

Mini-Projet Mécanique des Fluides : Simulation Numérique d'un écoulement autour d'un cylindre sous OpenFOAM

Chen LU, Yizhi YANG

Mars 2025

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 1 |
| 2 | Description du problème | 2 |
| 3 | Interprétation des résultats | 3 |
| 3.1 | Analyse des animations | 3 |
| 3.2 | Analyse des coefficients de force (C_d et C_l) | 13 |
| 3.2.1 | $Re = 50$ | 13 |
| 3.2.2 | $Re = 100$ | 14 |
| 3.2.3 | $Re = 200$ | 14 |
| 3.2.4 | $Re = 500$ | 15 |
| 3.2.5 | $Re = 1000$ | 16 |
| 4 | Conclusion | 16 |
| 5 | Annexe | 17 |

1 Introduction

On s'intéresse à analyser l'écoulement d'un fluide newtonien incompressible autour d'un cylindre pour différents nombres de Reynolds, surtout les coefficients de traînée et de portance. La simulation se réalise avec OpenFOAM, un logiciel open-source de mécanique des fluides numérique (CFD), basé sur la méthode des volumes finis (FVM) pour résoudre les équations aux dérivées partielles (EDP).

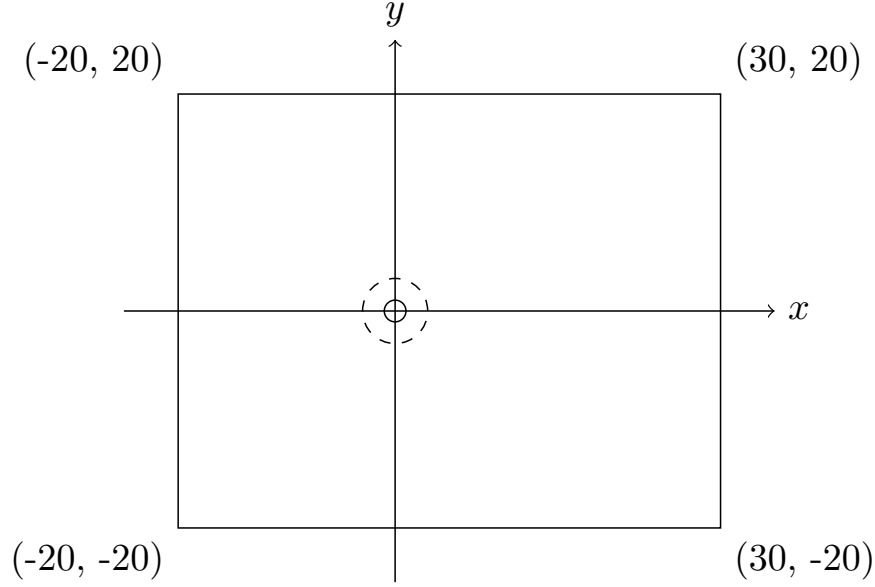


FIGURE 1 – Domaine de l'écoulement

2 Description du problème

Le domaine de l'écoulement est décrit par deux rectangles de longueur 50 et de largeur 40, situés parallèlement au plan xy (respectivement $z = 0.5$ et $z = -0.5$). Le centre géométrique du cylindre de rayon 1 se trouve au point origine. Le problème est traité en 2D donc la profondeur en direction z est ignorée. Dans le maillage, on met `empty` pour les facettes dont on ne s'intéresse pas aux calculs. Le cercle en pointillé (du rayon 3) représente une zone avec le maillage du type `arc`.

Le fluide est introduit de l'entrée (la facette à gauche) avec une vitesse constante $U_0 = 1$, et il sort du domaine via la facette à droite. À la sortie, la pression est mise à zéro. La viscosité du fluide reste constante pour tous les cas suivants ($\nu = 10^{-2}$).

Le nombre de Reynolds est calculé à l'aide de la formule : $Re = \frac{U_0 D}{\nu}$, avec le diamètre du cylindre $D = 2$. Donc initialement, le nombre du Reynolds est 200. Ainsi, sans varier ν et D , pour $Re = 50$, on doit mettre la vitesse initiale $U_0 = 0.25$; pour $Re = 100$, $U_0 = 0.5$; pour $Re = 500$, $U_0 = 2.5$; pour $Re = 1000$, $U_0 = 5$.

