

1 Introduction

Les logiciels de simulation numérique des écoulements basés sur la méthode des volumes finis peuvent maintenant être considérés comme de véritables (*expériences numériques*), lorsqu'elles sont faites avec soin. L'avantage des (*méthodes numériques*) est que toutes les quantités physiques liées à l'écoulement (*champ de vitesse, champ de pression, contraintes etc.*), sont immédiatement disponibles en tout point de l'écoulement.

2 Les schémas de turbulence

Avant d'entamer la résolution de ces équations, nous devons identifier le régime de l'écoulement. Il est donné par la valeur du nombre de Reynolds (*nombre adimensionnel caractéristique*).

Dans le cas où le régime est turbulent, plusieurs schémas sont disponibles pour modéliser et fermer les équations précédentes :

- la simulation numérique directe (*DNS*).
- la simulation à grandes échelles (*LES*).
- la simulation statistique de la turbulence (*RANS*).

La capacité des calculateurs, la complexité de la géométrie des modèles étudiés et le degré de précision recherché sont des facteurs qui vont nous orienter vers l'une ou l'autre de ces solutions. Dans ce qui suit, nous présenterons une idée brève sur les principaux schémas de modélisation de la turbulence.

2.1 Simulation numérique directe (*DNS*)

La simulation numérique directe (*DNS*) résout directement les équations de transport. Elle donne accès à toutes les informations physiques de l'écoulement. Cependant, elle nécessite des schémas numériques d'ordres élevés ainsi qu'une résolution très fine, donc des maillages très denses. Son coût machine la prohibe pour des études de type "*industriel*".

Elle s'inscrit plutôt dans le cadre des études fondamentales sur des très petits domaines spatiotemporels.

2.2 Simulation statistique de la turbulence (*RANS*)

La modélisation statistique de la turbulence (*RANS ou Reynolds Avenage Navier- Stokes*) conduit à la détermination des valeurs moyennées de Reynolds. Les grandeurs caractérisant l'écoulement sont décrites comme la somme d'une partie moyenne et d'une partie fluctuante. Dans le cas d'un fluide incompressible et Newtonien, les équations de *Navier-Stokes* moyennées deviennent alors:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (III.1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\overline{\partial u_i' u_i'}}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (III.2)$$

Dans l'équation (III-1), il apparaît un nouveau terme $\overline{u_i' u_i'}$. Seules les valeurs moyennes sont connues. Ce terme est donc impossible à calculer et c'est sur lui que se fait la modélisation. Ce terme, multiplié par la densité est appelé contrainte de Reynolds. Il est noté R_{ij} .

La formulation d'une équation de transport pour R_{ij} va permettre la modélisation, et donc la résolution, tout en introduisant un nouveau terme caractéristique de l'écoulement : la viscosité turbulente ν_t .

Plusieurs modèles sont disponibles citons, à titre d'exemple :

- le modèle à longueur de mélange de Prandtl (1925) ;
- le modèle $k-\epsilon$ (1972) ;
- le modèle $k-\omega$.

Dans le modèle $k-\epsilon$, les termes $k = \frac{\overline{u_i u_i}}{2}$ et $\epsilon = \frac{\overline{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}$ représentent respectivement

l'énergie cinétique turbulente et le taux de dissipation de celle-ci.

Le ratio coût / précision de ces méthodes est parmi les facteurs les plus intéressantes fait que ces modèles sont très utilisés pour les applications industrielles où le compromis (*ordre de grandeur / rapidité*) est important.

2.3 Simulation à grandes échelles LES (Large Eddy Simulation)

Le calcul avec cette modélisation est basé sur une résolution directe des équations de Navier-Stokes pour les grosses structures et sur une modélisation des petites échelles dénommées alors "*sous-maille*". Le filtre est ainsi mis en place et l'action de la turbulence sous-maille conduit nécessairement à l'introduction d'une viscosité turbulente. Ainsi, la part de la modélisation dans le calcul est réduite par rapport aux méthodes RANS. D'autant plus que, les fluctuations instantanées des grandes structures sont directement prises en compte, contrairement aux méthodes précédentes où les équations sont moyennées avant d'être résolues.

