

Fascicule de Travaux Pratiques

Dahia Chibouti
dahia.chibouti@univ-eiffel.fr

2022 - 2023

Table des matières

1	Rappels & pré-requis	2
1.1	Équations de Navier-Stokes et de l'énergie	2
1.2	Approximation de Boussinesq	2
1.3	Mise sous forme adimensionnelle	3
2	TP 1 : Cavité différentiellement chauffée	4
2.1	Modélisation	4
2.2	Résolution du problème	4
2.3	Analyse des résultats	5
3	TP 2 A : Écoulements turbulents autour d'un profil d'aile	7
3.1	Description des différents régimes d'écoulements autour d'un cylindre	7
3.2	Simulation avec Fluent d'un écoulement autour d'un profil d'aile	8
3.2.1	Description et données du problème	8
3.2.2	Construction du maillage	9
3.2.3	Simulation Fluent	10
3.3	Annexes	11
3.3.1	Force de l'écoulement sur l'obstacle	11
3.3.2	Rappels sur les coefficients de trainée C_x et de portance C_y	12
3.3.3	Définition du nombre de Strouhal	12
4	TP 2 : Écoulements laminaires autour d'un obstacle	14
4.1	Description des différents régimes d'écoulements autour d'un cylindre	14
4.2	Simulation avec Fluent d'un écoulement autour d'un obstacle cylindrique	14
4.2.1	Données du problème	14
4.2.2	Construction du maillage	15
4.2.3	Calcul de l'écoulement stationnaire laminaire à $Re = 20$ avec Fluent	16
4.2.4	Calcul de l'écoulement instationnaire laminaire à $Re = 100$ avec Fluent	18
4.3	Annexes	19
4.3.1	Rappels sur les coefficients de trainée C_x et de portance C_y	19
4.3.2	Définition du nombre de Strouhal	19

5	TP 3 : Échangeur thermique dans un écoulement périodique	21
5.1	Géométrie et physique du problème	21
5.2	Résolution sous ANSYS/FLUENT	21
5.3	Créer un projet Fluent sous Workbench	21
5.4	Construire la géométrie sous DesignModeler	21
5.4.1	Mailler la géométrie avec Meshing	23
5.4.2	Paramétrer Fluent et définir les sorties	24
5.4.3	Paramétrer les simulations	25
5.4.4	Design Exploration	25
5.4.5	Optimisation des simulations	26

1 Rappels & pré-requis

1.1 Équations de Navier-Stokes et de l'énergie

On supposera dans tous les TP que l'on traite des écoulements bi-dimensionnels de fluides incompressibles dont les propriétés sont constantes. Les équations de Navier-Stokes s'écrivent :

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{u} &= 0 \\ \rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} \right) &= -\vec{\nabla} p + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{u} + \vec{f} \end{aligned} \quad (1)$$

où $\vec{u} = (u, w)$ et p sont les champs de vitesse et de pression, ρ est la masse volumique et μ est la viscosité dynamique. Le terme \vec{f} contient les forces extérieures. Si la gravité est considérée, il s'écrit $\vec{f} = -\rho g \vec{e}_z$, où g est l'accélération de pesanteur et \vec{e}_z le vecteur unitaire dans la direction dans laquelle s'exerce la gravité.

Lorsque l'on s'intéresse aux transferts de chaleur on résout également l'équation de l'énergie :

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) T \right) = \lambda \vec{\nabla}^2 T \quad (2)$$

avec T le champ de température, \vec{u} le champ de vitesse (fixé ou issu des équations de Navier-Stokes), c_p la capacité calorifique et λ la conductivité thermique.

1.2 Approximation de Boussinesq

Lorsque l'approximation de Boussinesq est faite, on suppose que la masse volumique est constante excepté dans les termes moteurs de l'écoulement. La loi de variation de la masse volumique ρ avec la température T s'écrit :

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta (T - T_0)) \quad (3)$$

où β est le coefficient de dilatation thermique en K^{-1} et T_0 est une température de référence. Dans l'approximation de gaz parfait, on considère généralement $\beta = 1/T_0$.

Exercice : retrouver l'équation précédente et l'expression de β à partir d'un développement limité de ρ autour de la température de référence T_0 . Vérifier également que pour un gaz parfait, $\beta = 1/T_0$.

1.3 Mise sous forme adimensionnelle

Pour certains problèmes il peut être nécessaire dans le cadre de comparaisons de travailler avec les équations de Navier-Stokes et de l'énergie ainsi que leurs conditions aux limites sous leurs formes adimensionnelles. Pour obtenir ces dernières, il faut choisir les différentes échelles du problème (en général vitesse V , longueur H , temps T , pression P et l'écart de température Θ) puis effectuer le changement de variable suivant :

$$\phi_i \rightarrow \phi_{i,ref} \times \phi_i^* \quad (4)$$

où les ϕ_i sont les différentes variables à adimensionner.

La mise en pratique est illustrée avec le problème de la cavité entraînée. On considère un fluide incompressible contenu dans une cavité carrée de dimension H et dont la paroi supérieure est animée d'une vitesse constante u_0 . Dans ce problème simple, l'échelle de référence de la longueur est H et celle de la vitesse u_0 . On construit l'échelle de référence de temps $\phi_{T,ref} = \phi_{L,ref}/\phi_{V,ref} = H/u_0$ et celle de pression $\phi_{P,ref} = \rho\phi_{V,ref}^2 = \rho u_0^2$. En introduisant ce changement de variables dans les équations de Navier-Stokes, on obtient :

$$\begin{aligned} \vec{\nabla}^* \cdot \vec{u}^* &= 0 \\ \frac{\partial \vec{u}^*}{\partial t^*} + (\vec{u}^* \cdot \vec{\nabla}^*) \vec{u}^* &= -\vec{\nabla}^* p^* + \frac{1}{Re} \vec{\nabla}^{*2} \vec{u}^* \end{aligned} \quad (5)$$

avec $Re = \rho u_0 H / \mu$ le nombre de Reynolds. Au niveau de la paroi supérieure, la condition à la limite s'écrit $\vec{u}(x, z = 1) = 1 \vec{e}_x$. On identifie que, dans cette formulation adimensionnelle, la masse volumique est l'unité tandis que la viscosité est Re^{-1} .