Comme $Re < 2000$ pour tous les cas, on reste dans un régime laminaire, donc le solver `icoFoam` a été utilisé (on n'a pas besoin d'utiliser les solvers pour les grandes turbulences comme `simpleFoam`, `pisoFoam` ou `pimpleFoam` etc).

Remarque : toutes les grandeurs physiques mentionnées sont représentées en système international d'unités (SI).

3 Interprétation des résultats

3.1 Analyse des animations

$Re = 50$

Caractéristiques du champ d'écoulement :

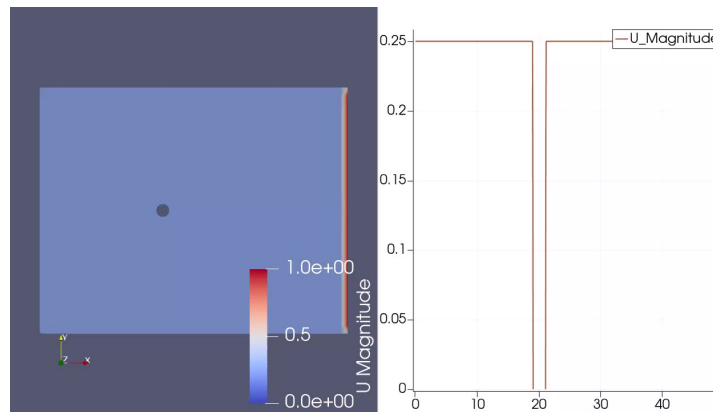


FIGURE 2 – début $Re = 50$

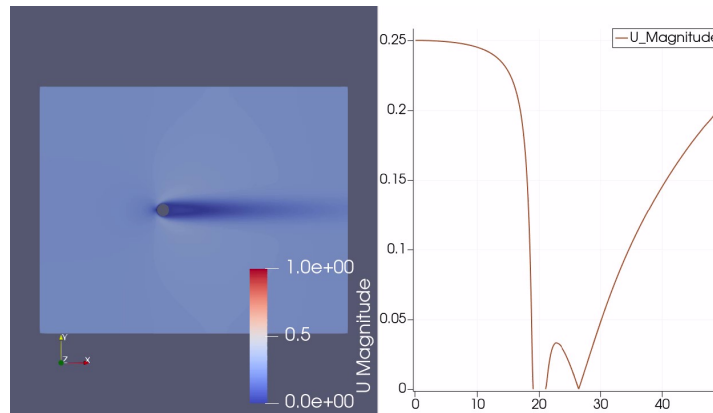


FIGURE 3 – Milieu $Re = 50$

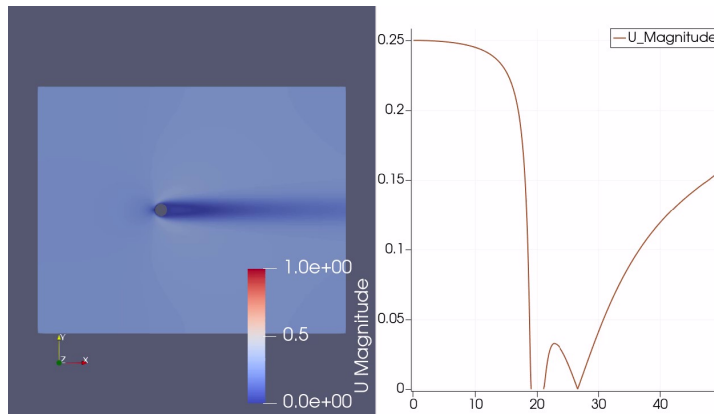


FIGURE 4 – Fin $Re = 50$

À $Re = 50$, en raison du faible nombre de Reynolds, les effets visqueux dominent, et l'écoulement reste relativement stable et symétrique. 2 3 4

État de la formation de tourbillons :

Dans l'animation, on observe soit un léger détachement, soit aucun détachement périodique notable, de sorte que le champ d'écoulement demeure globalement stable.

Coefficients de force :

Les coefficients de traînée et de portance restent pratiquement constants, sans oscillations périodiques évidentes, indiquant qu'aucun sillage de tourbillons alternés ne se forme autour du cylindre.

