



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique

Centre Universitaire El-wachcharissi de Tissemsilt

Institut de Sciences et de la Technologie

Département des Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme

de Master académique en

Filière : **Génie Mécanique**

Spécialité : **Installation Energétique et Turbomachines**

Présentée par : **Mansouri Fatima Zahra et Aouane Karima**

*Thème*

---

# Etude dynamique d'écoulement turbulent auteur de trois cylindres en configuration décalée

---

Dépose le, 05.11.2020

**Devant le Jury :**

KAHIL Yacine	Encadreur	M.C.B.	CU-Tissemsilt
TRARI Tayeb	Examineur	M.A.A.	CU-Tissemsilt
FERNINI Ibrahim	Président	M.C.A	CU-Tissemsilt
KOUIDER Mostafa	Examineur	M.C.B	CU-Tissemsilt

**Année universitaire : 2019-2020**

## ***Remerciements***

*Nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné  
la force d'achever ce travail.*

*Tout d'abord, nous remercions nos parents pour leur  
soutien continu*

*Nous remercions également nos encadrant, Mr. Kahil  
Yacine, dont les paroles n'ont pas rempli son droit, ainsi  
que Mr.Trari Tayeb qui ne nous a pas épargné son aide et  
ses conseils.*

*Merci aux membres du jury et à chaque enseignant qui  
nous a fait part de ses connaissances.*

## *Dédicace*

*À la pure âme de mon père, qu'Allah ait pitié de lui,*

*À ma chère mère, à qui son rêve mon succès,*

*À la famille Mansouri et la famille Triki, petits et grands,*

*À mon mari*

*A tous ceux qui m'ont appris des personnages dans cette  
vie,*

*Je n'oublierai jamais les deux voisines, les dames Zohra  
Swallmi et Fatiha charaf, mes petites sœurs Shahira et  
Sabrine pour leur aide.*

*À tous mes professeurs et collègues de l'institut des  
sciences et de technologie.*

*Mansouri Fatima Zahra.*

## *Dédicace*

*À ma mère, qui est restée debout, a grandie et a souffert,*

*À mon père qui rêvait de ce jour,*

*À toutes mes sœurs et frères qui ne m'ont pas épargné soutien et encouragement ;*

*À chaque famille Aouane de près ou de loin,*

*À tous mes professeurs et collègues de l'institut des sciences et de technologie.*

*Aouane Karima*

## Listes des figures

<b>Fig.2.1-</b> Modélisation CFD d'un jet turbulent en utilisant différentes approches.....	23
<b>Fig.3.1-</b> Processus de la CFD.....	27
<b>Fig.3.2-</b> Interface graphique de Gmsh.....	28
<b>Fig.3.3-</b> Interface graphique de code saturne.....	28
<b>Fig.3.4-</b> Identité et chemins.....	28
<b>Fig.3.5-</b> Moyennes en temps.....	29
<b>Fig.3.6-</b> Sondes /points de mesure.....	30
<b>Fig.3.7-</b> Préparation du calcul.....	30
<b>Fig.3.8-</b> Représentation des champs dans EnSight.....	31
<b>Fig.3.9-</b> Représentation des graphes.....	31
<b>Fig.4.1-</b> Domaine de calcul pour trois cylindres circulaires, XY (vue latérale) et XZ (vue de dessus).....	33
<b>Fig.4.2 -</b> Zoom des maillages (grossier, moyen, fin et très fin) dans le plan XY pour la configuration de trois cylindres.....	34
<b>Fig.4.3 -</b> Historique de la vitesse longitudinale capté par les sondes pour différents maillage.....	35
<b>Fig.4.4 -</b> Profil de vitesse moyenne longitudinale le long de la ligne médiane ( $Y/D=0$ ), pour les deux modèles de turbulence.....	36
<b>Fig.4.5 -</b> Profil de vitesse moyenne longitudinale entre les cylindres et à 1D derrière les cylindres, pour les deux modèles de turbulence.....	37
<b>Fig.4.6-</b> les distributions des coefficients de pression pour trois des cylindres avec $L/D=2$ respectivement pour notre étude autres Pouryoussefi et al.....	37
<b>Fig.4.7-</b> Différents champs de l'écoulement.....	38

## Nomenclature

$Re$	nombre de Reynolds.
$\rho_f$	masse volumique du fluide [ $kg/m^3$ ].
$U$	vitesse du fluide [ $m \cdot s^{-1}$ ].
$L$	échelle de longueur caractéristique [ $m$ ].
$\mu$	viscosité dynamique du fluide [ $Pa \cdot s^{-1}$ ].
$\eta$	échelle de Kolmogorov.
$\varepsilon$	taux d'énergie cinétique dissipée.
$K$	énergie cinétique turbulente [ $J$ ].
$C_\mu, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$	constantes du modèle $k - \varepsilon$ .
$\overline{u_i u_j}$	composantes du tenseur de Reynolds.
$\nu_t$	viscosité turbulente [ $Pa \cdot s$ ].
$\omega$	taux de dissipation spécifique.
$\bar{u}$	vitesse moyenne de fluide [ $m/s$ ].
$G_k$	production d'énergie cinétique turbulente par les gradients de vitesse moyenne.
$G_\omega$	production de $\omega$ .
	coefficients de diffusion de $k$ et $\omega$ .
$Y_k Y_\omega$	dissipations de $k$ et $\omega$ .
$F_1$	fonction de fusion.
$S$	mesure invariante de la vitesse de déformation [ $m/s$ ].
$F_2$	deuxième fonction de fusion.
$\beta^*, \alpha_1, \beta_1, \sigma_{k1}, \sigma_{\omega 1}, \beta_2, \sigma_{k2}, \sigma_{\omega 2}$	constantes du modèle $k - \omega - SST$ .
$\rho$	densité du fluide.
$\vec{v}$	vecteur vitesse ( $\vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j}$ ).
$\vec{A}$	vecteur d'aire de la surface.
$\Gamma_\phi$	coefficient de diffusion de la grandeur $\phi$ .
$\overline{C_P}$	coefficient de pression moyenne.
$\overrightarrow{grad\phi}$	gradient de $\phi$ .
$S_\phi$	terme source.
$N_{faces}$	nombre de faces du volume de contrôle.
$\Phi_f$	valeur de $\phi$ transférée par convection à travers l'interface $f$ .
$\nu_f$	flux de masse à travers l'interface $f$ .
$(\vec{v}\phi)_n$	valeur de $\vec{v}\phi$ normal à l'interface $f$ .
$V$	volume de contrôle [ $m^3$ ].
$U$	vitesse moyenne [ $m/s$ ].

$\bar{U}_x/U_0$	vitesse moyenne longitudinale
$\bar{P}$	pression moyenne[Pa].
$P_\infty$	pression initiale[Pa].
$U_0$	vitesse de l'écoulement à l'entrée[m/s].
$P/D$	espacement entre le centre des cylindres.
$L/D$	distance adimensionnelle longitudinale entre les entres des cylindres.
$L_r$	longueur de recirculation[m].

## Acronymes

PIV	Particle Image Velocity.
LES	Large Eddy Simulation.
FEM	Finite Element Method.
LIF	Laser Induced Fluorescence.
DNS	Direct Numerical Simulation.
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes equations.
EDP	Equations aux Dérivées Partielles.
MVF	Méthode des Volumes Finis.
$V_c$	Volume de Contrôle.
MFN	Mécanique des Fluides Numérique.
EDF	Electricité De France.
GUI	Graphical User Interface.
CFD	Computational Fluids Dynamics

## Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Dédicace	
Liste de figures	
Listes des les nomenclatures et d'abréviations utilisées	
Table des matières	
<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>12</b>
<b>CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART</b>	
Introduction	14
Conclusion	19
<b>CHAPITRE II : MÉTHODES NUMERIQUES ET MODELISATION DE LA TURBULENCE.</b>	
Introduction	21
2-1 Equation de Navier Stokes	21
2-1-1 Equation de continuité	21
2-1-2 Equation de quantité de mouvement	21
2-1-3 Equation d'énergie	21
2-2 La turbulence	22
2-3 Les méthodes de modélisation	22
2-3-1 Simulation directe (D.N.S.)	22
2-3-2 Simulation des grandes échelles (LES)	22
2-3-3 La modélisation RANS	23
2-4 Les modèles de turbulence	23
2-4-1 Le modèle $k-\omega$ de Wilcox	23
2-4-2 Le Modèle $k-\varepsilon$ standard (Launder&Spalding)	23
2-4-3 Modèle SST	25
2-5 Les méthodes numériques	25
2-5-1 La méthode des volumes finis	25
Conclusion	25

## **CHAPITRE III: RÉOLUTION NUMÉRIQUE**

Introduction .....	27
3-1 La CFD .....	27
3-2 Conduction d'une simulation numérique .....	27
3-2-1 Pré-processing .....	27
3-2-2 Simulation proprement dite .....	27
3-2-3 Post processing .....	27
3-3 GMSH.....	27
3-4 Présentation du code saturne .....	28
3-4-1 Procédure sous Code Saturne.....	28
Conclusion .....	31

## **CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

Introduction.....	33
4-1 Description du cas et détails des calculs.....	33
4-2 Étude de sensibilité du maillage .....	34
4-3-Coefficient de pression.....	37
Conclusion .....	38

<b>CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>40</b>
--	-----------

Résumé

Bibliographies

---

***INTRODUCTION  
GÉNÉRALE***

---

## **Introduction générale**

L'une des études les plus importantes étudiées par la mécanique des fluides est l'écoulement turbulent autour d'un cylindre ou groupes des cylindres en raison de sa présence dans de nombreux domaines du génie mécanique. C'est un problème classique de dynamique et l'écoulement turbulent est largement utilisé dans la plupart des applications pratiques de notre vie quotidienne.

Pour décrire l'écoulement turbulent, les équations de Navier-Stokes, obtenues en appliquant la deuxième loi de Newton aux fluides, et ces équations ont plusieurs formules différentes.

Avec le développement des ordinateurs modernes, les méthodes numériques ont évolué et sont maintenant utilisées pour résoudre des problèmes complexes de dynamique des fluides en un peu de temps. Ces ordinateurs peuvent être utilisés pour exécuter du code CFD qui peut facilement gérer l'ingénierie de flux complexe. Cela nous permet d'obtenir des résultats plus rapidement. La dynamique des fluides numériques (CFD) est l'un des domaines les plus émergents des sciences appliquées.

Pour ce mémoire, nous avons étudié l'écoulement autour des cylindres et avons expliqué les phénomènes physiques qui se produisent.

Nous avons commencé notre travail par une introduction générale sur le sujet, suivie de quatre chapitres où le premier chapitre parle de la recherche bibliographique qui se rapporte à l'écoulement autour des cylindres et le deuxième chapitre donne des formulations mathématiques en suite la résolution numérique dans le troisième chapitre ; Enfin, une conclusion générale regroupent les résultats de notre travail est donnée.

---

***CHAPITRE I***

***ÉTAT DE L'ART***

---

## CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

### Introduction

L'écoulement autour d'un cylindre circulaire est un problème fondamental de la mécanique des fluides, il occupe une place importante dans la physique des fluides, on présente dans ce chapitre une synthèse bibliographique qui comporte plusieurs travaux effectués dans ce domaine.