Le maillage utilisé doit être suffisamment fin, donc le coût du calcul est souvent élevé et l'aspect tridimensionnel intervient encore plus dans la prédiction du résultat.

3 Les différentes étapes à suivre pour la modélisation numérique

Les principales étapes à suivre lors du travail sur le logiciel de calcul FLUENT nécessitent la connaissance de certaines notions théoriques de base. Ces notions, concernent notamment, les définitions des principales équations régissant l'écoulement.

La résolution numérique par Fluent d'une manière générale, suit les étapes suivantes :

1. Création de la géométrie sous le Logiciel GAMBIT ;
2. Choix de la stratégie de maillage et création de plusieurs grilles ;
3. Définition des conditions aux limites dans GAMBIT ;
4. Définition du problème sous le logiciel FLUENT, étude des différentes grilles de maillage et sélection du maillage retenue ;
5. Calcul avec FLUENT pour les différents cas retenus ;
6. Analyse des résultats obtenus.

4 Présentation de GAMBIT et de FLUENT

4.1 Définition d'un logiciel CFD (Computational Fluid Dynamics)

CFD est une technologie informatique qui utilise les méthodes numériques et les algorithmes pour résoudre et analyser les problèmes qui comprennent les écoulements des fluides. La base fondamentale du *CFD* est les équations de *Navier-Stokes* qui peuvent définir chaque phase de l'écoulement du fluide, leur simplification par l'élimination du terme de viscosité donne les équations d'Euler.

4.2 GAMBIT

C'est un pré processeur intégré pour l'analyse en *CFD (Computational Fluid Dynamics)*. Il est utilisé pour construire une géométrie et générer son maillage. Les options de génération de maillage de *GAMBIT* offrent une flexibilité de choix. La géométrie peut être décomposée en plusieurs parties pour générer un maillage structuré, sinon *GAMBIT* génère automatique un maillage non structure adapté au type de géométrie construite. Les défauts sont détectés à l'aide de son interface comportant plusieurs fenêtres d'outils de création, génération, vérification du maillage du modèle étudié et l'incorporation des conditions aux limites.

Dans le présent travail, *GAMBIT* offre cette possibilité de définir des obstacles cylindrique, cube et carrée, créer un volume représentant le domaine d'étude et générerons maillage.

4.2.1 Choix du maillage

Le choix du maillage est un point essentiel dans la précision et l'exactitude des résultats numériques. Pour ce faire, on doit déterminer les paramètres optimaux et choisir une stratégie de maillage qui répond à nos objectifs.

Parmi ces paramètres, on peut citer :

- le nombre de mailles ;
- la distance entre les mailles (*concentration des mailles*) ;
- la forme de la maille ;
- les paramètres de déformation pour le cas du maillage déformable.

	Description
Quad	Maille quadrilatérale.
Tri	Maille triangulaire.
Quad/Tri	maillage composé principalement des mailles quadratiques mais inclut les mailles faisant le coin triangulaire aux endroits choisis par l'utilisateur

Tableau III.1 : Différentes formes de maillage des faces

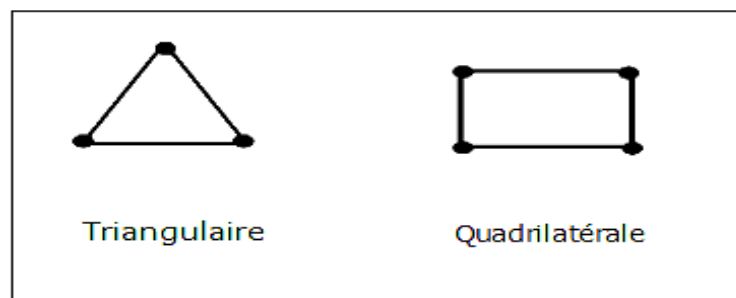
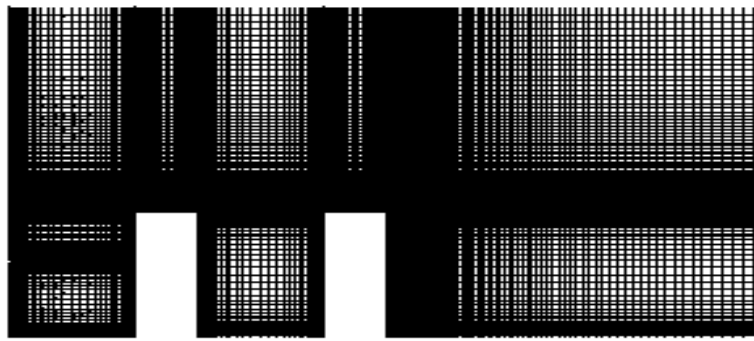