$Re = 100$

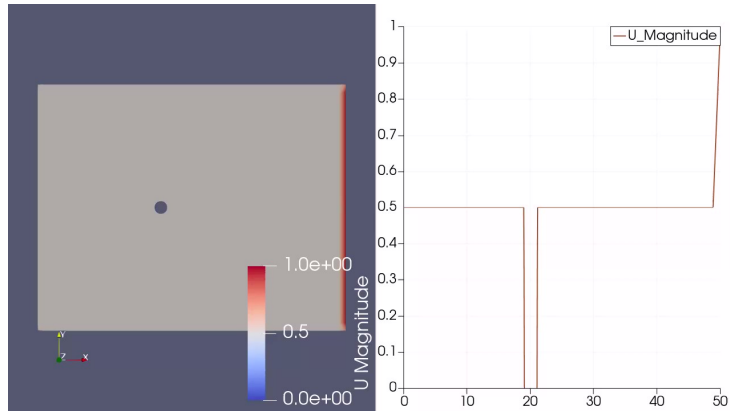


FIGURE 5 – début $Re = 100$

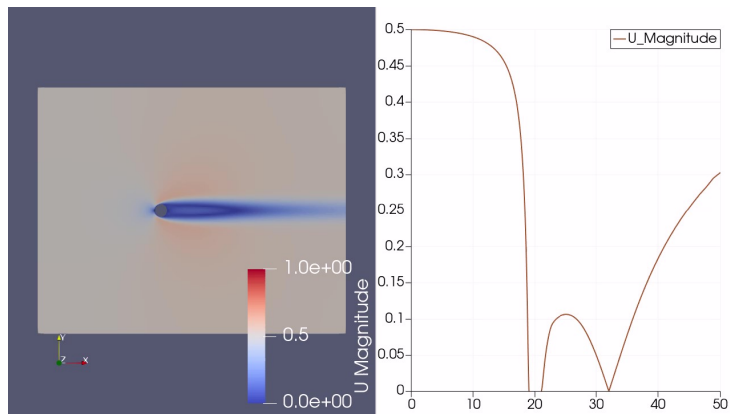


FIGURE 6 – Milieu $Re = 100$

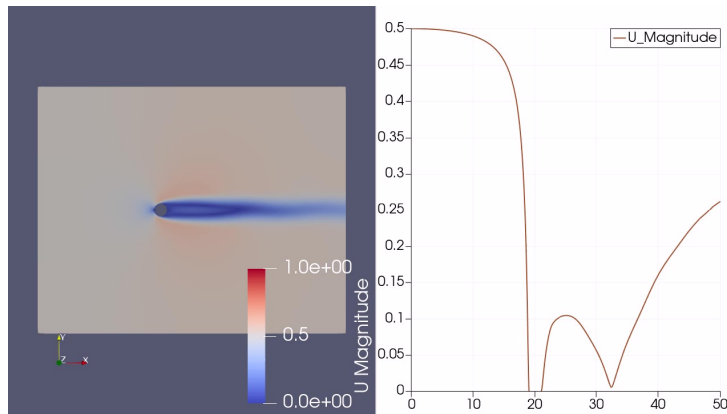


FIGURE 7 – Fin $Re = 100$

Caractéristiques du champ d'écoulement :

À $Re = 100$, les effets d'inertie deviennent plus significatifs, l'écoulement présente des signes d'instabilité et le point de détachement commence à s'écarter légèrement de la symétrie. 5 6 7

État de la formation de tourbillons :

L'animation montre l'apparition possible d'un sillage de Kármán périodique et régulier, c'est-à-dire de petits tourbillons se détachant alternativement derrière le cylindre, bien que leur intensité ne soit pas très élevée.

Coefficients de force :

Les courbes des coefficients de force commencent à présenter des oscillations périodiques, et le coefficient de portance commence à osciller, bien que l'amplitude reste faible. Cela reflète que le sillage de Kármán est encore à ses débuts.