2 TP 1 : Cavité différentiellement chauffée

2.1 Modélisation

On considère une cavité carrée de côté H . Les parois haute et basse sont adiabatiques tandis que les parois gauche et droite sont respectivement maintenues à des températures chaude (indice c) et froide (f). La différence de température est notée $\Delta T = T_c - T_f$. La gravité qui s'exerce dans la direction perpendiculaire au gradient thermique provoque la mise en mouvement du fluide dans la cavité. On supposera dans la suite que les équations gouvernant l'écoulement sont celles de Navier-Stokes incompressible et de l'énergie, avec la prise en compte de l'approximation de Boussinesq.

1.  crire les équations complètes sous leurs forme dimensionnelle en faisant apparaître la pression motrice $p' = p + \rho_0 g z$.
2.  crire les conditions aux limites sur le champ de vitesse et de température sur les quatre parois.
3. En choisissant l'échelle caractéristique de vitesse réelle à la poussée d'Archimède $\phi_{V,ref} = \sqrt{g\beta\Delta TH}$, écrire les équations de Navier-Stokes et de l'énergie et les conditions aux limites sous forme adimensionnelle en faisant apparaître les nombres de Rayleigh (Ra) et de Prandtl (Pr) définis par :

$$Ra = \frac{\beta g \Delta T H^3}{\nu \alpha} \quad \text{et} \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (6)$$

avec $\nu = \mu/\rho$ la viscosité cinématique et $\alpha = \lambda/(\rho c_p)$ la diffusivité thermique. Pour des nombres de Rayleigh inférieurs à 10^8 l'écoulement reste laminaire et stationnaire.

2.2 Résolution du problème

Après avoir défini la géométrie et créé le maillage, la résolution des équations modèles se fera avec le logiciel Ansys-Fluent. On consid rera de l'air dont les propriétés thermophysiques à $T = T_0 = 273.475$ K et pour une pression de 1 atm (101325 Pa) sont :

- la masse volumique $\rho = 1.293$ kg/m³
- la viscosité dynamique $\mu = 1.72 \times 10^{-5}$ kg/m/s
- la conductivité thermique $\lambda = 2.4338 \times 10^{-2}$ W/m/K
- la capacité calorifique $c_p = 1004.65$ J/kg/K
- et le coefficient d'expansion thermique $\beta = 1/T_0 \simeq 3.6566413 \times 10^{-3}$ K⁻¹

Les autres paramètres du système sont les dimensions de la géométrie et la valeur de l'écart de température. On vérifiera que, pour une cavité de 1 cm et un écart de température ΔT de 6.95 K, on a un nombre de Rayleigh $Ra = 10^3$ et que le nombre de Prandtl $Pr = \nu/\alpha = 0.71$.

1. Cr  r une géométrie carrée avec l'outil DesignModeler (le choix de la cote est libre).
2. Faire un premier maillage 40×40 avec l'outil Meshing et nommer les 4 faces (ou arrêtes) sur lesquelles les conditions aux limites seront appliquées.
3. Résoudre le problème sous Fluent en faisant attention
 -   vérifier que vos paramètres de calcul correspondent bien à la configuration $Ra = 10^3$ et $Pr = 0.71$
 -   la prise en compte de la gravité $g = 9.81$ m/s².
 -   l'hypothèse de Boussinesq et sa température de référence T_0 .
 - au choix du solveur temporel lors de la résolution : cherche-t-on une solution stationnaire ou instationnaire ?

2.3 Analyse des résultats

Un fois le calcul convergé à la précision machine (soit des résidus autour de 10^{-15}), les champs de vitesse et température peuvent être analysés. Du champ de vitesse, on extraira les valeurs maximales de chaque composante u et w respectivement sur les axes médians vertical ($x = H/2, z$) et horizontal ($x, z = H/2$).

Du champ de température, on calculera le nombre de Nusselt, qui est le rapport des transferts convectif et diffusif, et qui est défini par $Nu = hH/\lambda$. A la paroi (indice p et de normale extérieure \vec{n}), le flux total est égal au flux conductif. On a donc

$$h(T_p - T_{ref})\vec{n} = -\lambda \vec{\nabla} T \Big|_p \quad (7)$$

avec \vec{n} la normale à la paroi, T_{ref} une température de référence et h le coefficient d'échange global. Le rapport h/λ se réécrit, pour la paroi gauche : $h/\lambda = \partial_x T|_p / (T_p - T_{ref})$ ce qui permet d'écrire le nombre de Nusselt en fonction de T , de sa dérivée et de valeurs de références H et T_{ref} :

$$Nu = \frac{hH}{\lambda} = \frac{H \frac{\partial T}{\partial x}}{T_p - T_{ref}} \Big|_p \quad (8)$$

Le tableau 1 donne, pour plusieurs valeurs du nombre de Rayleigh et pour un nombre de Prandtl $Pr = 0.71$, les valeurs maximales des composantes de la vitesse, leurs positions ainsi que la valeur moyenne du nombre de Nusselt \overline{Nu} sur la paroi chaude.

Ra	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8
maillage	41^2	41^2	41^2	73^2	81^2	129^2
$u_{\max}(1/2, z)/(\alpha/H)$	3.634	16.18	34.8	64.8	148.6	321.9
z/H	0.81	0.82	0.85	0.85	0.88	0.93
$w_{\max}(x, 1/2)/(\alpha/H)$	3.7	19.5	68.6	220.6	699.2	2222.0
x/H	0.18	0.12	0.066	0.038	0.021	0.012
\overline{Nu}	1.116	2.242	4.523	8.825	16.523	30.225

TABLE 1 – Résultats obtenus par [1] ($Ra = 10^3$ à 10^5) et [2].

1. Pour prendre en main le logiciel, observez les différents champs, comparez les à ceux des références [1, 2], entraînez-vous à tracer des profils, explorer les différents outils de post-traitement qui sont à votre disposition.
2. Vérifiez dans un premier temps que vous approchez les valeurs de références à $Ra = 10^3$.
3. Faites une convergence en maillage sur les différentes grandeurs de références qui sont données dans le tableau 1. Pour cela, relevez dans un tableau les différentes variables du tableau 1 ainsi que la vitesse moyenne (en norme L_2 ou ∞) $\|\vec{u}\|$ et la pression moyenne \bar{p} dans la cavité en fonction du maillage.
4. Vérifiez que vous approchez les résultats de références pour des nombres de Rayleigh plus élevés (par ex. $Ra = 10^6$). Il sera peut être nécessaire de raffiner le maillage à proximité des parois.
5. Toujours pour $Ra = 10^6$, tracer, pour différents maillages le profil de vitesse u en fonction de z et pour $x = H/2$.