Figure III.1 : les différents maillages

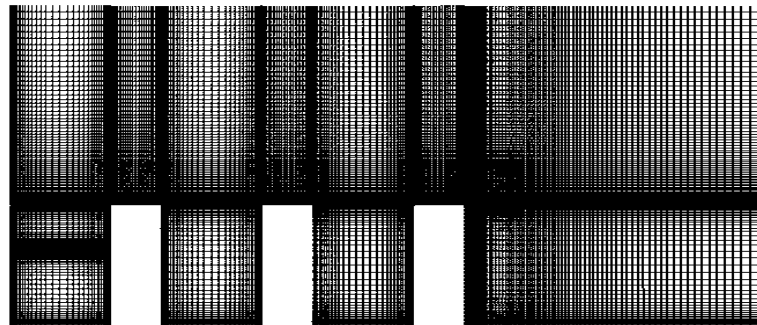
Le maillage utilisé dans ce travail est un maillage quadrilatéral, le nombre des cellules représenté dans le tableau suivant :

Nombre d'obstacles	type	Nombre des cellules
deux obstacles	quadrilatérale	27846
trois obstacles	quadrilatérale	35216

Tableau III.2 : le nombre des cellules



Deux obstacles



Trois obstacles

Figure III.2 : représentation de maillage pour **2** obstacles et **3** obstacles.

Aussi il permet de choisir le type de maillage des faces selon les options suivantes:

	Description
Map	Crée une grille régulière et structurée des éléments du maillage.
Submap	Divise une face en plusieurs régions de façon à ce qu'on puisse leur appliquer Map.
Pave C	Crée une grille non structurée des éléments du maillage.
Tri primitive	Divise une face en trois régions quadrilatérales et crée un maillage dans chaque région de la face.

Tableau III.3 : Description des types de maillages des faces.

4.3 FLUENT

FLUENT est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, qui peuvent être produites pour des géométries complexes, avec une relative facilité.

Les types de mailles supportées sont :

- des mailles en 2D, triangulaires ou quadrilatérales ;
- des mailles en 3D tétraédriques/hexaédriques/pyramidales ;
- des mailles (*hybrides*) mixtes.

FLUENT est écrit en langage de programmation C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offerte par ce langage (*ex. : allocation de la mémoire dynamique*). En outre, il utilise une architecture qui lui permet d'exécuter plusieurs processus simultanément sur le même poste de travail ou sur des postes séparés pour une exécution plus efficace.

FLUENT s'utilise à travers une interface graphique. L'utilisateur avancé peut adapter ou augmenter aux besoins l'interface en écrivant des macros et des fonctions de menu, afin d'automatiser certaines procédures.

Ainsi, à titre non exhaustif, *FLUENT* permet les capacités de modélisation suivantes:

- Écoulements 2D ou 3D
- Écoulement stationnaire ou instationnaire
- Écoulements incompressibles ou compressibles (*subsoniques, transsoniques, supersoniques ou hypersoniques*)
- Écoulements non visqueux, laminaires ou turbulents
- Fluide Newtonien ou non
- Transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection ou les deux (*conjugue*) ou radiatif
- Écoulements avec changements de phases
- Écoulements en milieu poreux.