$Re = 200$

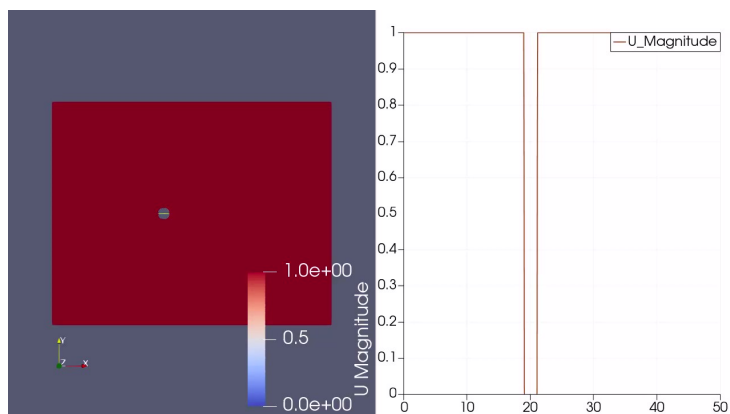


FIGURE 8 – début $Re = 200$

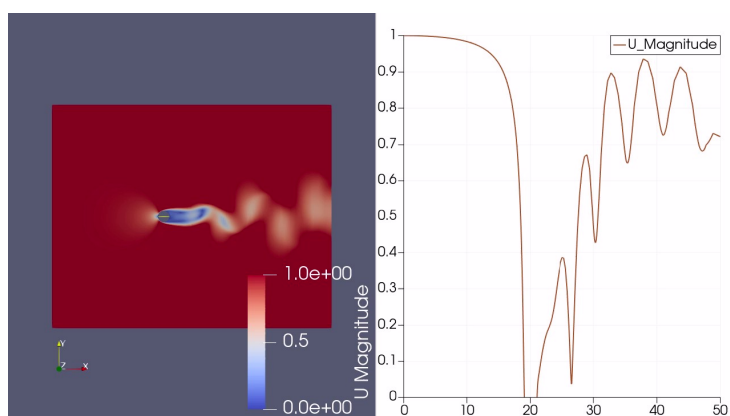


FIGURE 9 – Milieu $Re = 200$

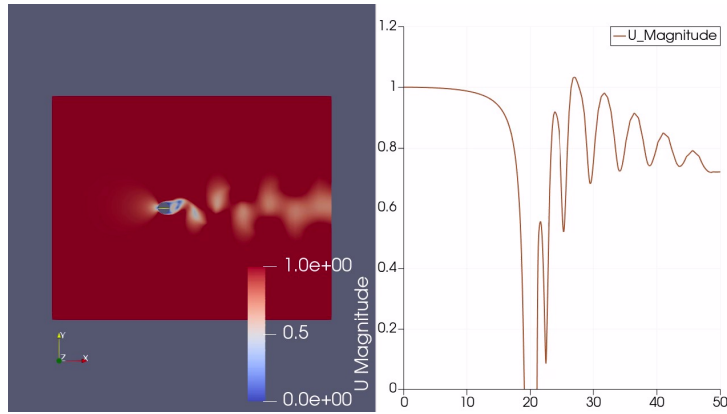


FIGURE 10 – Fin $Re = 200$

Caractéristiques du champ d'écoulement :

À $Re = 200$, les effets d'inertie sont plus marqués et le phénomène de détachement devient plus prononcé. 8 9 10

État de la formation de tourbillons :

L'animation montre un sillage de Kármán relativement régulier avec un détachement alterné des tourbillons. La structure des tourbillons est clairement visible, formant un motif périodique dans la zone aval.

Coefficients de force :

Les oscillations des coefficients de traînée et de portance augmentent en amplitude, en particulier le coefficient de portance dont la période d'oscillation est étroitement liée à la fréquence de détachement des tourbillons. Ceci indique que l'écoulement est entré dans une phase d'instabilité périodique typique.