Références

- [1] G. de Vahl Davis. Natural convection in air square cavity : a benchmark numerical solution. *Int. J. Numer. Meth. Fl.*, 3 :249–264, 1983.
- [2] Patrick Le Quéré. Accurate solutions to the square thermally driven cavity at high Rayleigh number. *Comput. Fluids*, 20 :29–41, 1991.

3 TP 2 A : Écoulements turbulents autour d'un profil d'aile

Dans le cadre de ce TP, une étude d'un écoulement 2D, laminaire et incompressible autour d'un profil aérodynamique symétrique de type NACA0020 à faible nombre de Reynolds ($Re = 5.5 \times 10^4$) est envisagée. L'écoulement considéré est supposé être stationnaire. Cependant, il est opportun de faire un cas instationnaire (plus de détails plus loin dans le document).

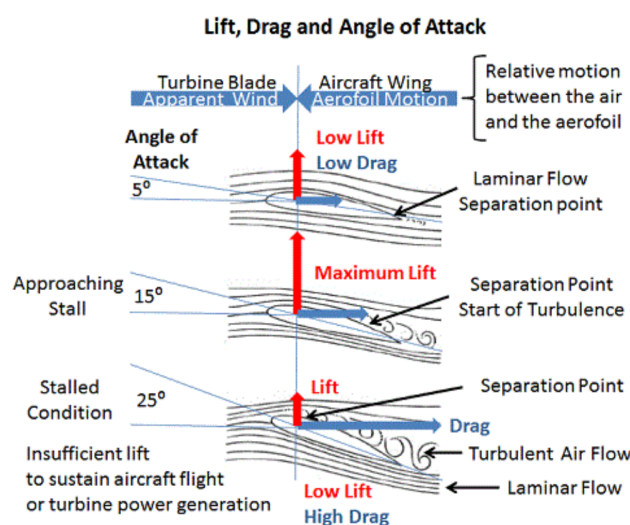
Par ailleurs, il s'agit de déterminer l'influence de l'angle d'incidence sur les performances aérodynamiques et par conséquent de déterminer l'angle critique de décrochage où le coefficient de portance, C_D , diminue brusquement et le coefficient de traînée, C_D , augmente. La modélisation numérique de ce problème est assurée par le logiciel commercial ANSYS-Fluent.

Ce TP a trois objectifs :

1. construire des maillages multi-blocs structurés 2D avec le meilleur Meshing (DesignModeler),
2. étudier les différents régimes d'écoulements turbulents en aval d'une aile d'avion, à l'aide des résultats de la littérature et de ceux calculés avec Fluent.
3. étudier l'influence de l'angle d'attaque sur l'écoulement et les forces.

Le compte rendu fera l'objet d'une soutenance dans laquelle un fichier de présentation en pdf fera apparaître les comparaisons avec les résultats de la littérature [1, 2]. A chaque résultat (valeur, courbe ou champ) devra être associé les paramètres utilisés. Une attention particulière sera portée sur les aspects numériques : une étude de la convergence des calculs (en espace, en temps et en fonction de la valeur des résidus) sera fortement appréciée. Le choix des méthodes devra être commenté (par exemple, une comparaison des résultats obtenus avec des schémas du premier et second ordre pourra être présentée).

3.1 Description des différents régimes d'écoulements autour d'un cylindre



(a) $Re > 1M$

FIGURE 1 – Les différents types d'écoulements autour d'un profil d'aile d'avion [3].

3.2 Simulation avec Fluent d'un écoulement autour d'un profil d'aile

3.2.1 Description et données du problème

Tout d'abord, il faut générer le profil sur internet : NACA 4 digit airfoil generator (0, 0, 20, 200 points) – plot – send to airfoil plotter. Ensuite, sur airfoil plotter, mettre 1000 mm pour avoir un profil de taille de 1 m, – plot – csv file of coordinate. Une fois sur excel, il faut ajouter des colonnes : nombre de groupe 1 partout, points – numéroter les points de 1 à 200, ensuite les coordonnées x, y obtenue sur plotter, et la fin ajouter la colonne coordonnées z en mettant tout à 0, 2d plot.

Dans le DesignModeler, importez les coordonnées du profil d'aile à partir du fichier WingCoordinate.txt sur e-learning, pour ce faire :

1. **Importer le profil d'aile :**
2. Concept : Courbe 3D, voir détail : Fichier de coordonnées (sélectionner le fichier (WingCoordinate.txt) qui contient les coordonnées de profil) puis Générer. Assurez-vous d'avoir coordinates unit à *millimètre*.
3. pour une meilleure visualisation : (i) view – cross section alignement – désactivé. (ii) pour mieux voir le profil, vous pouvez changer la couleur des bords (edge) : view – graphics option – edge coloring – black.
4. Concept : Surface à partir d'arête, voir détail, Arêtes (sélectionner l'arête de profil et la ligne), Appliquer, Générer.
5. dans les bodies and parts : désactivé la ligne (le corps filaire) puisqu'on n'en a pas besoin. On a juste besoin de la surface.
6. **Créer le domaine de travail de type C-Maillage :**
7. plan XY : Nouvel Esquisse, Esquisse devant modélisation, Dessiner, des segments de hauteur autour de l'aile.
8. Dessiner, Arc par 3 points et relier les deux points extrême avec le Rayon 20m).
9. les segments sont de 20m de hauteur (important!!!), et de 10m de longueur. Les deux segments de 10 m doivent être symétriques à l'axe x .
10. Concept, Surface à partir d'Esquisse, voir détail : (Objet de Base Esquisse 1 : Appliquer, Générer.
11. Créer, Booléenne : (Opération : Soustraire ; Corps cibles : sélectionner la face du domaine de travail, Appliquer ; Outils Corps : sélectionner la face du profil aérodynamique : Appliquer), Générer,
12. Garder cette géométrie – tools : freeze.
13. **Subdiviser le domaine de travail pour le maillage**
14. plan XY, Nouvel Esquisse, Esquisse, Dessiner : Ligne (tracer des ligne horizontale qui coupe le domaine de travail voir la figure 2 : (i) deux lignes vers la fin du profil d'aile (distance de l'axe y a ces lignes = 1 m), (ii) deux au centre vers le point le plus haut ou plus bas du profil d'aile, (iii) une ligne horizontale de bout à bout de toute la géométrie.
15. Concept, Ligne à partir d'Esquisse, Voir détail (Objet de Base Esquisse 2 : Appliquer – Opération : Ajouter un corps bloquer), Générer.
16. Pour subdiviser en plusieurs surfaces, deux méthodes existent : (1) Outils : face split – et sélectionner les lignes.
(2) Outils, Projection – edge on face, sélectionner toutes les lignes – Appliquer ; Cible (target) : Face de domaine de travail, Générer.

