

– Rapport de projet –

TP Star-CCM+

**BONVALET Arthur, JEANMOTTE Axel, MOREAU
Louis, PETITJEAN Nandini, ROUSSEAU Jeremy**

BONVALET Arthur, JEANMOTTE Axel, MOREAU Louis,
PETITJEAN Nandini, ROUSSEAU Jeremy,
TP Star-CCM+,
26 janvier 2026.

École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
<https://artsetmetiers.fr>

Table des matières

Introduction	1
1 Mise en situation	3
1.1 Contexte et intérêt du problème	3
1.2 Description du phénomène physique	3
1.3 Équations et paramètres caractéristiques	3
1.4 Régimes d'écoulement observés	4
1.5 Objectifs du travail	4
2 Modélisation numérique sous Star-CCM+	5
2.1 Introduction	5
2.2 Création de la géométrie	5
2.3 Génération du maillage	6
2.4 Conditions physiques et modèles utilisés	6
2.4.1 Paramètres fluides	6
2.4.2 Modèles physiques choisis	6
2.5 Conditions aux limites	6
2.6 Initialisation et champs de départ	7
2.7 Post-traitement et grandeurs calculées	7
2.8 Synthèse de la modélisation	7
3 Résultats et discussion	9
3.1 Schémas, approches et paramètres des simulations	9
3.2 Discussion	9
Conclusion	13
Bibliographie	15

Introduction

Dans le cadre du module RESA (Résolution numérique des équations aux dérivées partielles), ce TP avait pour but d'étudier l'écoulement d'un fluide autour d'un cylindre en rotation. C'est un cas classique en mécanique des fluides, intéressant à la fois d'un point de vue théorique et pratique, car il permet de mieux comprendre les phénomènes de séparation de couche limite, de formation de tourbillons et l'influence d'une rotation sur un écoulement externe.

L'objectif principal était de reproduire numériquement les résultats d'un article de référence, puis d'étudier mes transferts thermiques si le cylindre est plus chaud que le fluide [1] [3.2](#) (S. Mittal, B. Kumar, Flow past a rotating cylinder, J. Fluid Mech., 2003). Pour cela, on a utilisé le logiciel Star-CCM+, qui permet de résoudre les équations de Navier-Stokes par des méthodes numériques adaptées à la mécanique des fluides.

Le travail s'est déroulé en plusieurs étapes : mise en place de la géométrie et du maillage, définition des paramètres physiques et des conditions aux limites, lancement et validation des simulations pour différentes valeurs des nombres sans dimension Re et α , puis analyse des résultats obtenus. L'idée était à la fois de comprendre le phénomène physique étudié et de se familiariser avec la démarche de simulation numérique : choix du modèle, vérification de la convergence, exploitation et interprétation des résultats.

Chapitre 1

Mise en situation

1.1 Contexte et intérêt du problème

L'écoulement d'un fluide autour d'un cylindre en rotation est un problème fondamental de la mécanique des fluides, souvent utilisé pour étudier les phénomènes de sillage, de portance et de traînée.

Ce type d'écoulement présente un intérêt particulier dans de nombreuses applications industrielles et scientifiques : contrôle de la traînée des structures cylindriques, conception de capteurs, études aérodynamiques, ou encore transferts thermiques autour de surfaces rotatives. L'introduction d'une rotation du cylindre offre la possibilité de modifier la structure du sillage et de contrôler activement le comportement de l'écoulement.

1.2 Description du phénomène physique

Lorsqu'un fluide s'écoule autour d'un cylindre fixe, on observe, à partir d'un certain nombre de Reynolds, l'apparition d'une *rue de von Kármán*. Ce phénomène est caractérisé par le détachement alterné de tourbillons de part et d'autre du cylindre, entraînant des fluctuations périodiques de la portance et de la traînée.

Lorsque le cylindre est mis en rotation, l'asymétrie de vitesse entre les deux faces du cylindre induit un déséquilibre de pression, connu sous le nom d'effet Magnus. Ce dernier génère une portance moyenne non nulle et modifie la structure du sillage. En fonction de la vitesse de rotation, l'écoulement peut se stabiliser, se désymétriser ou même perdre totalement son régime tourbillonnaire.