$Re = 500$

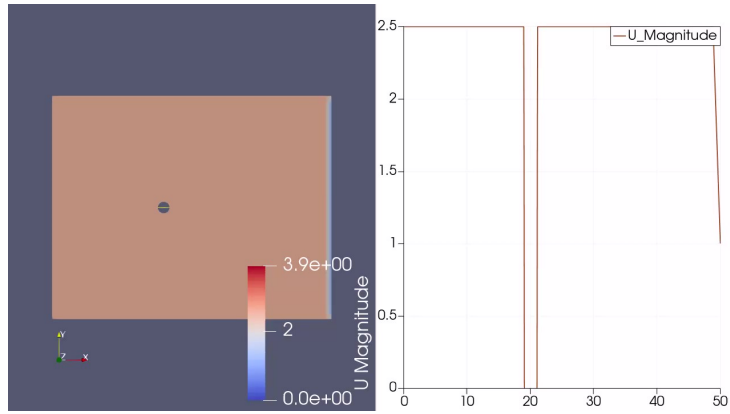


FIGURE 11 – début $Re = 500$

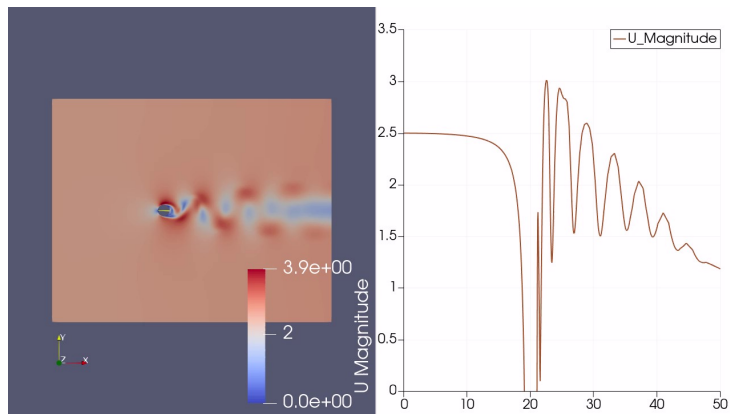


FIGURE 12 – Milieu $Re = 500$

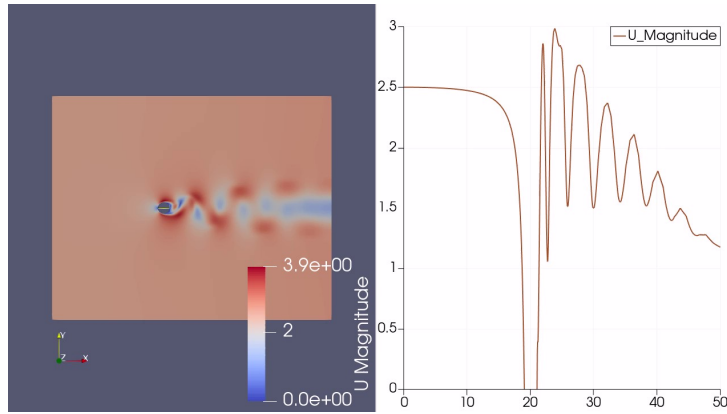


FIGURE 13 – Fin $Re = 500$

Caractéristiques du champ d'écoulement :

À $Re = 500$, l'écoulement entre dans une zone de transition, où la compétition entre inertie et viscosité rend le champ d'écoulement plus complexe.^{11 12 13}

État de la formation de tourbillons :

Dans l'animation, le sillage de tourbillons présente encore une tendance de détachement alternatif, mais la régularité de ce détachement s'affaiblit avec de fortes variations locales. Le sillage peut alors apparaître plus irrégulier.

Coefficients de force :

Les amplitudes des oscillations des coefficients de traînée et de portance augmentent davantage et la fréquence des oscillations est plus élevée, ce qui suggère une non-linéarité plus marquée et des pertes de stabilité occasionnelles.