**Ming Li (1997) [1]** A effectué une expérience pour étudier l'instabilité de fluide élastique dans plusieurs extensions de réseaux de tubes d'échangeur de chaleur. Dans cette étude, un banc d'essai de plusieurs réseaux de tubes est spécialement conçu pour étudier les effets de l'admission en flux partiel. Les expériences montrent que l'énergie du fluide est additive sur la durée, quelle que soit la forme du mode de tube. Des pics de réponse ont été observés jusqu'à la fin d'instabilité de fluide élastique. En analysant les nombres de Strouhal correspondants, il a été constaté qu'il existe des mécanismes de vortex et d'instabilité secondaire. Ces deux phénomènes différents peuvent interagir et se renforce mutuellement. Par conséquent, un déplacement de grande amplitude peut être atteint avant même l'instabilité fluide élastique ultime, dans cet expérience il y a d'accord entre la théorie et les données expérimentales.

**D. Sumner et al (1998) [2]** Ont mené une étude l'identification du schéma d'écoulement pour deux cylindres circulaires à flux transversal. Ils ont fait l'étude d'écoulement autour de deux cylindres circulaires de même diamètre disposés en configuration décalée, en utilisant la visualisation de l'écoulement et en mesurant la vitesse des particules pour le rapport d'espacement  $P/D = 1.0$  à  $5.0$  et l'angle d'incidence de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ . L'expérience est réalisée a nombre de Reynolds de  $Re = 850$ . Neuf schémas d'écoulement ont été sélectionnés, les processus de rattachement de la couche de cisaillement, séparation induite, appariement et synchronisation de vortex. L'étude a révélé que les fréquences de perte de tourbillon sont plus correctement associées aux couches de cisaillement individuel qu'avec des cylindres individuels plus précisément. Les deux couches de cisaillement des cylindres en aval perdent souvent des tourbillons à différentes fréquences.

**Gustavo R.S.Assi (2009) [3]** A étudié les mécanismes de vibration induite par le débit des corps interférents. A partir des expériences, une réponse (WIV : *wake-induced vibrations*) typique est caractérisée par une accumulation d'amplitude persistante à des vitesses réduites élevées, le WIV du cylindre en aval est excité par l'instabilité d'interactions vortex-structure entre le corps et le sillage en amont. Il ne sera pas excité lorsque les tourbillons instables sont supprimés du sillage du corps en amont, tandis que les interactions instationnaires à structure vortex fournissent le rapport d'énergie pour soutenir WIV. C'est l'effet de la stabilité du sillage qui définit le caractère de la réponse. La suppression des débits et (VIV : *vortex-induced vibrations*) en ligne, avec des coefficients de traînée résultants moins que celle d'un cylindre plat statique, est obtenue à l'aide de plaques de contrôle bidimensionnelles libre de tourner autour du corps. Les appareils concernés sur

des plaques parallèles présentent un grand potentiel pour supprimer (VIV) et (WIV) des structures à terre avec une réduction considérable de la traînée.

**Gh. Pouryoussefi et al. (2009) [4]** Ont étudié expérimentalement les coefficients de force pour des groupes de trois et quatre cylindres circulaires soumis à un écoulement transversal. Les expériences ont été faites dans le département de génie aérospatial, d'après l'expérience l'écoulement entre trois cylindres circulaires de même diamètre, dans un arrangement équilatéral-triangular et entre quatre cylindres circulaires dans un arrangement carré, lorsque il est soumis à un écoulement transversal, il s'est avéré dans les expériences en soufflerie pour mesurer les coefficients de force pour six rapports d'espacements ( $l/d$ ) variant de 1.5 à 4 à un nombre de Reynolds sous-critique de  $6.08 \times 10^4$ , les distributions de pression sur la surface des cylindres à mesurée à l'aide de transducteurs de pression. Il a été détecté à  $L/d > 2$  pour trois cylindres, le cylindre amont subit un coefficient de traînée moyen inférieur aux cylindres en aval.

De plus, les valeurs minimales du coefficient de traînée des cylindres en aval se produisent à  $l/d=1.5$  et  $l/d = 2$ . En outre, il a été révélé que pour quatre cylindres à  $l/d = 1.5$ , en raison de graves interférences de débit entre vérins, il existe une différence entre les coefficients de portance des vérins amont. De plus, pour  $l/d > 2$ , la moyenne des coefficients de traînée pour les cylindres en aval sont négatifs.

En outre, il a été conclu que les variations de affecte fortement les coefficients aérodynamiques. De plus, en diminuant  $l/d$ , les effets de l'interférence d'écoulement entre les cylindres augmentent.

**M. Mashud et al. (2011)[5]** Ont mené une étude expérimentale sur la réduction de la force de traînée d'un cylindre circulaire. En 1923, Harrison a obtenu plusieurs expériences à différents moments pour réduire la force de traînée, car la traînée entraîne une consommation d'énergie élevée et également une défaillance structurelle de l'objet. La réduction de la force de traînée du cylindre circulaire en attachant des anneaux circulaires est décrite dans cette expérience. Les modèles sont testés dans une soufflerie subsonique de  $36 \times 36 \times 100$  cm. Des mesures de traînée sont effectuées en utilisant un solde extérieur, il fait des tests d'installation des anneaux sur des cylindres circulaires des diamètres différents, sachant que la force de traînée est réduite si la projection de la surface augmente car les anneaux causent d'écoulement supérieur au cas des cylindres ordinaires. La valeur optimale de la réduction de traînée est trouvée lorsque l'anneau est de  $1.3 d$  et le rapport d'aspect du cylindre est d'environ 12. Les résultats expérimentaux montrent une traînée réduite, la configuration optimale est de 25%.

**I. Afghan et al. (2011) [6]** Ont étudié la simulation de tourbillon de l'écoulement autour d'un seul et des cylindres deux côte à côte aux nombres de Reynolds sous-critiques et en utilisant la simulation dynamique des grands échelles (LES); sachant que le nombre de Reynolds est de 3900 pour un cylindre. L'étude complète de la sensibilité a été réalisée en fonction de la longueur

d'extrusion dans le sens de l'envergure, du raffinement de la grille à la paroi, le schéma de convection et le modèle d'échelle de sous-réseau (SGS). Il s'avère que la solution moyenne n'est pas influencée par la longueur d'extrusion au-delà de 4 diamètres (D). Il y a eu des effets significatifs sur le champ de vitesse primaire à cause de l'élargissement de la grille dans la direction normale à la paroi. Les deux cylindres cote à cote ont été testés, le nombre de Reynolds est de 3000, et le rapport entre le pas et les diamètres  $T/D=1$  ;  $1.25 \leq T/D \leq 5$ , plusieurs fréquences de lâché ont été détectées avec une déviation de l'écoulement de sillage qui est biaisée, c'est avérée être bistable donc Il existe une compatibilité avec les mesures expérimentales. Pour les cas de rapport de pas plus élevé ( $T/D = 2$ ), le sillage est symétrique.

**S.Gh.Pouryoussefi et al. (2011) [7]** Ont effectué une étude sur le coefficient de force et le nombre de Strouhal de trois cylindres circulaires soumis à un flux transversal. Les expériences ont été faites en soufflerie pour les trois cylindres circulaires de diamètres égaux dans un arrangement équilatéral-triangulaire et soumis à un flux transversal pour mesurer les coefficients de force moyenne et les nombres de Strouhal. Les expériences ont été menées à cinq nombres de Reynolds sous-critiques de  $1.26 \times 10^4$  à  $6.08 \times 10^4$ . Les distributions de pression à la surface des cylindres sont mesurées en utilisant des transducteurs de pression et des anémomètres à fil chaud. Six rapports d'espacements ont été étudiés de 1.5 à 4, Il s'est avéré que pour  $l/D > 2$ , le cylindre en amont subit un coefficient de traînée moyen inférieur par rapport aux cylindres en aval. Pour  $l/D = 2$  et  $l/D = 1.5$  les valeurs des coefficients de trainée sont minimaux car il n'y a pas de perte de tourbillon des cylindres précédents. Le coefficient de pression derrière le cylindre amont diminue lorsque  $l/d$  augment et aussi que le nombre de Strouhal augmente.

**A. V. De Paula et al. (2013) [8]** Dans cet article, les auteurs ont étudié le phénomène de stabilité autour de trois cylindres selon deux agencements triangulaires, sachant qu'il a été étudié dans une conduite d'air et un canal d'eau. L'instabilité se produit dans les écoulements sur des ensembles de corps formant un sillage à bascule caractérisé par un flux biaisée et qui change avec intervalles irréguliers, ce qui peut représenter une source supplémentaire d'instabilités dynamiques. Les résultats montrent l'écoulement autour de trois cylindres dans une disposition triangulaire de deux formes: un cylindre en amant et deux cylindres en aval, et vice versa. Il existe un écoulement bistable dans la configuration avec un cylindre en amant et deux cylindres en aval, mais aucun effet bistable n'a été détecté dans la seconde configuration, où le flux présente une fréquence distincte de lâché de tourbillons.

**V. Shinde (2015) [9]** A étudié l'instabilité de fluide élastique dans les réseaux de tubes d'échangeurs de chaleur et réduction sans modèle Galerkin des systèmes multi physiques. Quand une défaillance due à une instabilité fluide-élastique produit soudainement, c'est un risque grave dans les opérations de l'usine. Les simulations CFD sont faites pour prédire dynamiquement les seuils d'instabilité à l'aide de modélisation de la turbulence URANS et LES. La méthode de ROM

sans Galerkin est appliquée à un problème d'interaction fluide-structure, où le maillage mobile fait également partie du vecteur d'état de la solution.

**W. Yan et al. (2016) [10]** Dans cet article, les auteurs ont étudié les régions d'écoulement caractéristiques de trois cylindres circulaires statiques examinés numériquement par la méthode de Boltzmann (LBM) basée sur le temps de relaxation multiple (MRT) en utilisant la méthode de limite submergée (IBM) pour la gestion des limites solides des cylindres pour calculer l'interaction entre les liquides. Les cylindres étaient décalés, ce qui signifie qu'un cylindre était placé devant les autres cylindres dans un arrangement côte à côte. Les calculs ont été effectués avec différents rapports d'espacement  $T/D$  de 1 à 10 et un rapport d'espacement  $S/D = 3$  avec un nombre de Reynolds constant  $Re = 200$ , ce qui représente un écoulement laminaire instable typique. Ici Des expériences basées sur la visualisation de flux de fluorescence induite par laser (LIF) ont été réalisées pour vérifier la fiabilité des résultats de la simulation. Il s'avère que le rapport d'espacement  $T/D$  a un effet significatif sur les structures du sillage. Deux régions caractéristiques différentes d'écoulement constant et instable ont été observées derrière le cylindre amont. Le flux statique caractéristique se produit dans les régions de  $1 \leq T/D \leq 1.2$  et  $2.5 \leq T/D \leq 3.1$  et le flux instable caractéristique se produit dans les régions de  $1.3 \leq T/D \leq 2.4$  et  $3.2 \leq T/D \leq 10$ . Les présents résultats seront utiles pour concevoir plusieurs cellules dans l'application pratique.

**Y. Zhou et Md. M. Alam (2016) [11]** Ont étudié l'interaction du sillage de deux cylindres circulaires en confirmant que le sillage de deux cylindres est très compliqué. Cette complication est liée au rapport d'espacement et au nombre de Reynolds. On trouve une discussion en détail sur les aspects physiques à chaque régime d'écoulement, couvrant les structures d'écoulement, forces des fluides, les nombres de Strouhal, caractéristiques de transport de la chaleur et de la quantité de mouvement et effet du nombre de Reynolds.