1.3 Équations et paramètres caractéristiques

L'écoulement étudié est régi par les équations de Navier–Stokes incompressibles, traduisant la conservation de la masse et de la quantité de mouvement :

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \tag{1.1}$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u}, \tag{1.2}$$

où $\mathbf{u}$ désigne le champ de vitesse, p la pression, ρ la densité du fluide et μ sa viscosité dynamique.

Deux nombres sans dimension gouvernent le comportement de l'écoulement :

- le **nombre de Reynolds**, $Re = \frac{2Ua}{\nu}$, qui exprime le rapport entre les effets d'inertie et les effets visqueux ;
- le **taux de rotation**, $\alpha = \frac{a\omega}{U}$, représentant la vitesse de rotation du cylindre relativement à l'écoulement incident.

Les forces exercées par le fluide sur le cylindre sont décrites à travers les coefficients aérodynamiques de portance (C_L) et de traînée (C_D), définis par :

$$C_L = \frac{1}{\frac{1}{2}\rho U^2(2a)} \int_{T_{\text{cyl}}} (\boldsymbol{\sigma}\mathbf{n})_y dT, \quad (1.3)$$

$$C_D = \frac{1}{\frac{1}{2}\rho U^2(2a)} \int_{T_{\text{cyl}}} (\boldsymbol{\sigma}\mathbf{n})_x dT, \quad (1.4)$$

où $\boldsymbol{\sigma}$ est le tenseur des contraintes et $\mathbf{n}$ le vecteur normal à la surface du cylindre.

1.4 Régimes d'écoulement observés

Selon les études expérimentales et numériques de référence, l'écoulement autour d'un cylindre en rotation présente plusieurs régimes distincts :

- pour $\alpha < 1.9$, le sillage est instable et caractérisé par une rue de von Kármán avec détachement périodique de tourbillons ;
- pour $1.9 < \alpha < 4.3$, la rotation stabilise le sillage et l'écoulement devient stationnaire et symétrique ;
- pour $\alpha > 4.3$, une nouvelle instabilité apparaît, menant à un écoulement asymétrique marqué par la présence d'un vortex unilatéral.

Ces régimes traduisent la richesse dynamique du phénomène et la forte sensibilité de la structure du sillage au taux de rotation. L'étude de ces transitions permet de mieux comprendre les mécanismes de stabilisation et de contrôle des écoulements par rotation.

1.5 Objectifs du travail

L'objectif de cette étude est de reproduire numériquement les différents régimes d'écoulement autour d'un cylindre en rotation à l'aide d'un modèle CFD (Computational Fluid Dynamics). Nous cherchons à :

- observer l'évolution du sillage et des champs de vitesse en fonction de α ;
- analyser les variations des coefficients de portance et de traînée ;
- comparer les résultats obtenus aux données de la littérature scientifique ;
- étendre le cas d'étude à l'analyse des transferts thermiques pour un cylindre chauffé.

Cette approche permettra d'approfondir la compréhension des mécanismes physiques mis en jeu et de valider la pertinence des méthodes numériques utilisées pour la simulation des écoulements visqueux instationnaires.

Chapitre 2

Modélisation numérique sous Star-CCM+

2.1 Introduction

Afin d'étudier l'influence du taux de rotation α sur l'écoulement autour d'un cylindre, la modélisation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel *Star-CCM+*. Ce logiciel de mécanique des fluides numérique (CFD) permet de résoudre les équations de Navier-Stokes en régime instationnaire à l'aide de la méthode des volumes finis.

Le but de cette section est de présenter les différentes étapes de mise en place du modèle numérique, depuis la création de la géométrie jusqu'à la visualisation des résultats, en passant par le maillage, la définition des conditions aux limites et la configuration des modèles physiques.

2.2 Création de la géométrie

La géométrie modélisée correspond à un cylindre bidimensionnel de rayon a immergé dans un domaine rectangulaire représentant le fluide environnant. La taille du domaine a été choisie de manière à limiter les effets de bord tout en conservant un temps de calcul raisonnable :

$$X \in [-10a; 50a], \quad Y \in [-10a; 20a].$$

Le cylindre est placé à l'origine du repère $(0, 0)$.

Procédure dans Star-CCM+ :

1. Création d'un nouveau modèle 3D-CAD.
2. Dessin du cercle de rayon a centré à l'origine.
3. Création d'un rectangle englobant le cylindre selon les dimensions précédentes.
4. Extrusion du domaine pour générer un volume 3D.