Fluent emploie la méthode des volumes finis comme procédé de discrétisation des équations qui gouvernent l'écoulement, telle que l'équation de continuité. En utilisant cette technique basée sur l'intégration des équations sur un volume de contrôle, "*Fluent*" passe par les étapes suivantes:

- Division du domaine en volumes de contrôle discrets en utilisant une grille (*maillage*) de calcul.
- Intégration des équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels, afin de construire les équations algébriques pour les variables discrètes dépendantes, les inconnues telles que : vitesses, pressions et températures.
- Linéarisation des équations discrétisées et solution du système d'équations linéaires résultant, pour tenir compte des effets turbulents, le logiciel de calcul offre la

- possibilité de choisir un des modèles de turbulence suivants :
 - Le modèle à une équation de Spalart Allmaras
 - Le modèle à deux équations $k - \varepsilon$ standard
 - Le modèle $RNG\ k - \varepsilon$, $k - \varepsilon$ réalisable
 - Le modèle à deux équations $k - \omega$
 - LES
 - Reynolds stress model.
 - DES

Le choix entre ces modèles se base principalement sur les résultats que donne chacun des modèles suivant les conditions aux limites prédéfinies. Il est vrai qu'un modèle peut donner de meilleurs résultats par rapport à un autre, mais ceci est dû principalement à la nature des cas étudiés et à la correspondance du modèle de turbulence avec les conditions aux limites.

5 Choix des paramètres de FLUENT

5.1 Procédure sous "Fluent"

Une fois le chargement du fichier de maillage (*réalisé avec le logiciel GAMBIT*) effectué sous "*Fluent*", nous devons mettre à l'échelle la géométrie (*pour notre cas, on utilise le millimètre*).

Le logiciel "*Fluent*" permet aussi de réordonner les nœuds, les surfaces et les cellules en mémoire, de telle façon qu'ils aient la même disposition dans la grille et dans la mémoire et cela pour améliorer les performances du calcul et l'efficacité d'accès à la mémoire (*Grid\Reorder*).

5.2 Simple précision ou double précision

"*Fluent*" offre deux modes de calcul: le mode "*double précision*" et le mode "*simple précision*".

Dans le mode "*double précision*" : les nombres à virgule flottante sont représentés en utilisant 64 bits, alors que le mode "*simple précision*" : utilise une représentation à 32 bits. Le revers de cette précision est que le premier mode requiert beaucoup plus de mémoire. En outre, Le mode "*double précision*" est préconisé, pour les écoulements impliquant des longueurs d'échelles très disparates, comme dans le cas d'un canal très long et mince.

5.3 Choix de la formulation du solveur

Sous "*Fluent*", on peut choisir entre plusieurs formulations du solveur:

- La formulation "*Segregated*", ou isolée (*implicite*) : Cette formulation résout les équations de continuité, de quantité de mouvement et quand c'est nécessaire celle de l'énergie, séquentiellement, c'est-à-dire isolées les unes des autres (*implicite par défaut*). Le solveur isolé est classiquement employé pour les écoulements incompressibles à modérément compressibles.

- La formulation "*Coupled*", ou couplée (*implicite ou explicite*) : Cette option permet aux équations gouvernantes d'être résolues simultanément, c'est-à-dire couplées les unes avec les autres. Cependant, les autres scalaires, tels que les quantités de la turbulence, sont traités isolément. Initialement, ce mode a été conçu pour les écoulements compressibles à grandes vitesses. Ceci lui donne un avantage pour le traitement des écoulements hautement couplés (*forte interdépendance entre la densité, l'énergie et les moments*) avec des forces de volumes (*ex. flottabilité et forces de rotation*). Il faut signaler que le solveur couplé implicite requiert presque le double de la mémoire qu'utiliserait le solveur isolé, alors que le solveur couplé explicite vient au milieu, en terme de besoins en ressources, mais converge plus lentement que la formulation implicite et n'est conseillé que pour les écoulements instationnaire.