**S.Behara et al. (2017) [12]** Ils ont étudiés les vibrations induites par le vortex de trois cylindres circulaires à un faible nombre de Reynolds car celles-ci ont été étudiées à l'aide de calculs par éléments finis. Ils ont le même diamètre et sont installés sur des supports en caoutchouc dans les directions longitudinale et transversale. Les deux cylindres sont positionnés symétriquement dans la direction d'écoulement de part et d'autre de la partie supérieure du corps à une distance de  $5D$ , et la distance verticale entre eux est  $3D$ , Après avoir effectué les simulations d'écoulement pour des nombres de Reynolds  $Re$  de 60 à 160, il est devenu clair que le cylindre source avait des modes de réponse primaire et bas et de même pour le cylindre isolé à  $Re$  bas. Quant aux deux cylindres inférieurs, la serrure est relevée, les positions primaire et supérieure sont caractérisées par des oscillations périodiques, tandis que la branche inférieure de la serrure est associée à des vibrations non périodiques.

**Z. Bao et al. (2018) [13]** Ils ont étudié l'écoulement entre trois cylindres en triangle équilatéral au nombre de Reynolds  $Re = 200$ , et l'espacement entre 1,5 et 12. Les résultats ont montré que les modèles d'écoulement et les caractéristiques de force sont le résultat des effets combinés du nombre de Reynolds, du rapport de divergence de la disposition des modèles et de l'angle d'incidence. Pour le faible rapport d'espacement de 4, le phénomène connu d'écoulement

polarisé côte à côte. Les coefficients de traînée moyens des cylindres en aval sont les mêmes que la quantité d'écoulement autour d'un seul cylindre circulaire et les effets entre les trois cylindres ont presque disparu par rapport au grand rapport d'espacement de 8.

**H. Bai et al. (2019) [14]** ont étudiés des simulations numériques bidimensionnelles à faible nombre de Reynolds  $Re = 100$  pour l'investigation du sillage proche de trois cylindres circulaires identiques qui sont disposés dans une configuration triangulaire équilatérale. L'angle d'incidence de la configuration à trois cylindres change de l'angle d'incidence  $0^\circ$  à  $60^\circ$  et le rapport d'espacement  $L/D$  de 1.25 à 7.0. Il a été observé que les structures d'écoulement dans le sillage proche de la configuration à trois cylindres, la moyenne temporelle et les forces de fluide fluctuantes sur les cylindres individuels dépendent fortement de  $(L/D, \theta)$ . La configuration à trois cylindres génère une seule allée de vortex Karman, un sillage proche dévié, ou deux ou trois allées de tourbillons dans le sillage proche, selon  $(L/D, \theta)$ . De plus, il y a une corrélation fermée entre le comportement de sillage proche et les forces fluides observées.

**Y. Kahil et al. (2019) [15]** Représenter l'étude dynamique de l'écoulement sous-critique du nombre de Reynolds autour de quatre cylindres dans une configuration carrée en utilisant LES. Modélisé numériquement à l'aide d'une simulation à grande échelle. On trouve cinq rapports d'espacement différents ( $P/D$ ) qui sont 1.25, 1.4, 1.5, 1.75 à  $Re = 3000$ . Les résultats ont montré que lorsque le rapport d'espacement est différent, la topologie d'écoulement change, en plus de la présence de phénomènes complexes tels que l'effet de l'écoulement sur Surfaces courbes avec interaction des couches autour des cylindres et phénomène d'instabilité. Un bon accord a été observé entre les résultats numériques et les données expérimentales.

**W. S. Abbasi et al. (2019)[16]** Etude de l'effet de la proximité sur les propriétés d'écoulement autour de trois cylindres carrés, en utilisant la méthode du treillis de Boltzmann. Au nombre de Reynolds, il est de 200 et l'espacement varie continuellement de 0,5 à 16 cylindres de diamètre. Cinq modèles d'écoulement différents sont observés à différentes valeurs d'espacement qui affectent les forces induites par l'écoulement et la fréquence de libération des vortex. Des changements brusques des caractéristiques d'écoulement de fluide se produisent à la valeur de divergence de 2 et les paramètres d'écoulement du premier cylindre sont plus proches des valeurs de cylindre unique, mais pour le milieu et le troisième cylindre, les différences confirment l'effet de l'interférence de stimulation même à de grandes valeurs d'espacement.

**Y. Maaza et W. Nachet abdel (2019) [17]** Ont étudié l'effet de la variation du niveau de turbulence sur le transfert de chaleur pour une rangée de tubes en lignes où ils ont étudié numériquement l'écoulement turbulent à travers trois cylindres en tandem de types différents (lisse, ailette et rainure) avec une différence de pas de pente transversale  $P$ ,  $T$  et de diamètre de cylindre

$D = 38$  mm, les faisceaux de tubes sont les dispositifs largement utilisés dans l'industrie. Ils présentent une simulation numérique d'écoulement turbulent à travers trois cylindres à l'aide du

code informatique ANSYS. Il est obtenu en appliquant le modèle de turbulent k- $\epsilon$ . Lors de la comparaison des coefficients de trainée pour différentes configurations, il s'avère que la formation des nageoires donne de bons résultats par rapport aux autres formations.

**W. Chen et al. (2020) [18]** Ont réalisé une simulation numérique de l'écoulement à travers trois cylindres circulaires dans des arrangements équilatéraux triangulaires, en utilisant la méthode des limites immergées. Le rapport d'espacement  $L/D = 1.0 - 6.0$  et le nombre de Reynolds  $R_e = 50-300$ , les structures d'écoulement sont tridimensionnels. La dynamique des fluides impliquée est très sensible à la fois au  $R_e$  et à  $L/D$ . La traînée et la portance moyennes dans le temps de chaque cylindre sont plus sensibles à  $L/D$  qu'à  $R_e$ . La tridimensionnalité de l'écoulement affecte le développement des modèles de sillage, modifiant les plages  $L/D$  des différentes structures. Un diagramme des régimes d'écoulement, ainsi que les contours des forces hydrodynamiques, dans l'espace  $R_e-L/D$  est donné, fournissant des informations physiques dans les interactions complexes des trois cylindres.

#### **Conclusion :**

Dans ce chapitre ont a présenté les études que certains chercheurs ont réalisé concernant l'écoulement autour d'un cylindre ou d'un groupe de cylindres. Cela nous aide à réfléchir à notre sujet et à localiser le problème.

---

***CHAPITRE II***  
***MÉTHODES***  
***NUMÉRIQUES ET***  
***MODÉLISATION DE***  
***LATURBULENCE***

---

## CHAPITRE II : MÉTHODES NUMÉRIQUES ET MODÉLISATION DE LA TURBULENCE

### Introduction

Le phénomène de turbulence se retrouve dans la plupart des écoulements «naturels» qui sont observés quotidiennement et sont très divers : fluides biologiques, mouvements de fluides géographiques et mouvements de fluides stellaires (circulation de gaz autour des planètes). Comme ces écoulements ont des caractéristiques communes, nous considérons les équations qui régissent le mouvement des fluides instantanés, appelés équations de Navier-Stokes, sont connus depuis longtemps, mais leur solution est encore très complexe.

### 2-1 Equations de Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non-linéaires qui décrivent le mouvement des fluides dans l'approximation des milieux continus. [19]

Nous pouvons dériver l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation d'énergie comme suit. [20]

#### 2-1-1 Equation de continuité

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

#### 2-1-2 Equation de quantité de mouvement

$$\underbrace{\rho \frac{\partial U_i}{\partial X_i}}_1 + \underbrace{\rho U_i \frac{\partial U_j}{\partial X_j}}_2 = - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial X_j}}_3 - \underbrace{\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i}}_4 + \underbrace{\rho g_j}_5 \quad (2.2)$$

1: Changement local avec le temps

2: Convection

3: Force de surface

4: Échange de moment moléculaire (diffusion)

5: Force de masse

#### 2-1-3 Equation d'énergie

$$\rho C_\mu \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_\mu U_i \frac{\partial T}{\partial X_i} = -P \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} - \tau_{ij} \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \quad (2.3)$$

$\rho C_\mu \frac{\partial T}{\partial t}$  : Changement d'énergie locale avec le temps

$\rho C_\mu U_i \frac{\partial T}{\partial X_i}$  : Terme convectif  $P \frac{\partial u_i}{\partial x_i}$  : Travail sous pression

$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}$  : Flux thermique (diffusion)

$\tau_{ij} \frac{\partial U_j}{\partial x_i}$ : Transfert irréversible d'énergie mécanique en chaleur

Dans le cas d'un fluide incompressible, les équations deviennent:

-Equation de continuité

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.4)$$

-Equation de mouvement

$$\rho \frac{\partial U_i}{\partial t} + \rho U_i \frac{\partial U_j}{\partial X_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} - \mu \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_i^2} + \rho g_j \quad (2.5)$$

## 2-2 La turbulence:

C'est l'état du fluide, qu'il soit liquide ou gazeux, où la vitesse en tous points un caractère tourbillonnaire. Les tourbillons varient en taille, en emplacement et en direction de façon continue. Les écoulements turbulents ont une apparence très désorganisée, un comportement imprévisible et de nombreuses échelles spatiales et temporelles. De tels écoulements se produisent lorsque la source d'énergie cinétique qui met le fluide en mouvement est relativement intense devant les forces visqueuses que le fluide s'oppose à déplacer. Au contraire, le caractère d'un flux régulier est appelé flux laminaire. [21]

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.6)$$

Ce nombre va nous permettre de détecter l'apparition de la turbulence : plus il est élevé, plus l'inertie est importante et la viscosité faible, et plus les tourbillons pourront se développer. [22]

## 2-3 Les méthodes de modélisation

### 2-3-1 Simulation directe (D.N.S.)

La DNS utilise un réseau très précis et un pas de temps très court pour résoudre les équations de Navier-Stokes sans aucun modèle, pour cela qui est l'approche la plus puissante on ne peut aujourd'hui étudier que les écoulements simples. Donc, cette approche n'a encore aucune utilité industrielle. Elle reste réservée à la recherche et à la construction de modèles. [23]

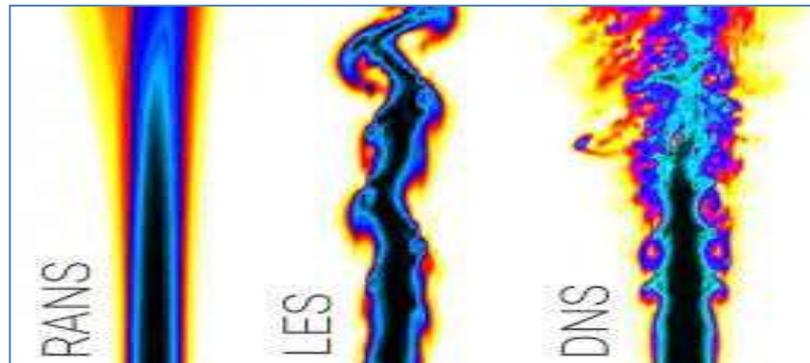
### 2-3-2 Simulation des grandes échelles (LES)

La simulation des grandes structures de la turbulence (SGS ou en anglais LES pour Large Eddy Simulation) est une méthode utilisée dans la modélisation de la turbulence qui consiste à

filtrer de petites échelles et à calculer de grandes échelles de cascade turbulente et qui permet de calculer l'écoulement turbulent à travers de grandes échelles à un coût raisonnable. [24]

### 2-3-3 La modélisation RANS

RANS ou URANS 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 instationnaire du RANS qui permet de résoudre les très grandes (lentes) fluctuations temporelles de l'écoulement. [25]



**Fig.2.1 - Modélisation CFD d'un écoulement turbulent en utilisant différentes approches [26]**

## 2-4 Les modèles de turbulence

### 2-4-1 Le modèle $k-\omega$ de Wilcox

Il y'a deux équations, équation de transfert d'énergie cinétique et une équation de transfert de propriété caractéristique de la turbulence observée, la seconde est une équation de transport pour une fréquence caractéristique de la turbulence notée  $\omega$ . Les différentes constantes du  $\omega$  modèle sont obtenues comme pour le modèle  $k-\varepsilon$  à partir des cas de base: turbulence homogène isotrope, écoulements de type couche limite avec un gradient de pression variable, favorable ou adverse. Un autre avantage de ce modèle concerne le traitement en proche paroi. Par contre, ce modèle est très sensible aux conditions aux limites à imposer sur  $\omega$  aux frontières des couches limites. [27]

### 2-4-2 Modèle $k-\varepsilon$ standard (Launder & Spalding)

Est un modèle rapide (deux équations de convection/diffusion en plus). De plus, cela simplifie des conditions aux limites et permet d'utiliser des raffinements raisonnables en paroi (maillages Hauts Reynolds). Il a des points négatifs, parmi eux, non prise en compte de l'anisotropie de l'écoulement, non prise en compte du non-alignement entre le tenseur de Reynolds et le tenseur du taux de déformation.[28]

La forme générique des modèles  $k-\varepsilon$  est :

$$\frac{Dk}{Dt} = p_{k-\varepsilon} + D + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (2.8)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = C_{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon_2} f_{\varepsilon_2} \frac{\varepsilon^2}{k} + E + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (2.9)$$

Où  $D$  et  $E$  sont les termes correctifs de paroi. La viscosité cinématique turbulente est donnée pour ces modèles par :

$$\nu_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.10)$$

Où  $f_\mu$ , comme  $f''_2$ , désigne une fonction d'amortissement destinée à prendre en compte les effets de la paroi.

