20 continue

```

if(char.ne.'yes'.and.char.ne.'no') then
  write(*,*) 'did you read the line above ????'
write(*,*) 'yes or no, nothig else'
read(*,100) char
goto 20
endif
if(char.eq.'yes') then
  goto 10
else
  write(*,*) 'Bye'
  stop
endif

```

100 format(A)

200 format('the output file is ',A10)

```

stop
end

```

C

C *****

C

subroutine create

& (l1,l2,l3,r,ndim,

& icoul1,icoul2,icoul3,icoul4,icoul5,icoul6,

& N1, N2, N3,file1,alpha,dy0,n,Re)

C

implicit none

C

DOUBLE PRECISION l1,l2,l3,r

INTEGER N1, N2, N3

integer i,j,k,inode,ielem,indic1,indic2,indic3,indic4,indic5,ii

integer inode1,inode2,inode3,inode4,ndim

integer inode5,inode6,inode7,inode8

integer n,icoul1,icoul2,icoul3,icoul4,icoul5,icoul6

double precision dx,dy,dz,alpha,dy0, Re

double precision xyz(N1*N2*N3,NDIM)

character*10 file2,file1

```

integer connec((N1-1)*(N2-1)*(N3-1),8)

dx = 11/float(N1-1)
dy = 12/float(N2-1)
dz = 13/float(N3-1)
C
C
C
  open(file=file1,unit=21,form='formatted')
  rewind(21)
  indic1 = -1
c   write(21,1001) indic1
  indic1 = 151
c   write(21,1001) indic1
  indic1 = -1
c   write(21,1001) indic1
  indic1 = -1
  write(21,1001) indic1
  indic1 = 2411
  write(21,1001) indic1
C
  open(file='yplus',unit=22)
  rewind(22)
  indic1 = 0
  indic2=11
  indic3=1
  do k=1,N3
    do j=1,n
      do i=1,N1
        inode = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
        xyz(inode,1) = float(i-1)*dx
        xyz(inode,2) = 12/2.0D0-12/2.0D0 *
&   tanh(alpha*float(n+1-j)/float(n))/tanh(alpha)
        xyz(inode,3) = float(k-1)*dz
        write(21,1002) inode,indic3,indic3,indic2
        write(21,1003) (xyz(inode,ii),ii=1,3)

```

```

        if(i.eq.1.and.k.eq.1) then
write(22,*) j,xyz(inode,2)*Re
        endif
enddo
    enddo
enddo
do k=1,N3
do j=n+1,N2
do i=1,N1
    inode = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
    xyz(inode,1) = float(i-1)*dx
    xyz(inode,2) = l2/2.0D0 + l2/2.0D0*
& tanh(alpha*float(j-n-1)/float(n))/tanh(alpha)
    xyz(inode,3) = float(k-1)*dz
    write(21,1002) inode,indic3,indic3,indic2
    write(21,1003) (xyz(inode,ii),ii=1,3)
    if(i.eq.1.and.k.eq.1.and.j.eq.n+1) then
write(22,*) j,xyz(inode,2)*Re
    endif
enddo
enddo
enddo
close(22)

```

C

```

C    do inode=1,N1*N2
C    write(22,*) xyz(inode,1),xyz(inode,2)
C    enddo
indic1 = -1
write(21,1001) indic1
indic1 = -1
write(21,1001) indic1
indic1 = 2412
write(21,1001) indic1
do k=1,N3-1
do j=1,N2-1

```

```

do i=1,N1-1
  ielem = i+(j-1)*(N1-1)+(k-1)*(N1-1)*(N2-1)
  inode1 = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
inode2 = inode1 + 1
  inode3 = inode2 + N1
  inode4 = inode3 - 1
  inode5 = inode1 + N1*N2
  inode6 = inode5 + 1
  inode7 = inode6 + N1
  inode8 = inode7 - 1
convec(ielem,1) = inode1
  convec(ielem,2) = inode2
  convec(ielem,3) = inode3
  convec(ielem,4) = inode4
  convec(ielem,5) = inode5
  convec(ielem,6) = inode6
  convec(ielem,7) = inode7
  convec(ielem,8) = inode8
  indic1 = 115
  indic2 = 1
  indic3 = 8
  indic4 = 2
  write(21,1004) ielem,indic1,indic2,indic2,indic4,indic3
  write(21,1005) (convec(ielem,ii),ii=1,indic3)
enddo
enddo
enddo
C
k=1
do j=1,N2-1
do i=1,N1-1
  ielem =ielem+1
  inode1 = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
inode2 = inode1 + 1
  inode3 = inode2 + N1
  inode4 = inode3 - 1

```

```

indic1 = 94
    indic2 = 2
    indic3 = 4
    indic4 = 2
    indic5 = icoul5
    write(21,1004) ielem,indic1,indic5,indic2,indic5,indic3
write(21,1005) inode1,inode2,inode3,inode4
    enddo
enddo

C
C
    k=N3-1
    do j=1,N2-1
        do i=1,N1-1
c        ielem = ielem+i+(j-1)*(N1-1)+(k-1)*(N1-1)*(N2-1)
        ielem =ielem+1
        inode1 = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
inode5 = inode1 + N1*N2
        inode6 = inode5 + 1
        inode7 = inode6 + N1
        inode8 = inode7 - 1
indic1 = 94
        indic2 = 3
        indic3 = 4
        indic4 = 2
        indic5 = icoul6
        write(21,1004) ielem,indic1,indic5,indic2,indic5,indic3
write(21,1005) inode5,inode8,inode7,inode6
        enddo
enddo
C
C
    do k=1,N3-1
        j=1
        do i=1,N1-1