5.4 Schémas de discrétisation

Sous "*Fluent*", les variables stockées au centre de la cellule doivent être interpolées aux faces du volume de contrôle. Il est possible de choisir entre différents schémas de discrétisation pour les termes convectifs des équations gouvernantes, alors que les termes visqueux sont automatiquement discrétisés au second ordre pour plus de précision. Il reste que la discrétisation au premier ordre procure une meilleure convergence, alors que le "Second Order Upwind Scheme" est de rigueur pour les écoulements non alignés au maillage. Aussi, il existe d'autres schémas de discrétisation :

- Le schéma "*QUICK*" (*Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinetics*) : il procure une meilleure précision que le schéma au second ordre pour les écoulements rotationnels et tourbillonnaires (*Swirling*) avec un maillage régulier. Cependant, il ne pas recommandé par un maillage triangulaire.
- Le schéma "*Power Law*" : il est plus précis que le "*First Order Upwind Scheme*" pour les écoulements à très bas nombres de Reynolds.
- Le schéma "*third-orderMUSCL*" : il donne plus de précision que les autres schémas.

Les schémas de discrétisation utilisés dans le présent travail sont résumés comme suit :

Pression	Standard
Quantité de mouvement	QUICK
Couplage vitesse-pression	Simple
Energie cinétique turbulente	QUICK
Taux de dissipation	QUICK
Énergie	QUICK

Tableau III.4 : Les schémas de discrétisation.

5.5 Choix du schéma d'interpolation de la pression

Dans la plupart des cas, le schéma *"Standard"* est acceptable pour des écoulements spécifiques. On peut choisir parmi les options suivantes:

- Le schéma force de volume pondéré *"Body-Force-Weighted"* est recommandé pour les écoulements impliquant d'importantes forces de volume (ex. *convection naturelle à haut nombre de Rayleigh*). Ce schéma utilisé dans notre étude.
- Le schéma *"PRESTO"* (*Pressure Staggering Option*) est approprié pour les écoulements hautement tourbillonnaires à grande vitesse de rotation, ou les écoulements dans des domaines fortement courbés.

Le schéma au *"Second Ordre"* est à utiliser pour les écoulements compressibles et pour améliorer la précision en écoulements incompressibles.

- Le schéma linéaire *"Linear"* est disponible comme alternative dans le cas où les autres options ont des difficultés de convergence ou génèreraient des comportements non physiques.

5.6 Choix de la méthode de couplage Pression-Vitesse

Si les vitesses sont définies aux nœuds d'un volume de contrôle ordinaire (*comme les autres scalaires: pression, température*), il est démontré qu'un champ de pression hautement non uniforme agira comme un champ uniforme sur les équations de quantité de mouvement discrétisées. La solution passe par la définition des vitesses sur une grille décalée *"Staggered grid"* et l'emploi d'algorithmes tels que *"SIMPLE"* pour résoudre ce lien ou couplage entre la pression et la vitesse. La famille des algorithmes *"SIMPLE"* est essentiellement une procédure *"d'estimation et de correction"* pour le calcul de la pression sur la *"grille décalée"* des composantes de la vitesse.

"Fluent" propose trois méthodes pour le couplage pression-vitesse (*seulement avec la formulation "Segregated"*) :

- Les deux premières, très similaires, sont la méthode *"SIMPLE"* (*Semi-Implicit Method for a Pressure Linked Equations*) et la méthode *"SIMPLEC"* (*SIMPLE Consistent*). Cette dernière méthode se différencie de la première par le fait qu'on peut lui assigner un facteur de relaxation (*correction*) de pression proche de 1, ce qui accélère la convergence dans la plupart des cas, mais peut conduire à des instabilités de la solution. Nous avons entrepris nos simulations avec la méthode *"SIMPLE"*.
- Méthode *"PISO"* (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*): Cette méthode fait partie des algorithmes de la famille *"SIMPLE"*. Elle est recommandée pour les écoulements stationnaires ou pour les maillages contenant des cellules très obliques *"highlyskewed"*.

Après avoir choisi les différents paramètres de *FLUENT*, on passe à l'étape suivante qui est:
 * Lancement des calculs, et l'analyse et l'interprétation des résultats.