Le modèle de Laundry et Sharma (1974) utilise des corrections destinées à simuler les effets d'un faible nombre de Reynolds. Les termes correctifs à la paroi sont :

$$D = 2\nu \left( \frac{\partial k^{1/2}}{\partial x_j} \right)^2 \quad (2.11)$$

$$E = 2\nu\nu_t \left( \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_k} \right)^2 \quad (2.12)$$

Qui sont destinés respectivement à reproduire le comportement en  $y_2$  et le pic de  $k$  dans la région tampon, avec :

$$f_{\varepsilon_2} = 1 - \frac{0,4}{1,8} \exp \left( - \left( \frac{k^2}{6\nu\varepsilon} \right)^2 \right) \quad (2.13)$$

$$f_\mu = 1 - \exp \left( - \frac{C_4 u_T y}{\nu} \right) \quad (2.14)$$

$$R_{e_t} = \frac{k^2}{\nu\varepsilon}, \quad C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon_1} = 1.44, \quad C_{\varepsilon_2} = 1,92, \sigma_k = 1 \text{ et } \sigma_\varepsilon = 1.3$$

Le modèle de Chien (1982) se base aussi sur le comportement asymptotique à la paroi mais repose beaucoup plus sur la distance à la paroi  $y$ . Les termes supplémentaires sont :

$$D = - \frac{2\nu k}{y^2} \quad (2.15)$$

$$f_{\varepsilon_2} = 1 - \frac{0,4}{1,8} \exp \left( - \left( \frac{k^2}{6\nu\varepsilon} \right)^2 \right) \quad (2.16)$$

$$E = -\frac{2\nu\varepsilon}{y^2} \exp\left(-\frac{C_4 u_T y}{\nu}\right) \quad (2.17)$$

$$f_\mu = 1 - \exp\left(-\frac{C_4 u_T y}{\nu}\right) \quad (2.18)$$

Avec :  $C_{\varepsilon_1} = 1.35, C_{\varepsilon_2} = 1.8, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3, C_3 = 0.0115$  et  $C_4 = 0.5$

### 2-4-3 Modèle k- $\omega$ -SST

Le modèle k- $\varepsilon$  a tendance à surestimer la viscosité turbulente, ce qui induit une difficulté à prédire des phénomènes de séparation ou de ségrégation. Si on ajoute une fonction qui limite les valeurs de la viscosité turbulente au modèle k- $\omega$  base line, on obtient le modèle de transport de contrainte de cisaillement (*Shear Stress Transport: SST*) qui est maintenant bien validé et de plus en plus utilisé. [29]

### 2-5 Les méthodes numériques

Il existe trois grandes familles de méthodes numériques : les méthodes de différences finies, de volumes finis et enfin les méthodes d'éléments finis qui contiennent en particulier les approches de type galérien discontinues. [30]

#### 2-5-1 La méthode des volumes finis

Les méthodes des volumes finis sont principalement employées pour la résolution numérique de problèmes en mécanique des fluides [31] et est une méthode pour représenter et évaluer les équations différentielles partielles sous la forme d'équations algébriques [32].

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié des équations qui contrôlent le mouvement des fluides et les phénomènes de turbulence que nous observons quotidiennement et qui ont trois modèles, pour résoudre les problèmes d'écoulement et utilisant des solutions numériques.

---

***CHAPITRE III***  
***RÉSOLUTION NUMÉRIQUE***

---

## CHAPITRE III: RÉOLUTION NUMÉRIQUE

### Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les étapes de la mécanique des fluides numérique que nous avons faites, à partir de logiciel Gmsh avec l'utilisation le code de calcul *Code\_Saturne*, terminé par le logiciel de poste traitement EnSight.

### 3-1 La mécanique des fluides numérique (CFD)

Est une méthode numérique de calcul de l'écoulement des fluides, consistant à résoudre des équations de base de la mécanique des fluides dans une géométrie donnée, et est combinée avec des équations de transfert de chaleur et de réaction chimique. [33]

### 3-2 Conduction d'une simulation numérique

#### 3-2-1 Pré processing :

-Préparation des données du problème (géométrie du domaine de calcul, génération du maillage de discrétisation, définition des phénomènes physiques et chimique du processus)

-Détermination des propriétés du fluide, spécification des conditions aux limites).

#### 3-2-2 Simulation proprement dite :

Différences finis, Eléments finis, volumes finis, méthodes spectrales.

#### 3-2-3 Post processing :

- Visualisation du domaine de calcul et du maillage, tracé des vecteurs de vitesse et des lignes de courant, contours, extractions de surfaces bien définis, manipulation des graphes (translation, Rotation, et redimensionnement), exportation des figures sous différents formats

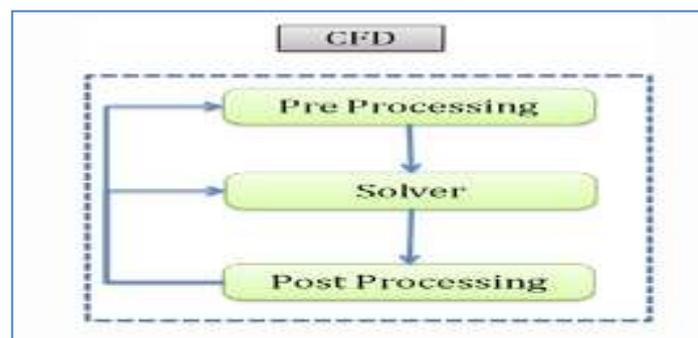


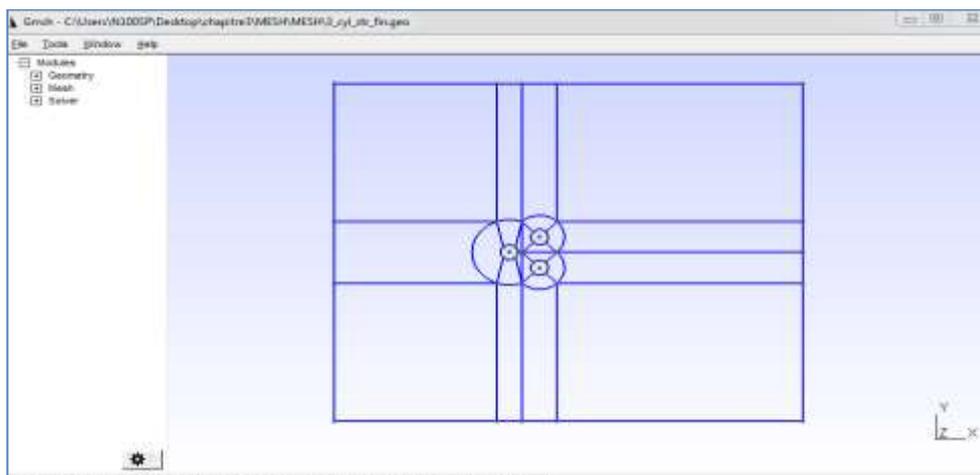
Fig.3.1-Processus de la CFD [34]

### 3-3 GMSH

Gmsh est un programme libre qui contient quatre modules:

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

GMSH dispose d'une capacité à prendre en compte des équations paramétriques simples dans son pré-traitement, et d'un système de visualisation efficace dans son mécanisme de post-traitement [35]



**Fig.3.2-Interface graphique de Gmsh.**

### 3-4 Présentation de Code Saturne

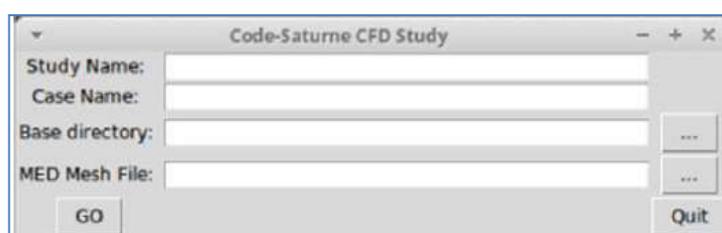
-Code Saturne est un logiciel de simulation numérique, est un programme mis à disposition gratuitement. Il peut être utilisé avec les systèmes d'exploitation Windows ou Linux.

-Il s'agit d'un système de résolution d'équations de Navier-Stokes pour 2D (axe symétrique ou non), tridimensionnel, fixe ou non statique, laminaire ou turbulent, incompressible ou compressible, isotherme ou non, et la capacité à prendre en compte également les volumes. De sa volatilité potentielle, est basé sur une approche de volumes finis localisés, qui peut prendre en compte des réseaux de toutes natures. [36]



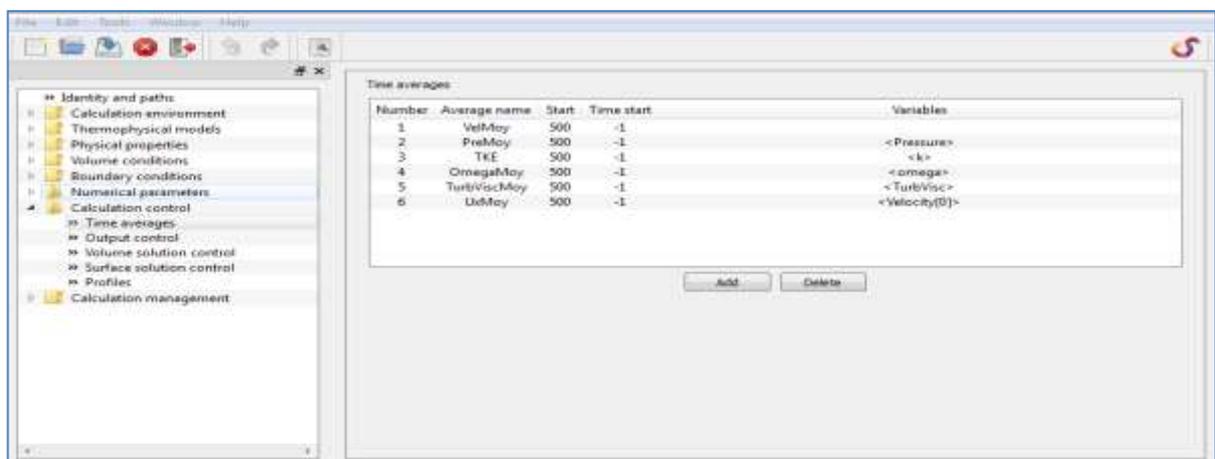
**Fig.3.3-Interface graphique de code saturne**