$Re = 1000$

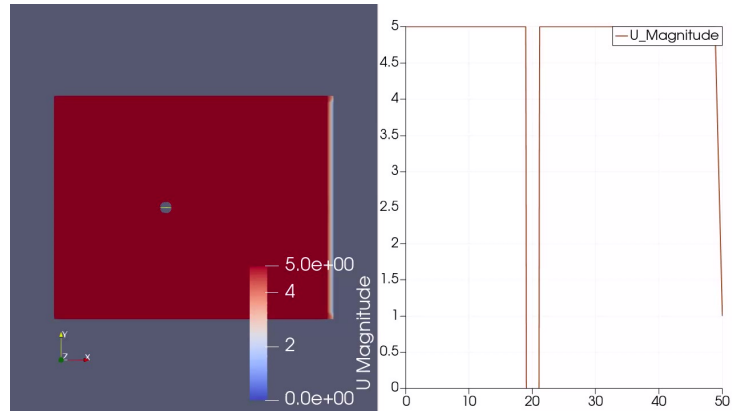


FIGURE 14 – début $Re = 1000$

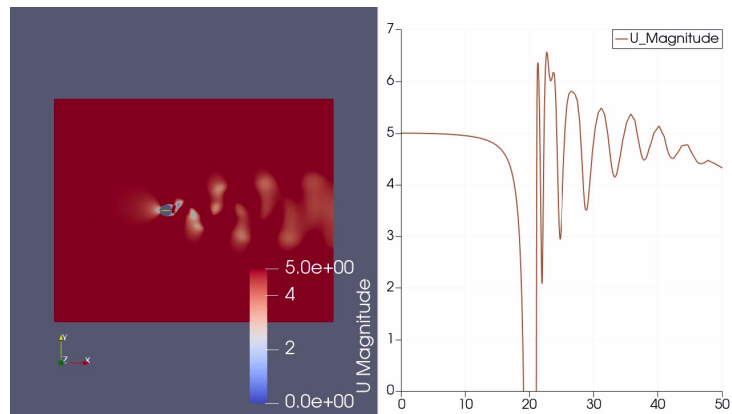


FIGURE 15 – Milieu $Re = 1000$

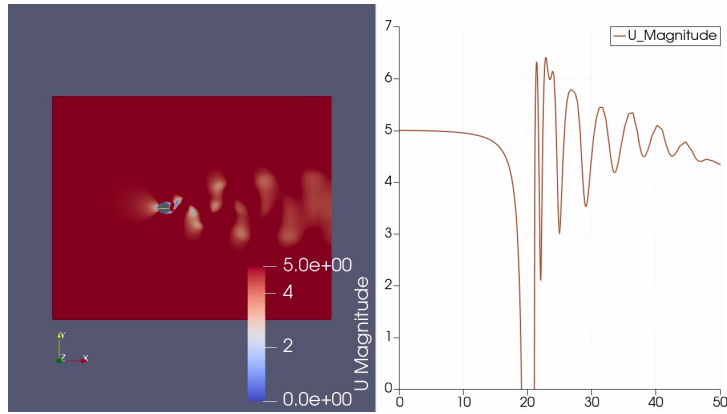


FIGURE 16 – Fin $Re = 1000$

Caractéristiques du champ d'écoulement :

À $Re = 1000$, l'écoulement est entré dans une phase turbulente ou fortement instable, avec des effets d'inertie très marqués et une turbulence évidente dans le champ d'écoulement. 14 15 16

État de la formation de tourbillons :

L'animation montre un détachement des tourbillons très irrégulier, avec des variations spatio-temporelles importantes dans la forme et l'alignement des tourbillons, caractérisant un comportement chaotique et un champ d'écoulement globalement plus complexe.

Coefficients de force :

Les oscillations des coefficients de traînée et de portance deviennent très violentes. La périodicité devient confuse et l'amplitude des oscillations est plus importante, ce qui reflète une augmentation notable des fluctuations instantanées des forces en régime turbulent ; la valeur moyenne des coefficients peut également varier.

Comparaison globale et discussion

De $Re = 50$ à $Re = 200$:

L'écoulement passe progressivement d'un état stable et symétrique à l'apparition d'un sillage de Kármán régulier. Les oscillations des coefficients de force, initialement quasi constantes, augmentent progressivement, illustrant le développement typique de l'instabilité.

De $Re = 200$ à $Re = 500$ et $Re = 1000$:

L'écoulement entre davantage dans une phase de transition, voire turbulent, où la régularité du détachement des tourbillons est perturbée. Les oscillations

périodiques des coefficients de force deviennent plus complexes et de plus grande amplitude, indiquant une instabilité marquée du champ d'écoulement.

Ces résultats d'animation sont en accord avec la littérature sur l'écoulement autour d'un cylindre en deux dimensions. On y observe un écoulement stable à faible nombre de Reynolds, l'apparition de détachements périodiques à des nombres intermédiaires, et enfin un comportement chaotique en régime turbulent.

3.2 Analyse des coefficients de force (C_d et C_l)

Dans cette section, nous présentons les résultats de la traînée (C_d) et de la portance (C_l) en fonction du temps pour différents nombres de Reynolds (Re). Les figures suivantes montrent les courbes $C_d(t)$ et $C_l(t)$ pour des valeurs de Re allant de 50 à 1000.

3.2.1 $Re = 50$

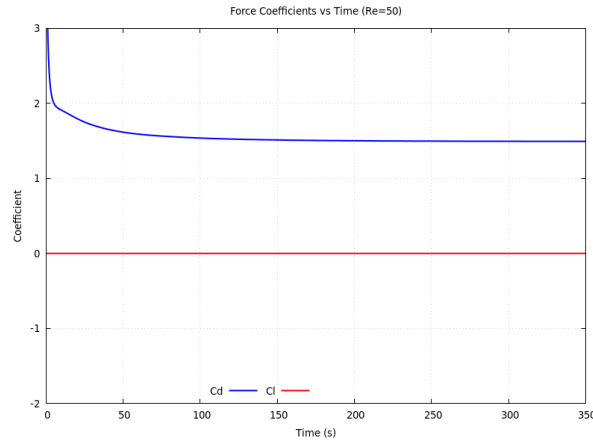


FIGURE 17 – Évolution de C_d et C_l en fonction du temps pour $Re = 50$.