6 choix des facteurs de Sous relaxation

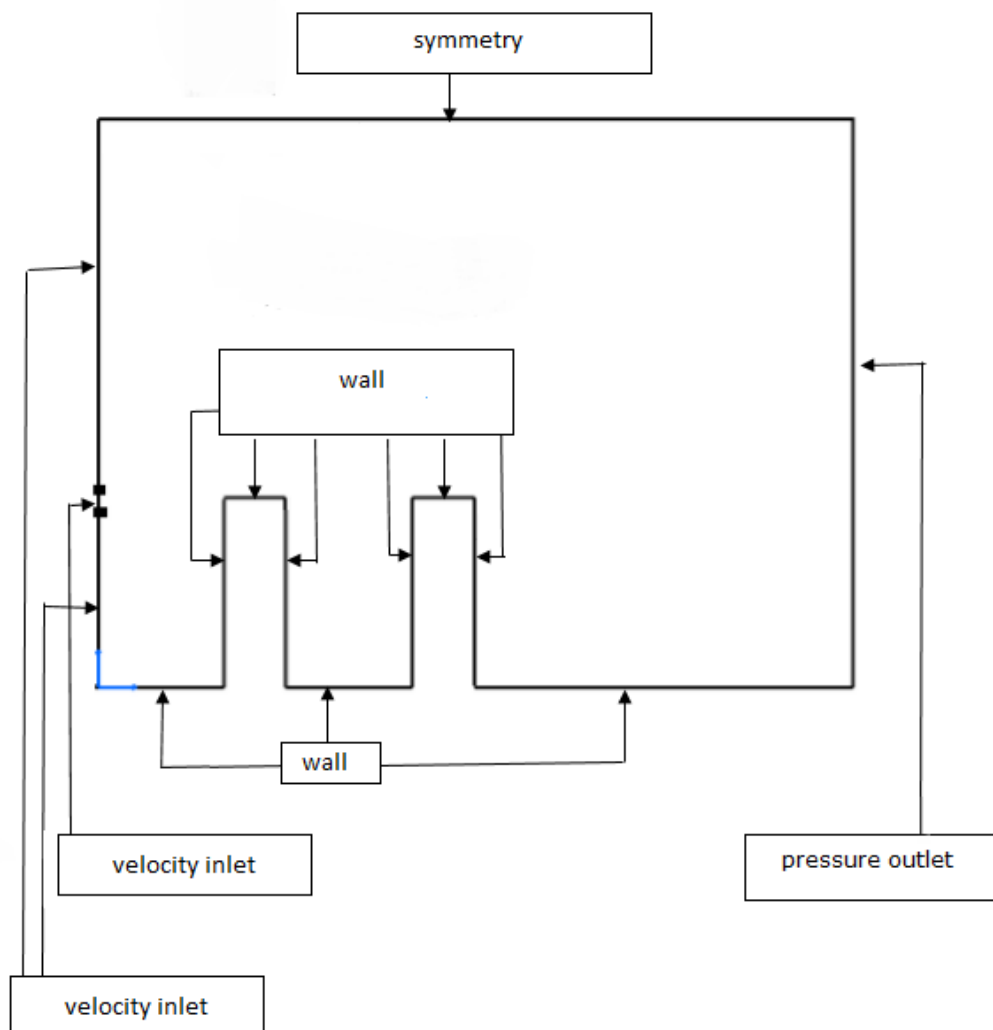
A cause de la nature non linéaire de l'équation qui doit être résolue par Fluent, il est nécessaire de contrôler le changement de variable Φ . On peut atteindre ce but par la sous relaxation, qui réduit le changement de Φ produit durant chaque itération. En simple forme, l'avaleur nouvelle de ϕ pour une cellule définie dépend de la valeur ancienne Φ_{old} , le changement de Φ est $\Delta\Phi$ et α est le facteur de sous relaxation :