17. désactivé la ligne (le corps filaire) encore une fois

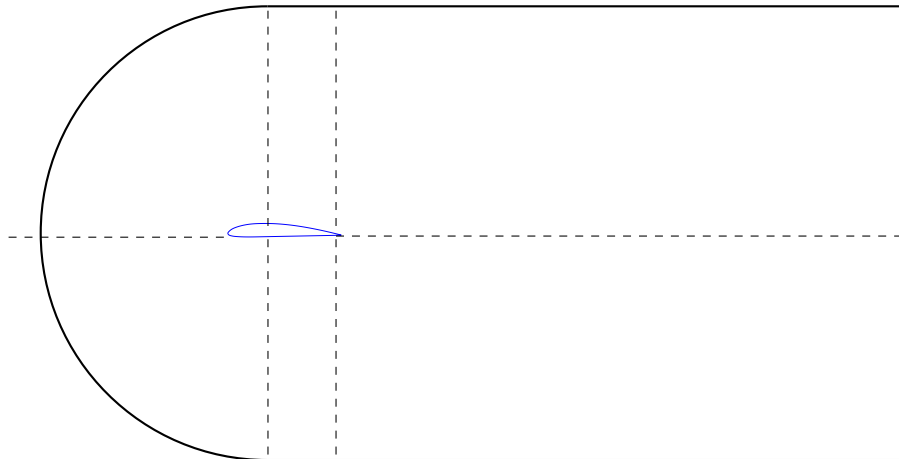


FIGURE 2 – Géométrie NACA 0020 dans DesignModeler

On souhaite étudier un écoulement d'air, dont les caractéristiques physiques et géométriques sont les suivantes :

- Écoulement incompressible ($Ma < 0.3$)
- masse volumique : $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$,
- viscosité dynamique : $\mu = 1,81 \times 10^{-5} \text{ kg/m/s}$,
- longueur : $L = 1 \text{ m}$,
- vitesse : $u = 88.65 \text{ m/s}$
- nombre de Mach : $Ma = 0.258$

Model de turbulence (Spalart-Allmarus)

- Le calcul peut être fait : [en ligne](#)
- $Y^+ < 1$ pour résoudre l'effet de la paroi
- $Y^+ = \frac{\rho u_*^2 y}{\mu}$, pour plus d'information : [voir ici](#)
- $Y \leq 4.5 \times 10^{-6} \text{ m}$,

3.2.2 Construction du maillage

1. Conditions aux limites

- bouton droit de la souris sur l'arête de l'arc, cliquer sur sélection nommée (sélection nommée : velocity-inlet).
- bouton droit de la souris sur l'arête de sortie, et cliquer sur sélection nommée (sélection nommée : pressure-outlet)
- bouton droit de la souris sur l'arête de profil aérodynamique, et cliquer sur sélection nommée (sélection nommée : wall-wing)

La première étape du travail consiste à construire, en s'aidant de la figure 10, un premier maillage de 6 monoblocs structurés, ce qui permettra de contrôler correctement le raffinement du maillage près de la paroi du profil d'aile (voir figure 10). ce maillage comprend $N_x \times N_y = 300$ mailles. La stratégie à adopter pour la construction de la géométrie pourra être la suivante : à partir de la figure 10, après avoir construit la géométrie dans **DesignModeler** et après avoir créé les 6 monoblocs. Ils devront ensuite être regroupés dans un même corps et le "corps filaire" ayant servi au découpage pourra être désactivé.

Instructions de maillage : (i) pour les lignes à 150 mailles, comportement : hard, Type biais, Facteur de biais : $5e + 5$). (ii) pour les lignes à 100 mailles, comportement : hard, Type biais, Facteur de biais : 1000). (iii) pour les lignes à 300 mailles, comportement : hard, pas de biais. (Répéter cette étape avec les autres arêtes verticales et horizontales en inversant le sens dans le biais) (iv) pour les courbes externes et interne (du profil) mettez 100 mailles, comportement : hard, pas de biais. N'oubliez pas le maillage de face en sélectionnant les 6 faces.

Le maillage terminé, on imposera des conditions aux limites ouvertes de type **velocity-inlet**, **symmetry** et **pressure-outlet** sur les frontières du domaine de calcul, et de type **wall** sur l'obstacle cylindrique (cf. figure 10 pour positionner correctement les conditions aux limites).

En suivant les étapes précédentes, effectuer un second maillage plus raffiné comprenant $N_x \times N_y = 180 \times 140$ cellules, avec 120 cellules (4 fois 30 cellules) réparties uniformément sur le périmètre du cylindre. Les calculs avec Fluent seront effectués pour les deux maillages. La précision des résultats obtenus et les couts en temps de calculs seront comparés.

Un troisième maillage pourra être proposé et utilisé pour tester la convergence des calculs.

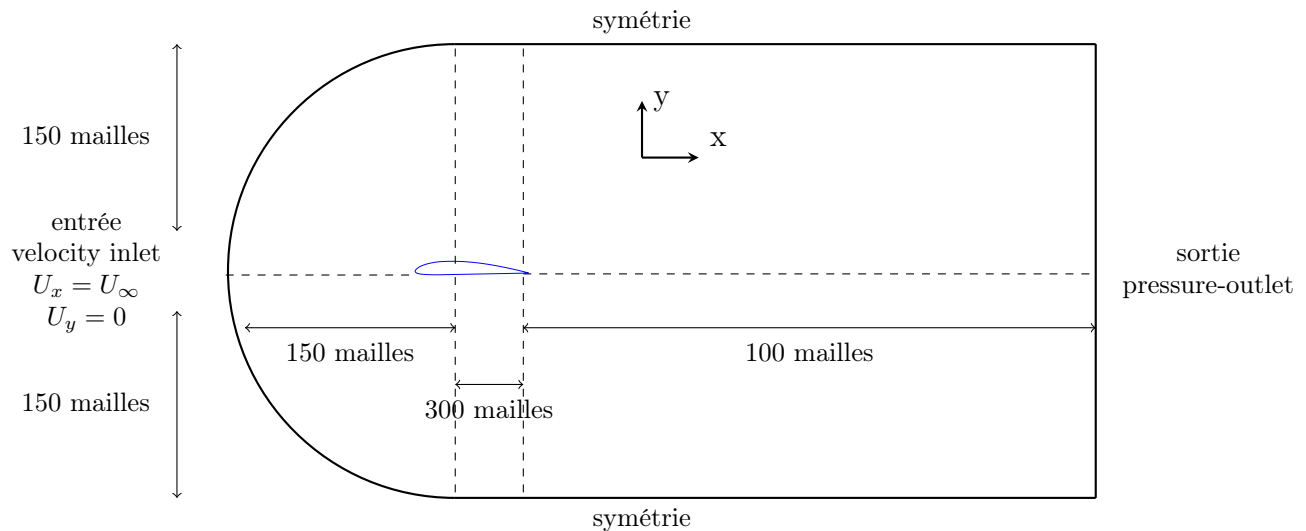


FIGURE 3 – Données nécessaires à la construction du domaine de calcul

3.2.3 Simulation Fluent

Ouvrir la fenêtre CFD-Fluent en cliquant sur configuration :