2.3 Génération du maillage

Le maillage constitue une étape clé de la précision de la simulation. Il a été généré automatiquement puis affiné localement autour du cylindre, où les gradients de vitesse sont les plus importants.

Méthodologie :

- Utilisation d'un maillage *Trimmed Cell Mesher* adapté au calcul 2D.
- Raffinement local du maillage au voisinage du cylindre via un contrôle surfacique.
- Maillage plus grossier en aval, pour limiter le coût numérique.

Le contrôle du maillage a été effectué en veillant à obtenir un rapport de croissance modéré et une densité suffisante pour capturer les zones de recirculation.

2.4 Conditions physiques et modèles utilisés

2.4.1 Paramètres fluides

Le fluide considéré est l'eau, de densité $\rho = 997.56 \text{ kg/m}^3$ et de viscosité dynamique $\mu = 8.887 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Les simulations ont été réalisées pour un nombre de Reynolds fixé à $Re = 200$, ce qui correspond à un régime laminaire instationnaire.

Les paramètres principaux sont :

$$U_\infty = \frac{\mu Re}{\rho 2a}, \quad \omega = \frac{\alpha U_\infty}{a}.$$

Les valeurs de α étudiées varient typiquement entre 0 et 5.

2.4.2 Modèles physiques choisis

Le modèle physique retenu est le suivant :

- Écoulement incompressible (modèle **Constant Density**);
- Régime laminaire (modèle **Laminar Flow**);
- Résolution instationnaire implicite (**Implicit Unsteady**);
- Schéma de couplage pression-vitesse : **Coupled Flow**.

2.5 Conditions aux limites

Les conditions aux limites imposées sont les suivantes :

- **Entrée (gauche)** : vitesse uniforme U_∞ ;
- **Sortie (droite)** : condition de sortie à pression imposée ($p = 0$) ;
- **Parois supérieure et inférieure** : condition de glissement (*Slip Wall*) ;
- **Cylindre** : paroi en rotation, condition de vitesse tangentielle locale :

$$u_\theta = \omega a.$$

2.6 Initialisation et champs de départ

L'écoulement initial est supposé potentiel, défini analytiquement en coordonnées polaires :

$$u_r = U_\infty \cos \theta \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right), \quad (2.1)$$

$$u_\theta = -U_\infty \sin \theta \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right). \quad (2.2)$$

Ces expressions permettent une initialisation douce de la simulation, limitant les oscillations numériques au démarrage.

2.7 Post-traitement et grandeurs calculées

Les sorties principales du calcul concernent :

- le champ de vitesse et de vorticité ;
- les coefficients de portance (C_L) et de traînée (C_D) en fonction du temps ;

2.8 Synthèse de la modélisation

La configuration numérique mise en place permet de simuler fidèlement les phénomènes observés expérimentalement pour les nombres de Reynolds modérés. Le maillage raffiné autour du cylindre, combiné à une initialisation analytique et à un pas de temps adaptatif, assure une bonne stabilité et une convergence satisfaisante. Les résultats obtenus, en particulier les champs de vorticité et les variations des coefficients aérodynamiques, seront analysés dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Résultats et discussion

3.1 Schémas, approches et paramètres des simulations

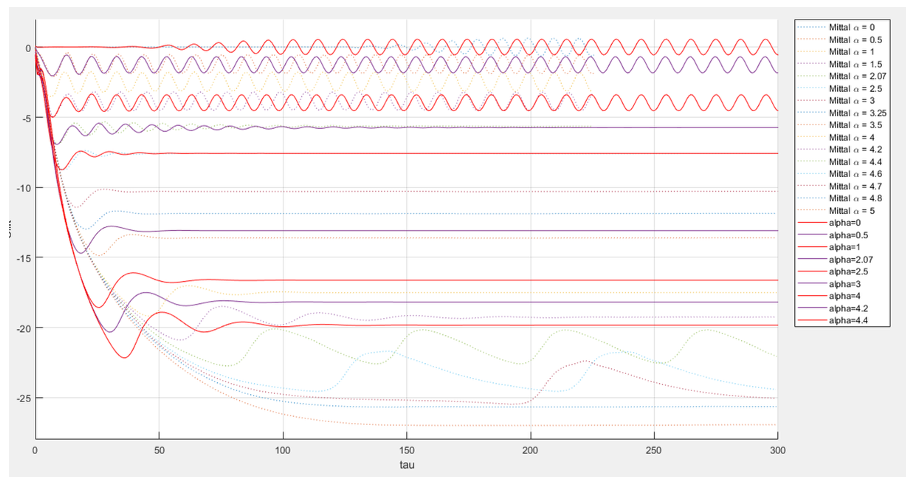


Figure 3.1. variations du coefficient de portance CL en fonction du temps et de alpha