$$\Phi = \Phi_{old} + \alpha \Delta\Phi$$

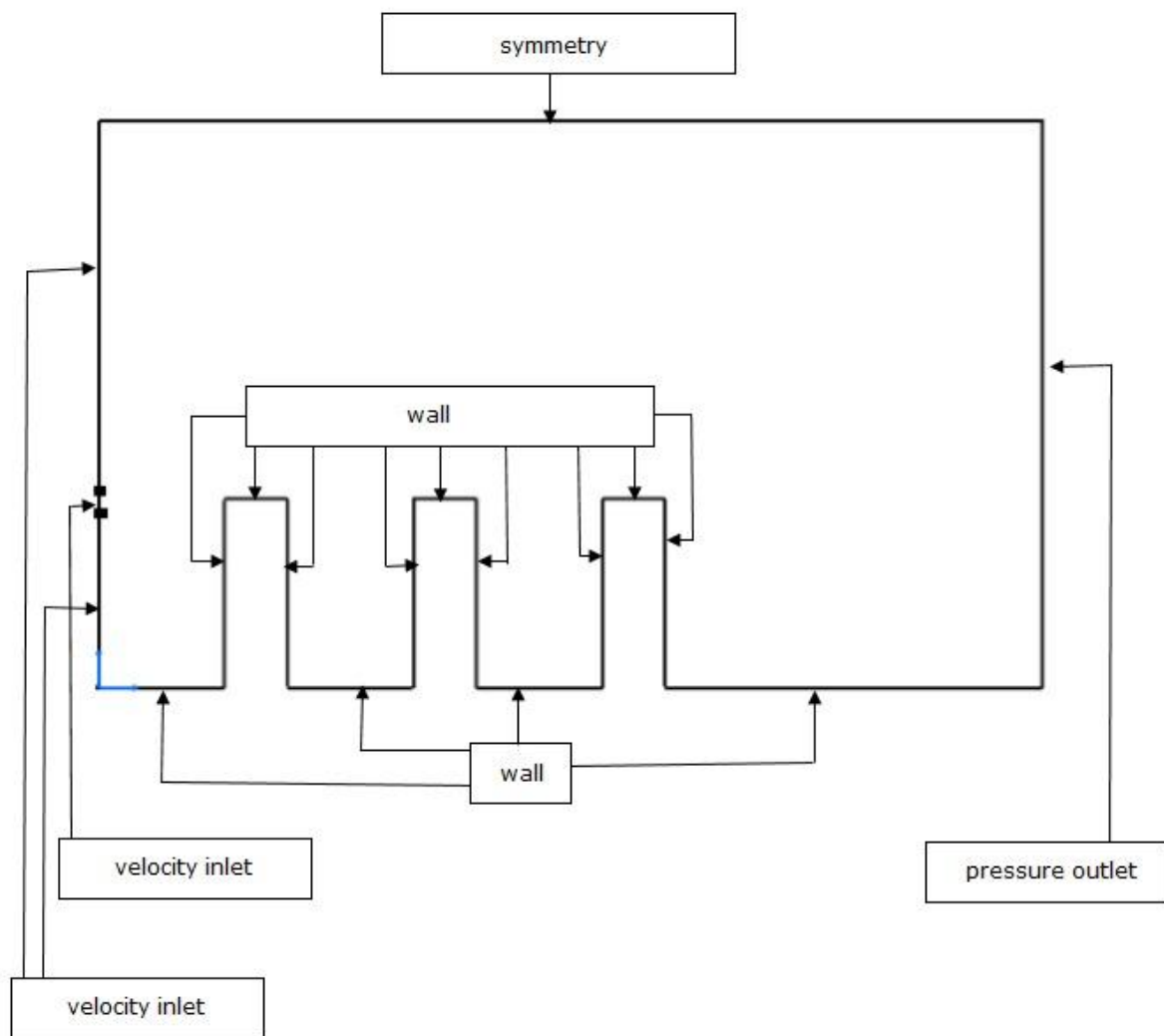
7 Les conditions aux limites

On utilise les conditions aux limites suivantes :

"Velocity inlet" **"wall"** **"Pressure outlet"** **"symmetry"**



(a) Deux obstacles.



(b) Trois obstacles.

Figure III.3 : Conditions aux limites avec Fluent : **(a)** deux obstacles et **(b)** Trois obstacles.