#### 3-4-1 Procédure sous Code Saturne



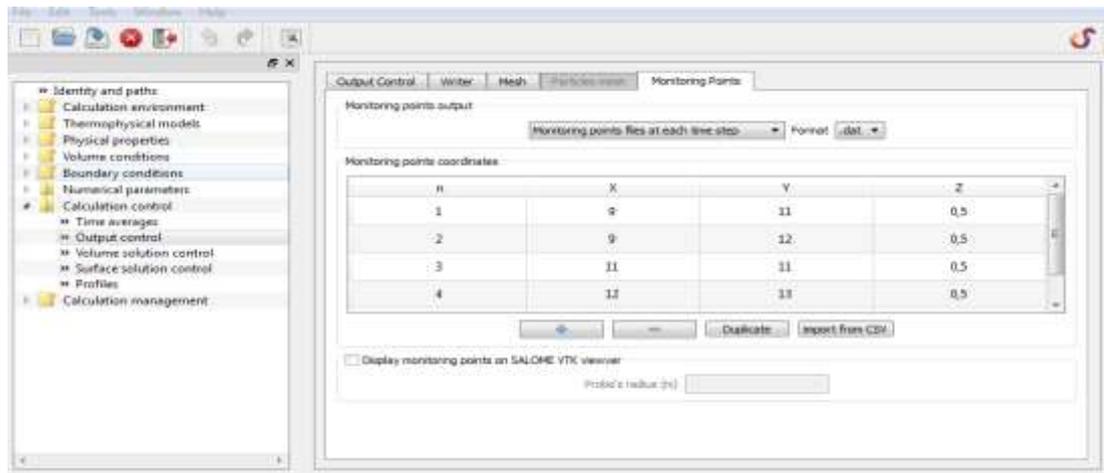
**Fig.3.4-Identité et chemins**

- On lance la procédure de vérification du maillage, "check mesh", dans l'onglet « *Calculationenvironment* » afin de valider celui-ci.
- Ensuite, On prend « *Thermophysicalmodels* » et on sélectionne le fichier « *Calculationfeatures* ». L'écoulement est bien instationnaire pour notre cas.
- Le modèle de turbulence « *Turbulence model* », on choisit « *k-omega SST* ». Les caractéristiques du fluide, « *Fluidproperties*»  $\rho=1.17862 \text{ Kg/m}^3$   
 $\mu = 1.83 * 10^{-5} \text{ Pa.s}$  et  $Re = 64400$ .
- On suit successivement les étapes suivantes : « *Boundary conditions* »  $\Rightarrow$  « *Definition of boundary conditions* »  $\Rightarrow$  « *Addfrompreprocessor* »  $\Rightarrow$  « *ng* ».
- Passer au répertoire « *Numericalparameters* » et cliquer sur « *Pseudo-Time step* ».
- On définit le pas de temps  $\Delta t = 0.05 \text{ s}$  et on impose 5000 itérations.
- Cliquer ensuite sur le fichier « *Calculation control* » et sélectionner le fichier « *Time averages* ». C'est ici que l'on va définir les paramètres à moyenner à partir d'un nombre d'itération de 2000 pour éviter les perturbations au début de développement de l'écoulement et réduire le temps de calcul.



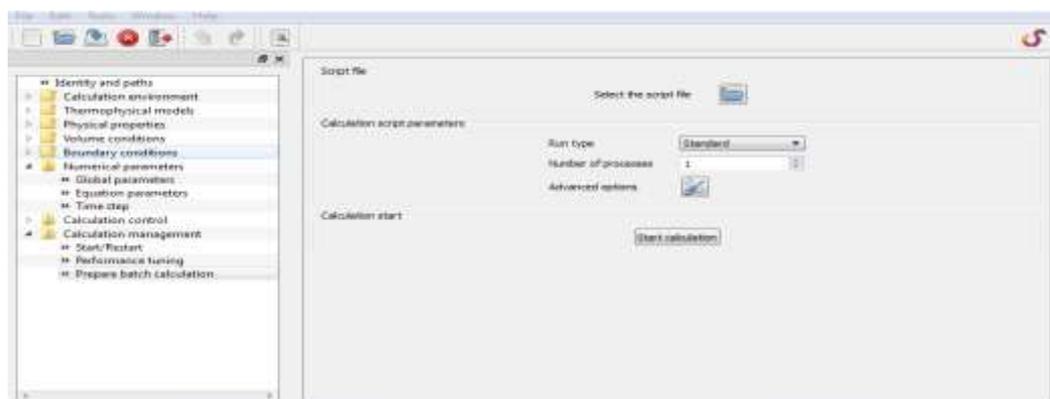
**Fig.3.5-Moyennes en temps.**

- On choisit la fréquence de mise à jour du listing, document test qui rapporte l'avancement du calcul dans « *Calculation control* »  $\Rightarrow$  « *Output control* », qui concerne le réglage des paramètres de calcul.



**Fig.3.6-Sondes / points de mesure**

- Finalement passer au répertoire « *Calculation control* » et sélectionner le fichier « *Prepare batch calculation* ». Choisir le nombre de processeurs et cliquer sur la disquette pour sauvegarder et finalement lancer le calcul.



**Fig.3.7-Préparation du calcul.**

Lorsque le calcul est terminé des répertoires de résultats sont créés dans RESU

Sont nommés par :

- Post-processing: les fichiers à visualiser avec EnSight ou ParaView.
- monitoring: contient les fichiers d'historique des variables à emplacements (sondes).
- Check point: contient les fichiers nécessaires pour redémarrer un calcul en suite.
- preprocessor.log et liste des fichiers pour le préprocesseur et exécutions du noyau.
- Copie du fichier \*.xml utilisé.

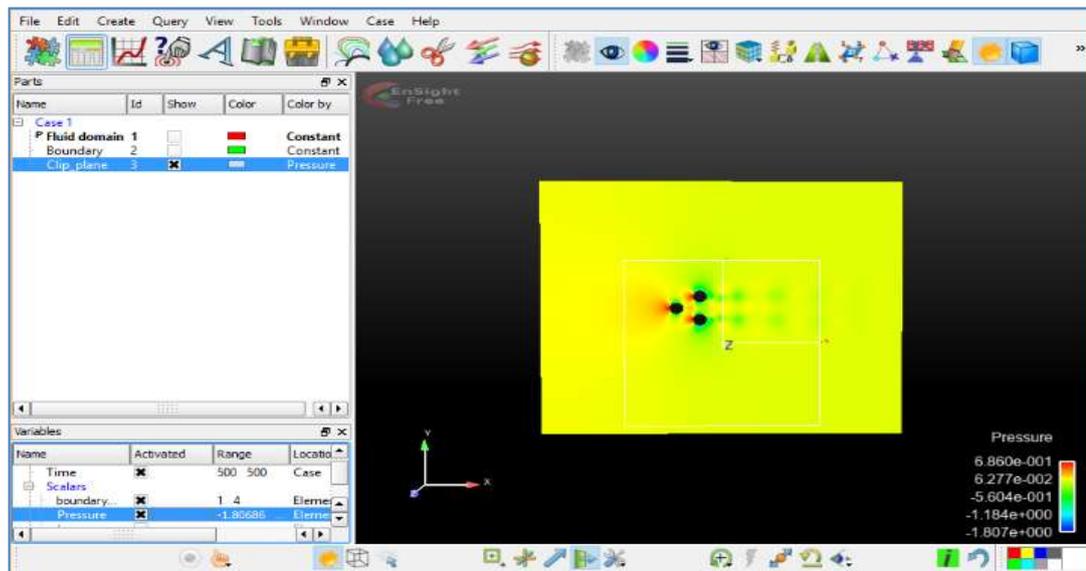


Fig.3.8- Représentation des champs dans EnSight

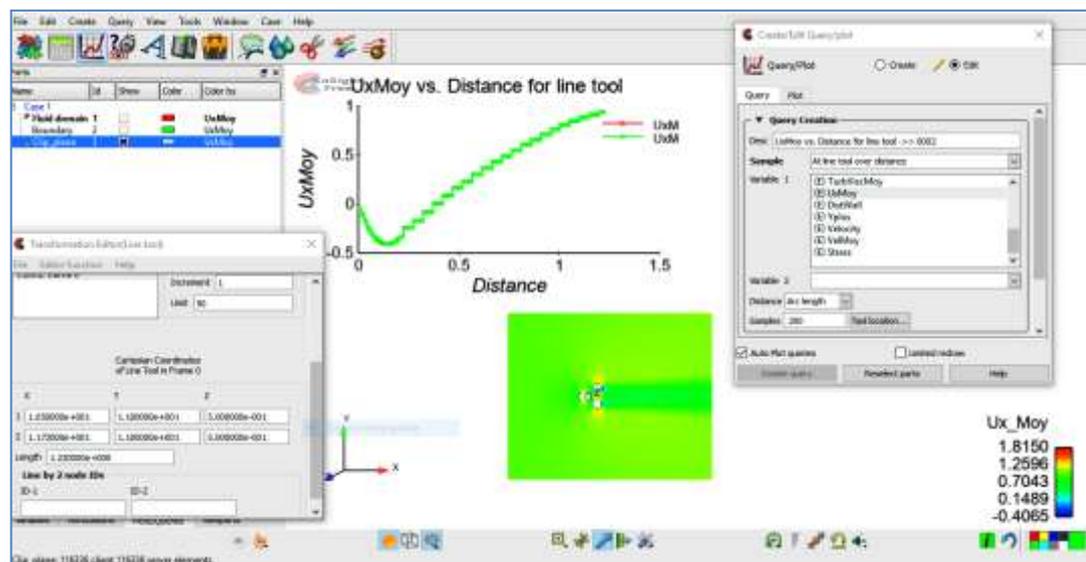


Fig.3.9- Représentation des graphes

### Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une explication des étapes d'un calcul numérique avec des captures pour la clarification car c'est important pour réaliser une simulation avec le solveur *Code\_Saturne*.

---

***CHAPITRE IV***  
***RÉSULTATS ET DISCUSSIONS***

---

## CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### Introduction

Dans ce chapitre nous allons donner une interprétation des résultats de notre cas et comparaison par quelques articles.