3.2 Discussion

L'analyse des résultats de simulation sous Star-CCM+, résumée par la Figure 3.1 montrant les variations du coefficient de portance (CL) en fonction du temps et du taux de rotation (α), révèle une excellente concordance qualitative avec les conclusions de l'article de référence Observation des Régimes d'Écoulement L'article de référence, qui étudie l'écoulement autour d'un cylindre en rotation à un nombre de Reynolds $Re = 200$, établit des plages de α caractéristiques pour différents régimes : Régime Instable ($\alpha < 2.07$) : Pour les faibles valeurs de α (y compris pour le cylindre fixe), les courbes de la Figure 3.1 présentent des oscillations périodiques. Ces fluctuations du coefficient de portance traduisent le détachement alterné et périodique de tourbillons caractéristique d'un écoulement instationnaire. La simulation reproduit bien cette instabilité dynamique. L'article de Mittal et Kumar fixe la limite d'apparition de ce détachement de tourbillons à $\alpha < 2.07$.

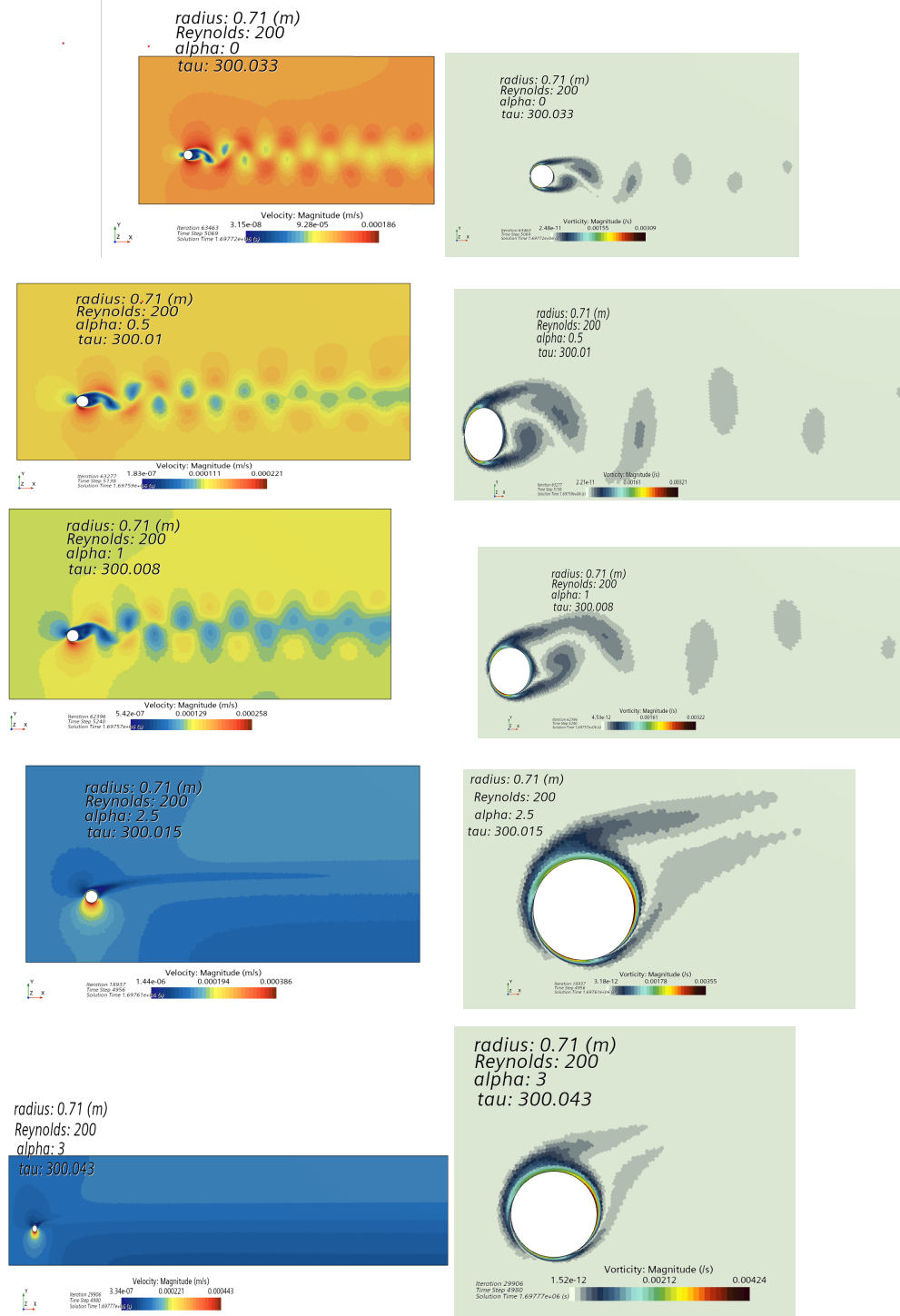


Figure 3.2. Velocity and Vorticity

Régime Stabilisé / Écoulement Stationnaire ($2.07 < \alpha < 4.4$) : La Figure 3.1 montre que pour des valeurs intermédiaires de α , les courbes de se stabilisent rapidement après la phase transitoire initiale et atteignent une valeur moyenne constante non nulle. Cette stabilisation indique que la rotation du cylindre a supprimé le détachement périodique de tourbillons, rendant l'écoulement stationnaire et asymétrique. Ceci est en parfait accord avec le principe selon lequel la rotation induit un effet Magnus, générant une portance moyenne non nulle et modifiant la structure du sillage. Mittal et Kumar confirment que pour des taux de rotation supérieurs à 2.07, l'écoulement atteint un état stable (stationnaire).

En résumé, les simulations Star-CCM+ ont permis de reproduire fidèlement les phénomènes clés décrits par Mittal et Kumar, confirmant les différentes phases de transition du sillage en fonction de α à $Re = 200$. Cependant pour ceux supérieurs à 4, le maillage utilisé n'était plus satisfaisant, nous avons réalisé un second maillage mais n'avons pas eu le temps de calculer ses nouvelles simulations...

Conclusion