Pour $Re = 50$, on observe que C_d tend rapidement vers une valeur presque constante, tandis que C_l reste pratiquement nul. Cela indique un écoulement largement laminaire et stable, sans oscillations significatives de portance. Le sillage derrière le cylindre est alors peu perturbé. 17

3.2.2 $Re = 100$

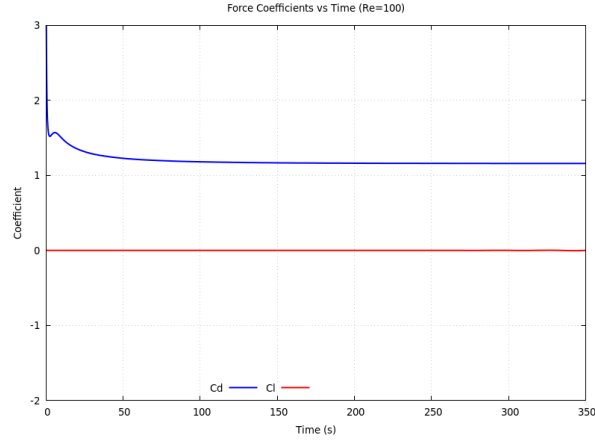


FIGURE 18 – Évolution de C_d et C_l en fonction du temps pour $Re = 100$.

À $Re = 100$, le coefficient de traînée C_d décroît rapidement puis se stabilise vers une valeur autour de 1, tandis que la portance C_l demeure très proche de zéro. On peut cependant noter un léger début d'oscillation, préfigurant la formation de tourbillons alternés. 18

3.2.3 $Re = 200$

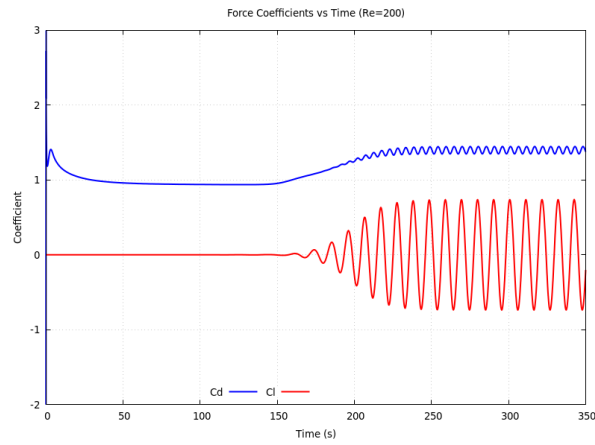


FIGURE 19 – Évolution de C_d et C_l en fonction du temps pour $Re = 200$.

Pour $Re = 200$, C_d présente une valeur moyenne proche de 1, mais surtout on voit apparaître des oscillations marquées de C_l , témoignant de la formation

d'une rue de tourbillons de Kármán plus régulière. Les oscillations de portance sont de plus en plus nettes, avec une amplitude notable et un caractère périodique. 19

3.2.4 $Re = 500$

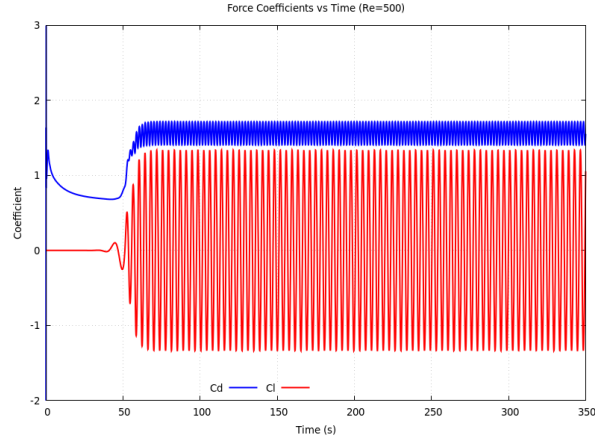


FIGURE 20 – Évolution de C_d et C_l en fonction du temps pour $Re = 500$.