### 4-1 Description du cas et détails des calculs

La figure 4.1, représente la configuration de trois cylindres en configuration décalée avec un rapport d'espacement de  $L/D = 2$  (la distance entre le centre des cylindres et le diamètre). Les dimensions du domaine de calcul sont  $25D \times (20D + (P/D)) \times D$  dans la direction de l'écoulement (X), transverse (Y) et d'envergure (Z) respectivement. La longueur en amont du cylindre est  $10D$  et à l'entrée une vitesse uniforme est imposée. L'écoulement simulé en régime turbulent pour un fluide incompressible sans transfert de chaleur. L'analyse est faite pour un nombre de Reynolds  $Re = 64405,64$

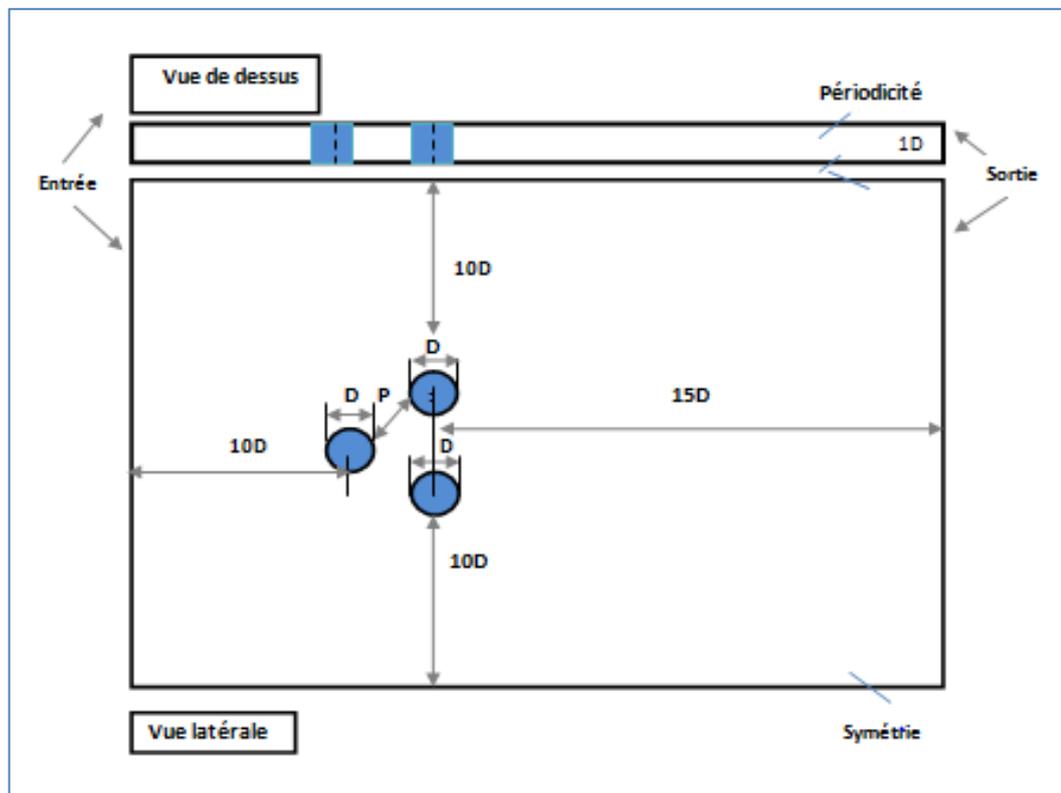
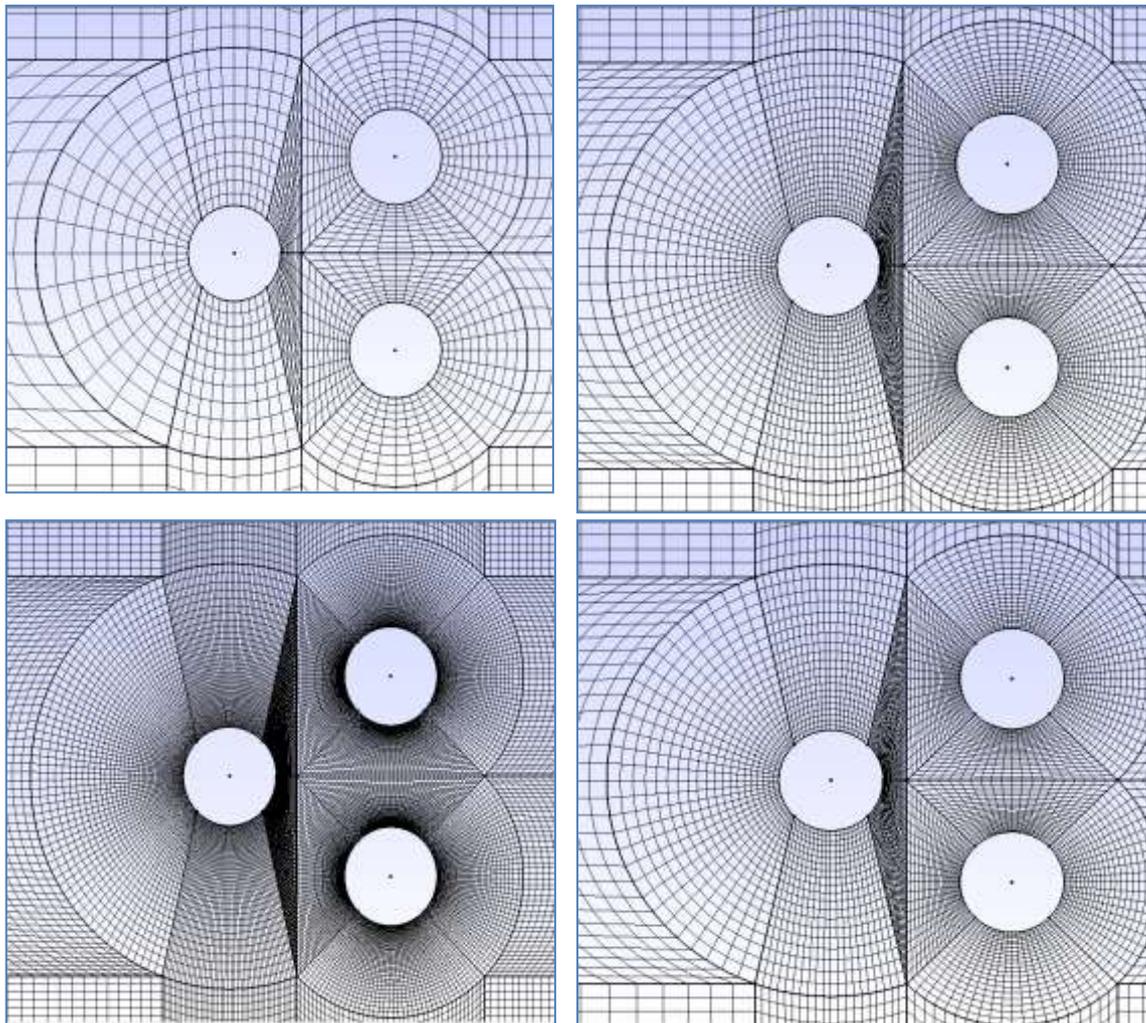


Fig.4.1- Domaine de calcul pour trois cylindres circulaires, XY (vue latérale) et XZ (vue de dessus).

#### 4-2 Étude de sensibilité du maillage

La figure 4.2 représente les maillages de la configuration des trois cylindres dans le plan  $XY$ , avec différents raffinements (grossier, moyen, fin et très fin).

Pour bien adapter notre maillage afin d'avoir des résultats proche des études expérimentales, on a réalisé une étude de sensibilité de maillage. Cette étude consiste à comparer les résultats de calcul des différents maillages pour en choisir le meilleur.



**Fig.4.2 -Zoom des maillages (grossier, moyen, fin et très fin) dans le plan  $XY$  pour la configuration de trois cylindres.**

La figure 4.3 présente l'historique de la vitesse longitudinale (Vitesse[X]), capté par les sondes. Cela est utile pour montrer que notre écoulement est pleinement développé et que les moyennes en temps sont bien faites loin des instabilités au début des calculs.

**Remarque :**

En simulation on peut ajouter des sondes (probes) pour capter les différentes quantités de notre écoulement.

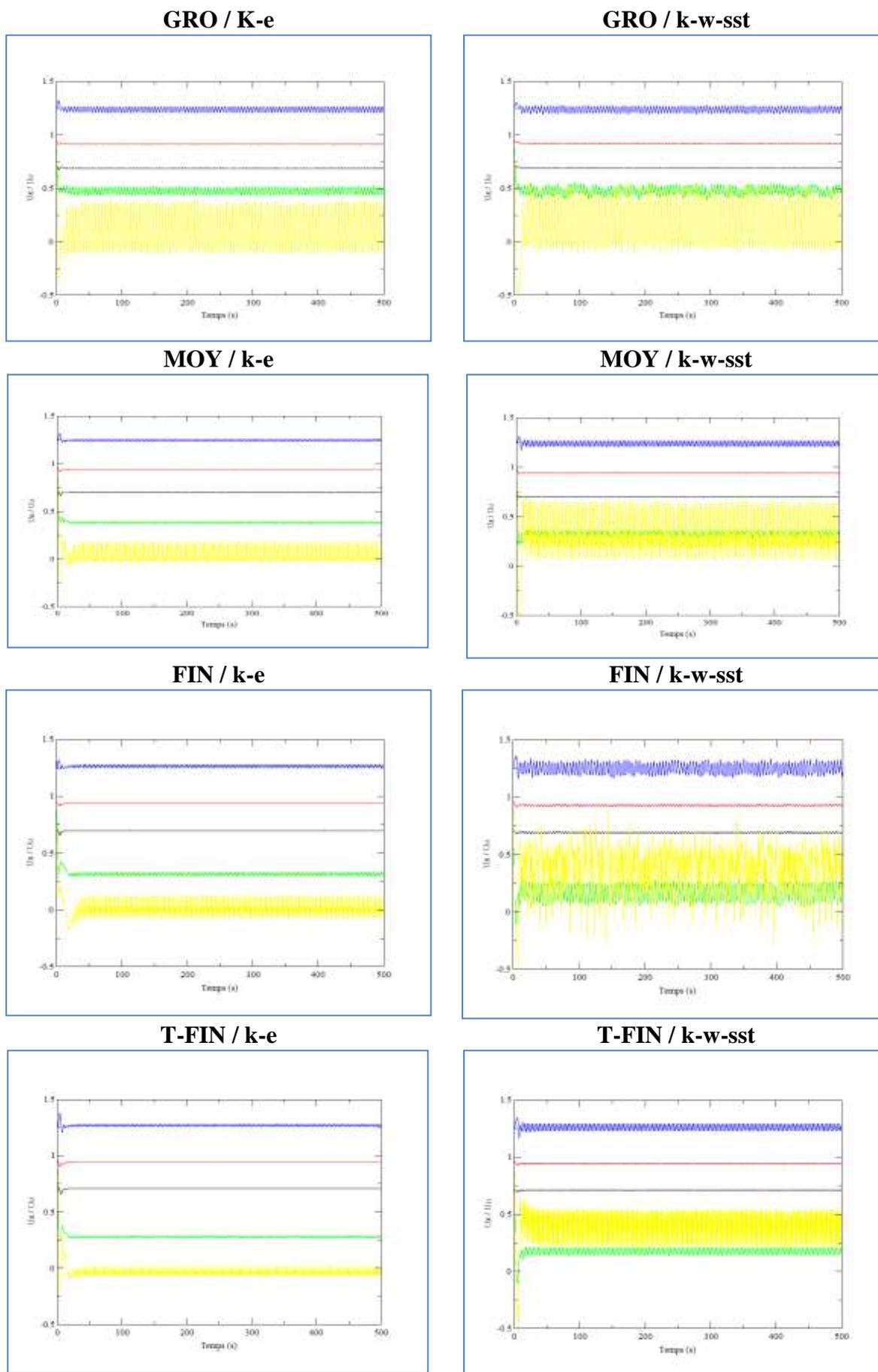
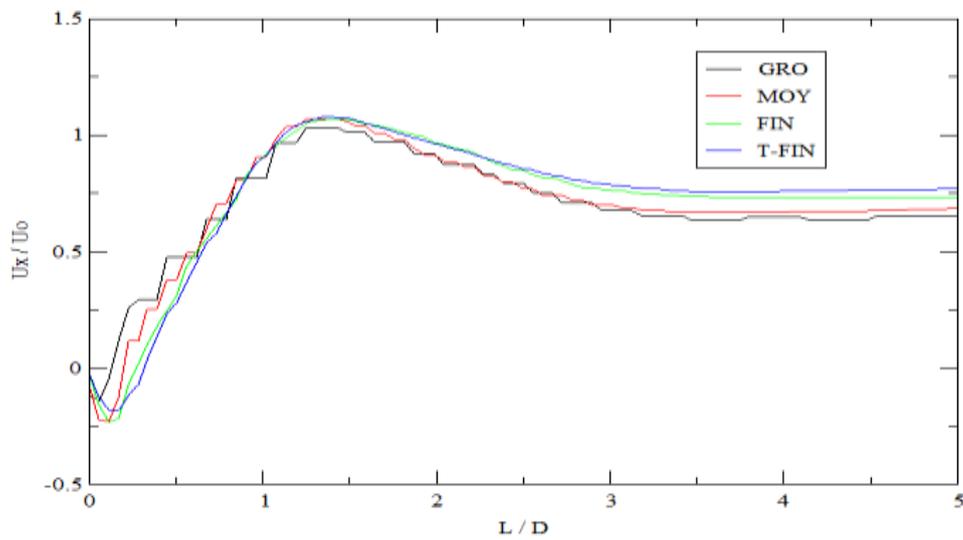
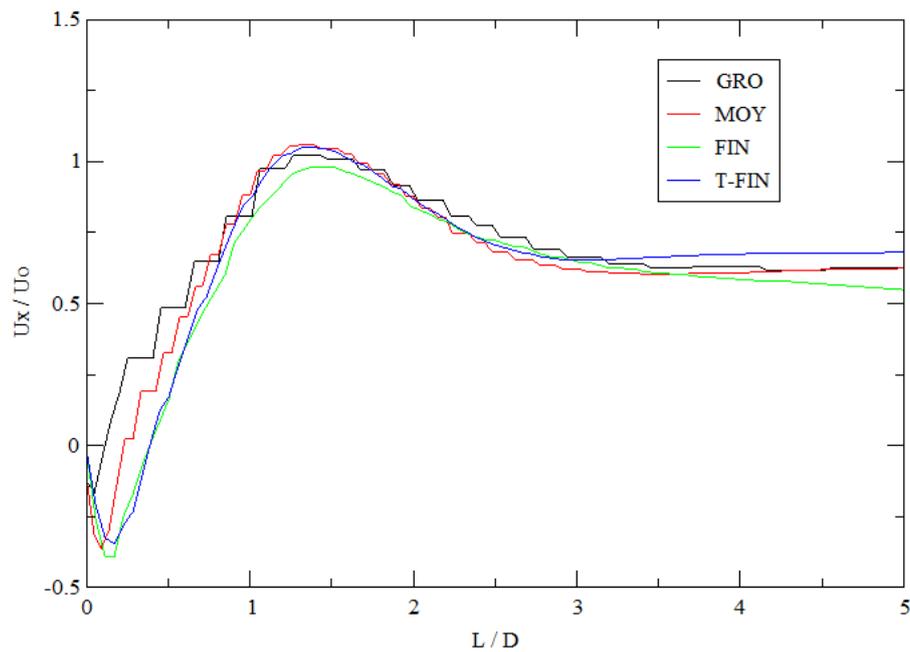