Ce projet de TP, mené sous Star-CCM+ dans le cadre du module RESA, a permis d'étudier avec succès l'écoulement d'un fluide autour d'un cylindre en rotation à un nombre de Reynolds modéré ($Re = 200$). L'objectif principal de cette étude numérique était de reproduire les différents régimes d'écoulement décrits dans la littérature, notamment ceux influencés par le taux de rotation sans dimension (α).

La mise en œuvre de la simulation a respecté la démarche rigoureuse du CFD. Nous avons défini une géométrie 2D étendue et généré un maillage affiné autour du cylindre, essentiel pour capturer les phénomènes de couche limite et de sillage. Les équations de Navier-Stokes incompressibles ont été résolues en régime laminaire instationnaire. L'initialisation avec un écoulement potentiel a garanti une convergence stable et une bonne représentativité physique du démarrage de la simulation. Les résultats obtenus, notamment l'évolution des coefficients de portance et de traînée en fonction du temps et de α , ont confirmé la forte sensibilité de la structure du sillage au taux de rotation. Nous avons réussi à observer numériquement les transitions attendues : du régime instable avec détachement de tourbillons au régime stationnaire stabilisé pour intermédiaires, et enfin au régime asymétrique pour élevés. La comparaison avec les données de l'article de référence (Mittal et Kumar, 2003) valide la pertinence de la modélisation mise en place.

Au-delà de la validation des résultats aérodynamiques, cette étude a permis d'approfondir la compréhension de l'effet Magnus et des mécanismes de contrôle des écoulements par rotation. Une étape future essentielle serait l'extension du cas d'étude à l'analyse des transferts thermiques pour un cylindre chauffé. De plus, afin d'améliorer la précision pour les régimes critiques, il serait pertinent d'explorer des techniques d'optimisation de la densité du maillage dans les zones à fort gradient et d'évaluer l'impact de conditions aux limites moins simplifiées. En conclusion, ce projet Star-CCM+ a été une réussite technique et pédagogique, consolidant à la fois notre compréhension des phénomènes physiques complexes de la mécanique des fluides et notre maîtrise des outils de simulation numérique instationnaire.

Bibliography

- [1] S. Mittal, B. Kumar, Flow past a rotating cylinder, *J. Fluid Mech.* 476 (2003) 303–334.
<https://doi.org/10.1017/S0022112002002938>