À $Re = 500$, l'écoulement devient davantage instable. On constate que C_d et C_l oscillent tous deux avec une amplitude et une fréquence accrues. Le sillage de tourbillons se détache de manière alternée, mais la régularité de ce détachement commence à être perturbée par des effets plus complexes (transition vers un régime plus turbulent). 20

3.2.5 $Re = 1000$

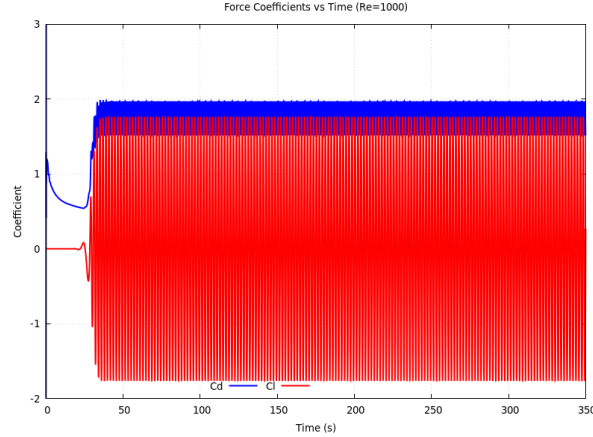


FIGURE 21 – Évolution de C_d et C_l en fonction du temps pour $Re = 1000$.

Lorsque Re atteint 1000, le régime d'écoulement est quasiment turbulent. Les courbes de C_d et C_l montrent de fortes oscillations, avec des fréquences et des amplitudes importantes. La périodicité s'estompe parfois, indiquant un comportement chaotique. Le sillage de tourbillons derrière le cylindre est alors hautement instable et fortement perturbé. 21

4 Conclusion

Dans ce mini-projet, nous avons simulé l'écoulement d'un fluide newtonien incompressible autour d'un cylindre pour plusieurs nombres de Reynolds (50, 100, 200, 500 et 1000) à l'aide d'OpenFOAM. Les résultats numériques ont permis de mettre en évidence l'influence croissante des effets inertiels et la transition entre différents régimes d'écoulement :

- $Re = 50$: Écoulement majoritairement laminaire et stable, caractérisé par une traînée presque constante et une portance négligeable.
- $Re = 100$: Apparition d'oscillations faibles indiquant le début de la formation d'une rue de tourbillons de Kármán.
- $Re = 200$: Établissement d'un sillage de Kármán plus régulier, les oscillations de portance deviennent marquées et périodiques.
- $Re = 500$: Écoulement de transition, la rue de tourbillons perd en régularité et les coefficients de force (traînée et portance) présentent de fortes oscillations.
- $Re = 1000$: Régime presque turbulent, les oscillations de force sont de grande amplitude et la périodicité se brouille, témoignant d'un comportement instable et chaotique.

Ces observations s'accordent avec les résultats de la littérature sur l'écoulement autour d'un cylindre, montrant la progression du régime laminaire vers un régime de détachement périodique, puis la perte de régularité à plus haut Reynolds. Le suivi temporel des coefficients de traînée et de portance, ainsi que la visualisation des lignes de courant, confirment la pertinence du modèle numérique et de la configuration de maillage choisis. Enfin, l'analyse comparée des différents nombres de Reynolds souligne l'intérêt de ce type d'étude pour comprendre l'impact des effets inertiels et visqueux dans les phénomènes de séparation et de formation de tourbillons, et ouvre la voie à des investigations plus poussées sur les régimes turbulents ou l'optimisation de la géométrie.

5 Annexe

```

1 // controlDict
2 functions
3 {
4     forces
5     {
6         type                forces;
7         functionObjectLibs ("libforces.so");
8         patches              (cylinder);
9         rho                  rhoInf;
10        rhoInf                1;
11        CofR                  (0 0 0);
12    }
13    forceCoeffs
14    {
15        type                forceCoeffs;
16        functionObjectLibs ("libforces.so");
17        patches              (cylinder);
18        rho                  rhoInf;
19        rhoInf                1;
20        liftDir               (0 1 0);
21        dragDir               (1 0 0);
22        CofR                  (0 0 0);
23        magUInf               1;
24        lRef                   2;
25        Aref                   2;
26        pitchAxis             (0 0 1);
27    }
28 }
```