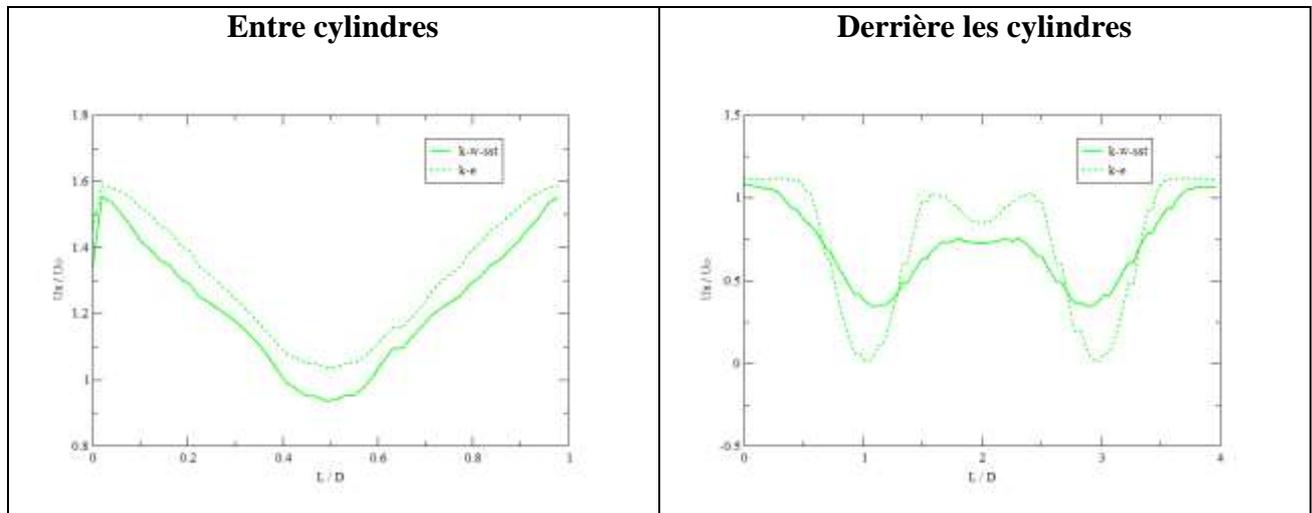
Fig.4.3 - Historique de la vitesse longitudinale capté par les sondes pour différents maillages

**k-e****k-w-sst**

**Fig.4.4 - Profil de vitesse moyenne longitudinale le long de la ligne médiane ( $Y/D=0$ ), pour les deux modèles de turbulence.**

Dans la figure 4.4 on présente une comparaison des profils de vitesse moyenne longitudinale le long de la ligne médiane ( $Y/D = 0$ ) de nos résultats. Le premier regroupe les

résultats obtenu avec le modèle  $k-\varepsilon$ , tandis que le deuxième concerne les résultats du modèle  $k-\omega$ -sst. D'après les graphs, on observe qu'il n'y a pas de grand changement dans le profil de vitesse pour les cas (FIN et T-FIN). Pour le cas (GRO), le profil de vitesse est complètement différent du reste des cas.

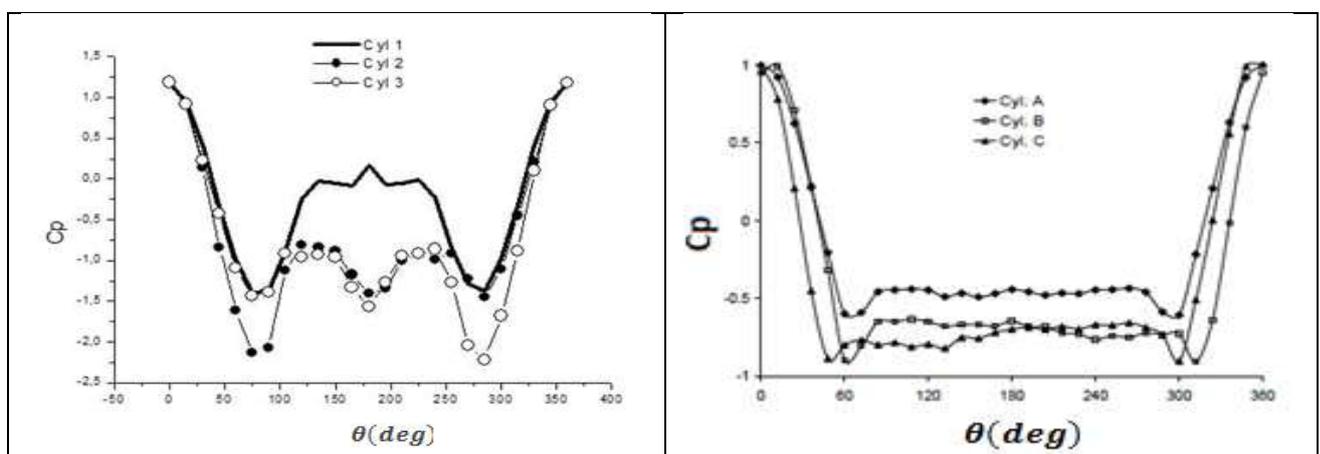


**Fig.4.5 - Profil de vitesse moyenne longitudinale entre les cylindres et à 1D derrière les cylindres, pour les deux modèles de turbulence.**

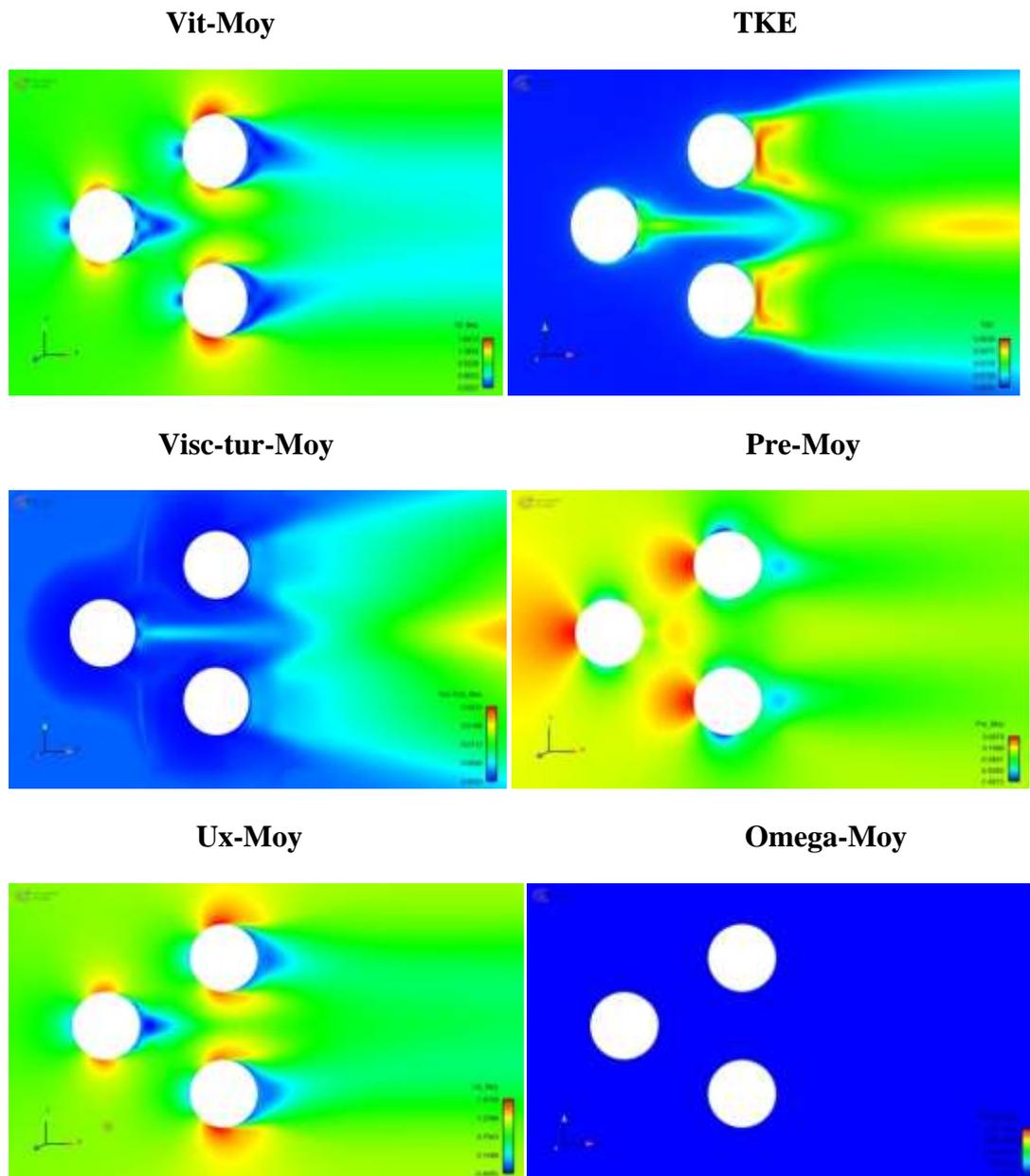
#### 4-3-Coefficient de pression

$$C_p = (P - P_\infty) / 0.5\rho V^2$$

La figure **Fig.4.6** on présente une comparaison des résultats des coefficients de pression moyenne des trois cylindres pour la configuration  $L/D=2$ , avec ente l'étude expérimentale [4]. Les deux courbes ne sont pas identiques. En plus la première figure est de mauvaise qualité et elle n'appartient pas au présent travail.