1. **Model** : Viscous-turbulent, pour commencer, vous choisissez le modèle Spalart-Allmarus – strain/vorticity-Based – curvature correction, pour les calculs et compte rendu traitez plutôt avec le modèle $k - \omega$ SST iscid, Ok
2. **Materials** : Air, Create/Edit avec les propriétés physiques données, Change/Create
3. **Boundary Condition** : Inlet (Inlet=Velocity Inlet), Edit (Velocity Specification Method = Magnitude and direction) (X-component= 0.9975 – Y-component= 0.06975) (ces composantes proportionnelles à un angle d'incidence de 4°) ; turbulent viscosity ratio = 1 (même viscosité que laminaire). Vérifier ce rapport et mettez le même pour la sortie.
4. **Reference Values** : (Compute From = Inlet)
5. **Solution** : Coupled Solution Methods, Momentum, Second Order Upwind
6. Solution, Solution Controls, under relaxation factors, Pressure = 0.5 – Momentum = 0.5

7. Solution, Monitors - Residuals , Absolute Criteria = 1e-6 pour la continuité.
8. Solution, Rapport definition : définissez les coefficients de portance et de traînée.
9. Solution, Hybrid initialization.
10. Solution, Run Calculation (Number of Iterations = 5000), Calculate
11. **Résultats (Calcul de coefficients aérodynamiques)**
12. **Results** : Reports, Forces, Set Up (pour calculer le coefficient de traînée $X = 0.9975 - Y = 0.06975$), Print Répéter les mêmes étapes pour calculer le coefficient de portance en changeant ($X = -0.06975 - Y = 0.9975$)

Refaire la simulation pour les angles de 0 à 16 par pas de 2, puis par pas de 5 de 20 jusqu'à 45, présentez les résultats dans un tableau, et tracer les courbes suivantes : $C_d(\alpha)$, $C_l(\alpha)$ et $C_p(\alpha)$. Interpréter ces courbes.

Les résultats seront réalisés pour des nombres de Reynolds de 5000, 1.1M 6M

3.3 Annexes

3.3.1 Force de l'écoulement sur l'obstacle

Les efforts de traînée subis par l'objet sont alors essentiellement dus au déséquilibre des pressions autour de l'obstacle. Le frottement du fluide sur les parois contribue de manière négligeable au bilan de ces forces. Ainsi, la force totale exercée sur un obstacle se décompose en une force de traînée (\vec{D}) parallèle à la direction de l'écoulement et une force de portance (\vec{L}) perpendiculaire à l'écoulement (Fig. 4).

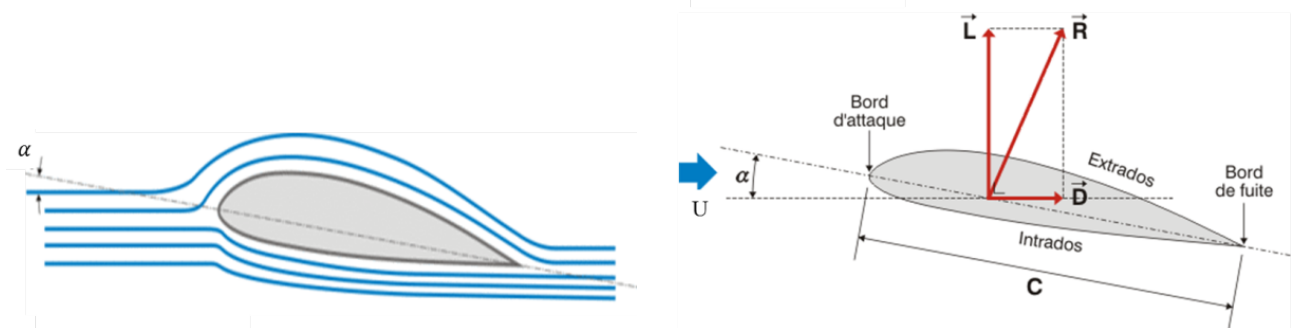


FIGURE 4 – Écoulement autour d'un profil d'aile (NACA 0020)

Ces forces dépendent étroitement de la géométrie du corps immergé. Pour des raisons évidentes de symétrie, la portance sur le cylindre est nulle. Au contraire, un profil d'aile présente un extrados le long duquel l'écoulement est accéléré. Ainsi, la différence de pression entre les faces de l'aile crée une force de portance, alors que la force de traînée tend à entraîner l'obstacle avec l'écoulement.

Puisque ces forces dépendent à la fois des caractéristiques du fluide et des dimensions de l'obstacle, on préfère en aérodynamique travailler avec deux coefficients adimensionnels que sont le coefficient, C_D , de traînée (Drag) et le coefficient, C_L , de portance (Lift) :

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 d}; \quad C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 d} \quad (9)$$

avec :

Re	10^{-2}	10^{-1}	1	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
C_x	400	60	11	3	1,2	1,1	1,12	1,23	0,4	0,6

TABLE 2 – Coefficient de traînée et fonction du nombre de Reynolds

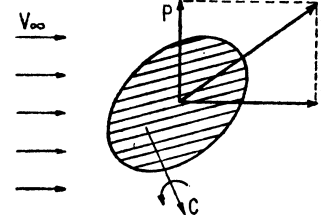
- d la longueur caractéristique de la maquette considérée.
- D et L la traînée et la portance par unité d'envergure de l'obstacle considéré.
- U la vitesse de l'air en amont de l'obstacle et ρ sa masse volumique.