```

```

c      ielem = ielem+i+(j-1)*(N1-1)+(k-1)*(N1-1)*(N2-1)
      ielem =ielem+1
      inode1 = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
inode2 = inode1 + 1
      inode5 = inode1 + N1*N2
      inode6 = inode5 + 1
      inode7 = inode6 + N1
      inode8 = inode7 - 1
indic1 = 94
      indic2 = 4
      indic3 = 4
      indic4 = 2
      indic5 = icoul1
      write(21,1004) ielem,indic1,indic5,indic2,indic5,indic3
write(21,1005) inode1,inode2,inode6,inode5
      enddo
enddo
C
      do k=1,N3-1
      j=N2-1
      do i=1,N1-1
      ielem =ielem+1
      inode1 = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
inode2 = inode1 + 1
      inode3 = inode2 + N1
      inode4 = inode3 - 1
      inode5 = inode1 + N1*N2
      inode6 = inode5 + 1
      inode7 = inode6 + N1
      inode8 = inode7 - 1
indic1 = 94
      indic2 = 4
      indic3 = 4
      indic4 = 2
      indic5 = icoul3
      write(21,1004) ielem,indic1,indic5,indic2,indic5,indic3

```

```

write(21,1005) inode3,inode4,inode8,inode7
    enddo
enddo
C
C
do k=1,N3-1
do j=1,N2-1
i=1
    ielem =ielem+1
    inode1 = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
inode2 = inode1 + 1
    inode3 = inode2 + N1
    inode4 = inode3 - 1
    inode5 = inode1 + N1*N2
    inode6 = inode5 + 1
    inode7 = inode6 + N1
    inode8 = inode7 - 1
indic1 = 94
    indic2 = 6
    indic3 = 4
    indic4 = 2
    indic5 = icoul4
    write(21,1004) ielem,indic1,indic5,indic2,indic5,indic3
write(21,1005) inode1,inode5,inode8,inode4
    enddo
enddo
C
do k=1,N3-1
do j=1,N2-1
i=N1-1
    ielem =ielem+1
    inode1 = i+(j-1)*N1+(k-1)*N1*N2
inode2 = inode1 + 1
    inode3 = inode2 + N1
    inode4 = inode3 - 1
    inode5 = inode1 + N1*N2

```

```
        inode6 = inode5 + 1
        inode7 = inode6 + N1
        inode8 = inode7 - 1
indic1 = 94
        indic2 = 7
        indic3 = 4
        indic4 = 2
        indic5 = icoul2
        write(21,1004) ielem,indic1,indic5,indic2,indic5,indic3
write(21,1005) inode6,inode2,inode3,inode7
        enddo
enddo
        indic1 = -1
        write(21,1001) indic1
        close(21)
C
1001 FORMAT(I6)
1002 FORMAT(4I10)
1003 FORMAT(3(2X,D23.16))
1004 FORMAT(6I10)
1005 FORMAT(8I10)
1006 FORMAT(4I10)
2001 FORMAT(68X,A22)
C
        return
end
```

Résumé

Dans ce travail nous présentons une contribution à la simulation numérique de l'écoulement turbulent d'un fluide newtonien incompressible dans un canal plan développé, à un Reynolds turbulent de 642, avec le code de CFD Code_Saturne, développé par EDF.

La simulation est faite via l'approche RANS en utilisant le modèle $Rij - \epsilon$ SSG pour la fermeture du système d'équations gouvernant l'écoulement. Le choix de la distance à la paroi fut le critère primordial pour la détermination du maillage optimum à l'approche RANS. Les résultats de la simulation sont présentés sous formes de champs et de graphes comparés aux ceux issus d'une simulation antérieure en approche LES et DNS.

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

في هذا العمل ، نقدم مساهمة في المحاكاة العددية للتدفق المضطرب لسائل نيوتوني غير مضغوط في قناة مستوية ، باعتماد رينولدز المضطرب يساوي 642 ، مع رمز CFD Code_Saturne ، الذي طورته EDF. تتم المحاكاة من خلال نهج النمذجة RANS باستخدام نموذج $Rij - \epsilon$ SSG لإغلاق نظام المعادلات التي تحكم التدفق. كان اختيار المسافة إلى الجدار هو المعيار الأساسي لتحديد الشبكة المثلى في نهج RANS. يتم تقديم نتائج المحاكاة في شكل حقول ورسومات بيانية مقارنة بتلك الناتجة عن محاكاة سابقة في نهج LES و DNS.

In this work we present a contribution to the numerical simulation of the turbulent flow of an incompressible Newtonian fluid in a developed planar channel, to a turbulent Reynolds of 642, with the CFD code Code_Saturne, developed by EDF.

The simulation is done via the RANS approach using the $Rij - \epsilon$ SSG model for closing the system of equations governing the flow. The choice of the distance to the wall was the paramount criterion for the determination of the optimum mesh at the RANS approach. The results of the simulation are presented in the form of fields and graphs compared to those resulting from an earlier simulation in LES and DNS approach.

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