**Fig.4.6-les distributions des coefficients de pression pour trois des cylindres avec  $L/D=2$  respectivement pour notre étude autres Pouryoussefi et al [4].**



**Fig. Différents champs de l'écoulement**

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats numériques de l'écoulement autour de trois cylindres en les comparant avec les résultats disponibles.

---

***CONCLUSION GÉNÉRALE  
ET PERSPECTIVES***

---

## **Conclusion générale**

Dans ce travail nous avons réalisé une étude numérique d'écoulements turbulents autour de trois cylindres. L'objectif de ce travail est de connaître le comportement de ces écoulements et d'essayer d'expliquer les phénomènes physiques qui apparaissent dans ces configurations.

Pour notre étude on a utilisé la méthode RANS qui consiste à moyenner les équations Navier-Stokes, cela nous permet d'obtenir les différents champs instantanés et moyennés de l'écoulement. On a utilisé le code de calcul Code-Saturne et les deux modèles de turbulence, à savoir  $k-\varepsilon$  et  $k-\omega$ -SST pour réaliser cette étude.

D'après les résultats obtenus par la présente étude (RANS), on a remarqué que les champs de vitesses et des pressions montrent le même comportement déjà discuté dans la littérature.

Enfin, nous avons comparé des coefficients de pression pour notre cas avec une autre étude.

## Résumé

Le but principal de cette étude est de connaître le comportement d'écoulement turbulent et d'essayer d'expliquer les phénomènes physiques qui apparaissent dans le cas de configuration décalée des trois des cylindres, sachant qu'un le rapport d'espacement entre les centres des cylindres  $P/D = 2$  et le un nombre de Reynolds est 64405,64. On a utilisé le code de calcul Code-Saturne et la méthode RANS avec les modèles de turbulent savoir  $k-\epsilon$  et  $K-\omega$ -SST, avec différents raffinements (grossier, moyen, fin et très fin) pour les maillages, ainsi qu'il existe pas grand différence pour les profils des vitesses dans le cas fin et très fin et différent pour les autres cas. Il s'avère que les moyennes de temps sont bien effectuées loin de l'instabilité au début des calculs dans le flux.

**Mots clés:** trois cylindres, écoulement turbulent, RANS, Instabilité, nombre de Reynolds.

## **Abstract**

The main goal of this study is to know the behavior of turbulent flow and to try to explain the physical phenomena which appear in the case of offset configuration of the three of the cylinders, knowing that the spacing ratio between the centers of the cylinders  $P/D = 2$  and the a Reynolds number is 64405.64. We used the Code-Saturne calculation code and the RANS method with the turbulent models, namely  $k-\varepsilon$  and  $K-\omega$ -SST, with different refinements (coarse, medium, fine and very fine) for the meshes, as well as exists not much difference for the speed profiles in the fine and very fine case and different for the other cases. It turns out that the time averages are done well away from the instability at the start of the calculations in the flow.

**Keywords:** three cylinders, turbulent flow, RANS, Instability, Reynolds number.

## الملخص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو معرفة سلوك التدفق المضطرب ومحاولة شرح الظواهر الفيزيائية التي تظهر في حالة تكوين الاوفست للأسطوانات الثلاثة ، مع العلم أن نسبة التباعد بين مراكز الاسطوانات  $L/D$  = 2 ورقم رينولدز هو 64405.64. استخدمنا كود الحساب Code-Saturne وطريقة RANS مع النماذج المضطربة ، أي  $k-\epsilon$  و  $K-\omega$ -SST ، مع تحسينات مختلفة (خشن ، متوسط ، دقيق ودقيق جداً) للشبكات ، وكذلك موجودة لا يوجد فرق كبير في ملفات تعريف السرعة في الحالة الدقيقة والرائعة جداً ومختلفة عن الحالات الأخرى. اتضح أن متوسطات الوقت تتم بشكل جيد بعيداً عن عدم الاستقرار في بداية الحسابات في التدفق.

الكلمات المفتاحية: ثلاث اسطوانات ، تدفق مضطرب ، RANS ، عدم استقرار ، رقم رينولدز.

## Bibliographies

- [1] Ming Li, 1997. An experimental and theoretical study of fluid elastic instability in cross flow Multi-span heat exchanger tube arrays. Thesis, McMaster University.
- [2] Samner, D., Price, J. S., Paidousis, M. P., 2000. Flow-pattern identification for two staggered circular cylinders in cross-flow. *J. Fluid Mech.* (2000), vol. 411, pp. 263-303.
- [3] Gustavo R. S. Assi, 2009. Mechanisms for flow-induced vibration of interfering bluff bodies. Thesis, Department of Aeronautics, Imperial College London.
- [4] Pouryoussefi, Gh., Mirzaei, M., Ardekani, M. A., 2009. Experimental Investigation of Force Coefficients for Groups of Three and Four Circular Cylinders Subjected to a Cross-flow. *Mech. & Aerospace Eng. J. (Fluids & Aerodynamics)*, Vol. 5, No. 1, Spring 2009, pp. 87-95.
- [5] Mashud, M., Al-Bari, A., Kader, Md. G., 2011. Experimental investigation of drag force reduction mechanism for flow around a circular cylinder. *International Journal of Engineering & Applied Sciences (IJEAS)* Vol.3, Issue 2(2011)69-75
- [6] Afghan, I., Kahil, Y., Benhamadouche, S., Sagaut, P., 2011. Large eddy simulation of the flow around single and two side-by-side cylinders at subcritical Reynolds numbers. *PHYSICS OF FLUIDS* 23, 075101 (2011).
- [7] Pouryoussefi, S. Gh., Mirzaei, M., Pouryoussefi, S. M-H., 2011. Force coefficients and Strouhal numbers of three circular cylinders subjected to a cross-flow. *Arch Appl Mech* (2011) 81:1725–1741.
- [8] De Paula, A. V., Endres, L. A. M., Moller, S. V., 2013. Experimental study of the bistability in the wake behind three cylinders in triangular arrangement. *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* (2013) 35:163–17.
- [9] Shinde, V., 2015. Fluidelastic instability in heat exchanger tube arrays and a Galerkin-free model reduction of multiphysics systems. Thesis, IMSIA, EDF-CNRS-CEA-ENSTA ParisTech UMR 9219, Mecaniques, Energetique et Procédés (MEP), Université Paris-Saclay.
- [10] Yan, W., Wu, J., Yang, S., Wang, Y., 2016. Numerical Investigation on Characteristic Flow Regions for Three Staggered Stationary Circular Cylinders. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Volume 60, November–December 2016, Pages 48-61.

- [11] Zhou, Y., Alam, Md. M., 2016. Wake of two interacting circular cylinders: A review. International Journal of Heat and Fluid Flow. Volume 62, Part B, 2016, Pages 510-537
- [12] Behara, S., Ravikanth, B., Chandra, V., 2017. Vortex-induced vibrations of three staggered circular cylinders at low Reynolds numbers. *Physics of Fluids* 29, 083606 (2017).
- [13] Bao, Z., Qin, G., He, W., Wang, Y., 2018. Spectral Element Numerical Investigation of Flow between Three Cylinders in an Equilateral-Triangular Arrangement with Different Spacing Distances. *Hindawi, Shock and Vibration*, Volume 2018, Article ID 6358949, 11 pages.
- [14] Bai, H., Lin, Y., Alam, Md. M., 2019. The near wake of three circular cylinders in an equilateral triangular arrangement at  $Re = 100$ . The 2019 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM19), Jeju Island, Korea, September 17 - 21, 2019.
- [15] Kahil, Y., Benhamadouche, S., Berrouk, A. S., Afghan, I., 2019, Simulation of subcritical-Reynolds-number flow around four cylinders in square arrangement configuration using LES. *European Journal of Mechanics / B Fluids*. 74 (2019) 111–122.
- [16] Abbasi, W. S., Islam, S. Ul., Rahman, H., 2019. Proximity effects on Characteristics of Flow around Three Inline Square Cylinders. *Hindawi, Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2019, Article ID 1752803, 14 pages.
- [17] Maaza, Y., Nachet, A. W., 2019. Effet de variation du niveau de turbulence sur le transfert de chaleur pour une rangée de tubes en lignes. PFE, Université des Sciences et de Technologies d'Oran, Mohamed Boudiaf.
- [18] Chen, W., Ji, C., Alam, Md. M., Williams, J., Xu, D., 2020. Numerical simulations of flow past three circular cylinders in equilateral-triangular arrangements. *J. Fluid Mech.* (2020), vol. 891, A14.
- [19] <https://www.techno-science.net/definition/5797.html>
- [20] TècnicaFusté, R. P., 2018. Thermal-hydraulic analysis of the ITER Electron Cyclotron Upper Launcher Antenna. *Memòria, Escala Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona*.
- [21] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Turbulence>

- [22] <https://scienceetonnante.com/2011/08/22/le-nombre-de-reynolds/>
- [23] Boudjeris, M., 2011. Calcul des performances aérodynamiques de la configuration aile-fuselage Ara M100 par maillage hybride. Mémoire, Université Saad Dahleb, Blida.
- [24] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Simulation\\_des\\_grandes\\_structures\\_de\\_la\\_turbulence](https://fr.wikipedia.org/wiki/Simulation_des_grandes_structures_de_la_turbulence).
- [25] Perron, C., Boudreau, M., Gauthier, E., Gauvin Tremblay, O., Côté, P. 2013. La turbulence en CFD : Modélisation et Simulation. LMFN, Université de Laval, Canada.
- [26] <https://www.idealsimulations.com/resources/turbulence-models-in-cfd/>
- [27] Amahjoura, N., Khamlichi, A., 2017. Analyse CFD de l'effet de modèle de turbulence sur le champ de vitesse perçu par une éolienne placée derrière un obstacle topographique. Université Abdelmalek Essaâdi, FS Tétouan.
- [28] Benhamadouche, S., 2005. Cours CFD, Rappels de Mécanique des Fluides Générale et de Turbulence. EDF, Paris Fr.
- [29] Fletcher, D. F., Xuereb, C., 2004. Mécanique des fluides numérique. Technique de l'ingénieur, Réf : J1050 v1.
- [30] Toumi, A., 2016. Méthode numérique asynchrone pour la modélisation de phénomènes multi-échelles. Thèse, Université Paul Sabatier –Toulouse Fr.
- [31] Attou, Y., 2019. Etude numérique et thermique d'un écoulement turbulent dans un espace annulaire d'un rotor stator. Thèse, Université d'Oran 2, Mohamed Ben Ahmed.
- [32] [https://en.wikipedia.org/wiki/Finite\\_volume\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Finite_volume_method).
- [33] Fletcher, D. F., Xuereb, C., 2004. Présentation de la mécanique des fluides numérique (CFD). Technique de l'ingénieur, Réf : J1050 v1.
- [34] <https://www.learncax.com/knowledge-base/blog/by-category/cfd/introduction-to-cfd-part-ii-selecting-the-domain>.
- [35] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Gmsh>.
- [36] <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/projnum/content/g22-2012/i-presentation-du-code-saturne>.