3.3.2 Rappels sur les coefficients de traînée C_x et de portance C_y

Un fluide, de masse volumique ρ , en mouvement dans la direction x , qui possède une vitesse U_∞ loin d'un obstacle, exerce sur cet obstacle un système de forces qui peut se réduire à une force F et à un couple C (cf. figure). La composante de F selon x s'appelle la force de traînée T et la composante de F dans la direction y perpendiculaire à l'écoulement s'appelle la force de portance P . Les forces de traînée et de portance peuvent s'exprimer comme suit :

$$T = \frac{1}{2} C_x \rho S U_\infty^2$$

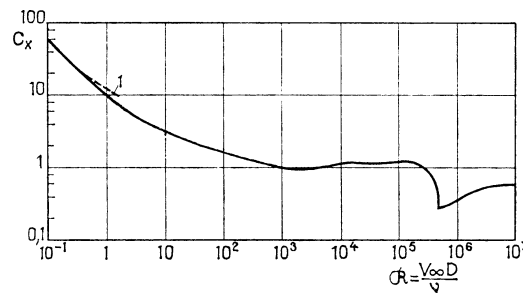
$$P = \frac{1}{2} C_y \rho S U_\infty^2$$



où :

- C_x est le coefficient de traînée, encore appelé "drag coefficient" et noté C_d en anglais,
- C_y est le coefficient de portance, encore appelé "lift coefficient" et noté C_l en anglais,
- S est le maître-couple : c'est l'aire de la surface de l'obstacle projetée sur un plan perpendiculaire à la direction x de l'écoulement (S est homogène à $[L]^2$).

Pour des fluides à $\rho = \text{cste}$, C_x et C_y sont fonction de la géométrie de l'obstacle, de la rugosité de paroi, de la viscosité du fluide et du nombre de Reynolds. On présente sur les figures 11 et 12 ainsi que dans le tableau 3 des résultats numériques et expérimentaux donnant $C_x = f(Re)$ dans le cas d'obstacles lisses cylindriques.


 FIGURE 5 – Valeurs numériques et tracé du coefficient de traînée C_x en fonction du nombre de Reynolds Re pour un obstacle cylindrique lisse de longueur infinie (résultats expérimentaux [1])

3.3.3 Définition du nombre de Strouhal

Le nombre de Strouhal est un paramètre adimensionnel défini par $St = Df/U_\infty$, où f est la fréquence de passage des tourbillons de l'allée de Bénard-Karman, D est le diamètre du cylindre et où U_∞ est la vitesse établie loin de l'obstacle. On présente sur les figures 12 des résultats

numériques et expérimentaux donnant $St = f(Re)$ et $C_x = C_d = f(Re)$ dans le cas d'obstacles cylindriques.

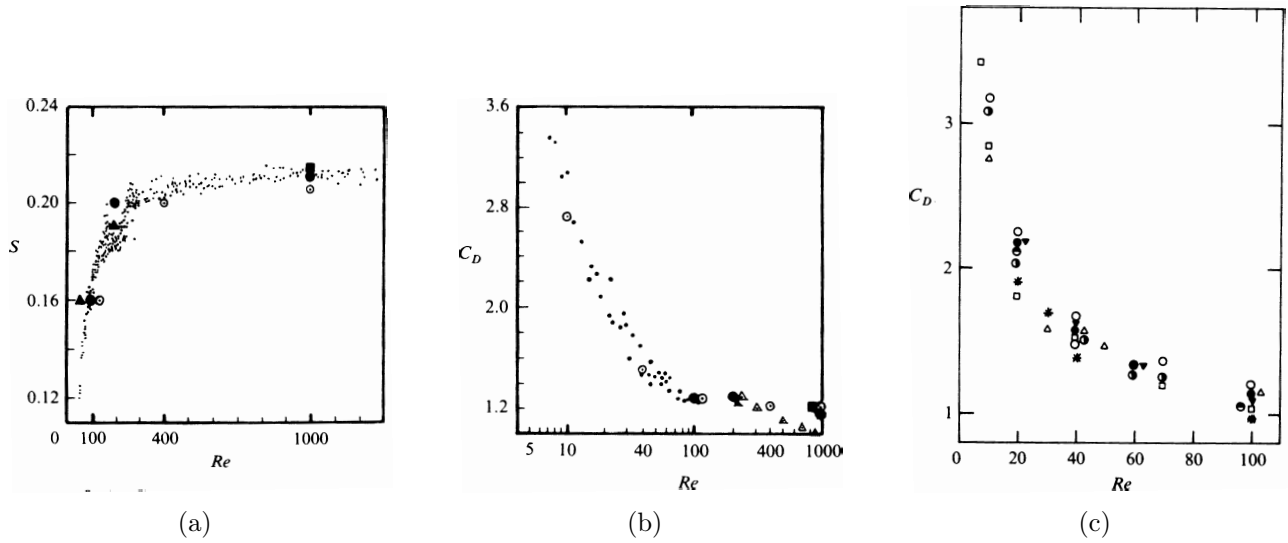


FIGURE 6 – Nombre de Strouhal St et coefficient de trainée C_x en fonction du nombre de Reynolds pour un obstacle cylindrique lisse de longueur infinie (résultats numériques et expérimentaux [2])

Références

- [1] R. Comolet, Mécanique expérimentale des fluides, Tome II, Edition Masson
- [2] M. Braza, P. Chassaing et H. Ha Ming, Numerical study and physical analysis of the pressure and velocity fields in the near wake of a circular cylinder, J. Fluid Mech., vol. 165, pp. 79-130 (1986).
- [3] J. Kim *et al*, Numerical Investigation of Jet Angle Effect on Airfoil Stall Control, Appl. Sci. 2019.

4 TP 2 : Écoulements laminaires autour d'un obstacle

Ce TP a trois objectifs :

1. construire des maillages multi-blocs structurés 2D avec le meilleur Meshing ,
2. étudier un problème instationnaire,
3. étudier les différents régimes d'écoulements laminaires en aval d'un obstacle cylindrique, à l'aide des résultats de la littérature et de ceux calculés avec Fluent.

Le compte rendu fera apparaître les comparaisons avec les résultats de la littérature [1, 2]. A chaque résultat (valeur, courbe ou champ) devra être associé les paramètres utilisés. Une attention particulière sera portée sur les aspects numériques : une étude de la convergence des calculs (en espace, en temps et en fonction de la valeur des résidus) sera fortement appréciée. Le choix des méthodes devra être commenté (par exemple, une comparaison des résultats obtenus avec des schémas du premier et second ordre pourra être présentée).

4.1 Description des différents régimes d'écoulements autour d'un cylindre

L'écoulement autour d'un cylindre de longueur infinie est un problème de base en mécanique des fluides. Il a fait l'objet de très nombreux travaux (voir par exemple les références [1, 2]). Les transitions entre les différents régimes d'écoulements à l'aval du cylindre et la caractérisation quantitative de ces différents régimes sont très bien connues aujourd'hui. Si $Re = UD/\nu$ est le nombre de Reynolds basé sur la vitesse U de l'écoulement établi loin du cylindre, sur le diamètre D du cylindre et sur la viscosité cinématique ν du fluide, on sait que :

- pour $Re < 5$, l'écoulement autour du cylindre se fait sans décollement des lignes de courant (cf. figure 7(a)) ;
- pour $5 < Re < 40$, il apparaît un décollement laminaire symétrique des lignes de courant à la surface du cylindre avec formation à l'aval d'un sillage contenant deux tourbillons stationnaires. Les variations en fonction de Re de la longueur L du sillage, de l'angle θ donnant la position du décollement, et du coefficient de traînée C_x sont parfaitement connues (cf. annexe 4.3.1, et figures 7(b), 8, 9(a), 11 et 12) ;
- pour $40 < Re < 150$ à 300, il y a formation d'une allée très régulière de tourbillons périodiques alternés appelée allée de Bénard-Karman. L'angle de décollement θ , C_x et la fréquence f des tourbillons, donnée en général par le nombre de Strouhal St (cf. section 4.3.2), sont là aussi parfaitement connus (cf. figures 7(c), 9(c), 11 et 12) ;
- pour $Re > 300$, l'allée de Bénard-Karman devient irrégulière (cf. figure 7(d)), puis turbulente à partir de $Re_{c_1} > 2 \times 10^5$ (cf. figures 7(e) et 7(f)). Là aussi, θ et C_x sont connus.

4.2 Simulation avec Fluent d'un écoulement autour d'un obstacle cylindrique

4.2.1 Données du problème

On souhaite étudier un écoulement d'air, dont les caractéristiques physiques sont les suivantes :

- masse volumique : $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$,
- viscosité dynamique : $\mu = 1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m/s}$,
- viscosité cinématique : $\nu = 1,4607 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$,

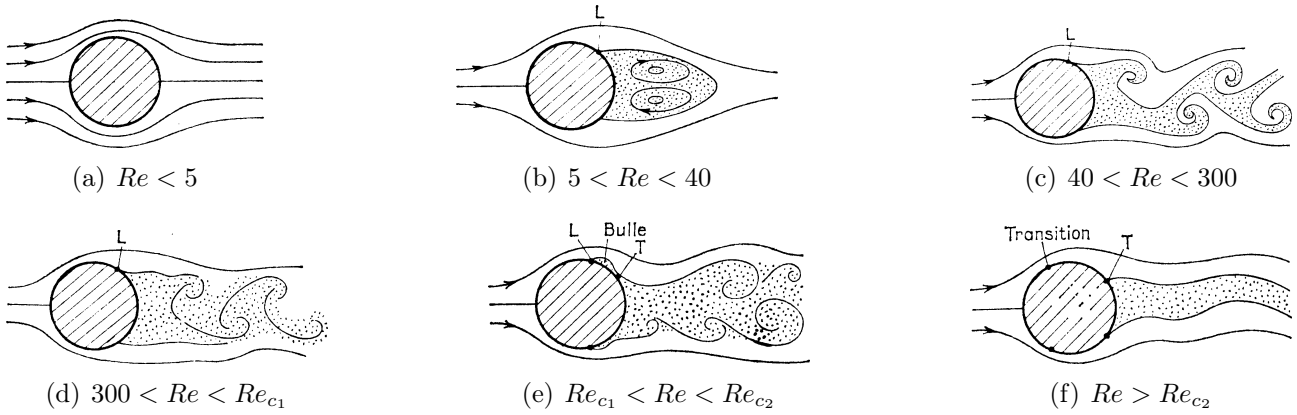


FIGURE 7 – Les différents type d'écoulements autour d'un cylindre (lignes d'émission) [1]. L est le point de décollement laminaire et T le point de décollement turbulent. (a) Écoulement laminaire visqueux non décollé; (b) Décollement laminaire symétrique; (c) Allée tourbillonnaire de Bénard-Karman; (d) Écoulement subcritique; (e) Écoulement critique; (f) Écoulement supercritique

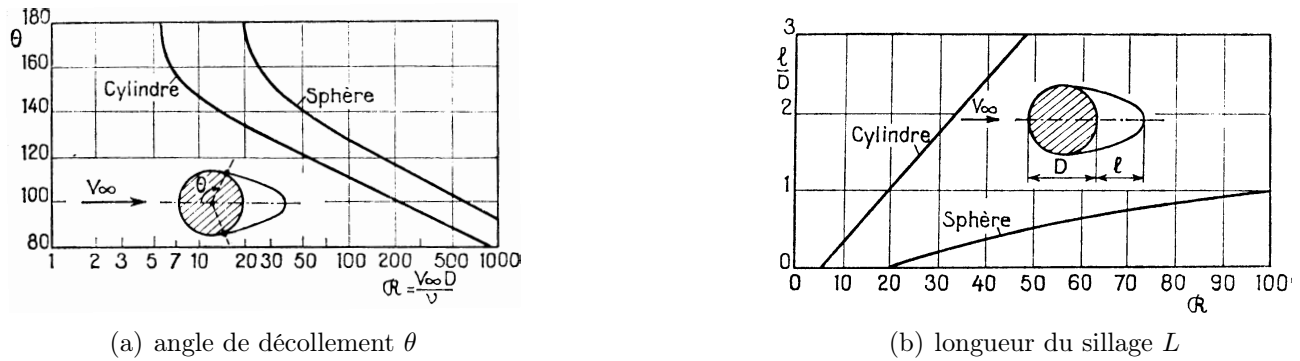
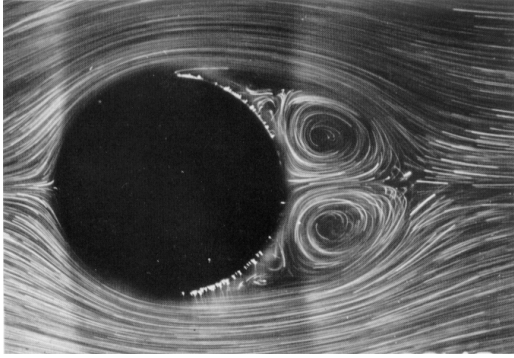


FIGURE 8 – Variation en fonction du nombre de Reynolds de (a) l'angle de décollement et (b) de la longueur L du sillage tourbillonnaire, dans le cas d'un cylindre infini et d'une sphère (tiré de [1]).

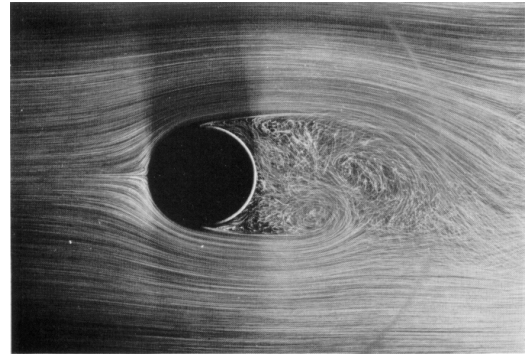
autour d'un obstacle cylindrique de 10 centimètres de diamètre ($D = 10$ cm), pour les nombres de Reynolds $Re = 20$ (écoulement laminaire stationnaire symétrique) et $Re = 100$ (écoulement laminaire instationnaire non symétrique), c'est à dire pour $U_\infty = 0,29214$ cm/s et $1,4607$ cm/s.

4.2.2 Construction du maillage

La première étape du travail consiste à construire, en s'aidant de la figure 10, un premier maillage relativement grossier de longueur et de hauteur basée sur le diamètre du cylindre (voir figure 10) comprenant $N_x \times N_y = 95 \times 88$ mailles avec 64 mailles (4 fois 16 cellules) réparties uniformément sur le périmètre du cylindre. Chaque direction du maillage est scindée en 3 segments et le périmètre du cylindre en 4 arcs afin de construire un maillage constitué de 8 monoblocs structurés, ce qui permettra de contrôler correctement le raffinement du maillage près de la paroi du cylindre. On aura intérêt à placer le centre du repère servant à la construction de la géométrie au centre du cylindre. La stratégie à adopter pour la construction de la géométrie pourra être la suivante : à partir de la figure 10, on construit la géométrie dans DesignModeler. On utilise ensuite les fonctions **Lignes à partir d'esquisse** et **Surface à partir de lignes** pour créer les huit monoblocs. Ils devront ensuite être regroupés dans un



(a) Écoulement autour d'un cylindre au démarrage. Formation des tourbillons. Visualisation par bulles ou tunnel hydrodynamique (cliché ONERA). (L'écoulement s'effectue de gauche à droite)



(b) Écoulement autour d'un cylindre en régime permanent $Re < Re_{c1}$. Visualisation par bulles ou tunnel hydrodynamique (cliché ONERA). (L'écoulement s'effectue de gauche à droite)



(c) Allée tourbillonnaire de Bénard-Karman se formant derrière un cylindre. Cylindre circulaire entraîné dans de l'eau au repos. (Cliché Dr Wille, Derlin)

FIGURE 9 – Variation en fonction du nombre de Reynolds de (a) l'angle de décollement et (b) de la longueur L du sillage tourbillonnaire, dans le cas d'un cylindre infini et d'une sphère (tiré de [1]).

même corps et le “corps filaire” ayant servit au découpage pourra être désactivé.

Le maillage terminé, on imposera des conditions aux limites ouvertes de type `velocity-inlet`, `symmetry` et `outflow` sur les frontières du domaine de calcul, et de type `wall` sur l'obstacle cylindrique (cf. figure 10 pour positionner correctement les conditions aux limites).

En suivant les étapes précédentes, effectuer un second maillage plus raffiné comprenant $N_x \times N_y = 180 \times 140$ cellules, avec 120 cellules (4 fois 30 cellules) réparties uniformément sur le périmètre du cylindre. Les calculs avec Fluent seront effectués pour les deux maillages. La précision des résultats obtenus et les couts en temps de calculs seront comparés.

Un troisième maillage pourra être proposé et utilisé pour tester la convergence des calculs.

4.2.3 Calcul de l'écoulement stationnaire laminaire à $Re = 20$ avec Fluent

L'objectif de cette partie est de déterminer la longueur L du sillage tourbillonnaire et le coefficient de trainée C_x et de les comparer aux données de la littérature pour un cylindre. En fonction du temps que vous disposerez, déterminez aussi L et C_x pour les écoulements sta-

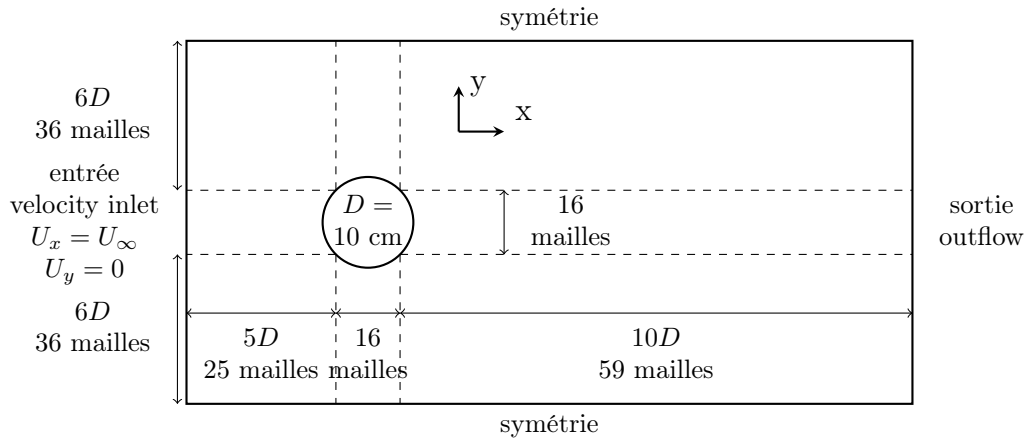


FIGURE 10 – Données nécessaires à la construction du domaine de calcul

tionnaires à $Re = 30$ et 40 (vous pouvez vous associer à un autre étudiant pour partager les calculs). Les différentes étapes pour mener à bien ce travail sont les suivantes :

1. Lancez Fluent et vérifiez que le maillage est correct avec Mesh/Check et visualisez-le par Display/Mesh.
2. Rentrez toutes les données du modèle dans les menus Define/
 - /Models/Solver : garder les valeurs par défaut ;
 - /Materials : garder les valeurs par défaut de ρ et μ ;
 - /Operating Conditions : garder les valeurs par défaut de la pression de référence ;
 - /Boundary Conditions : dans velocity-inlet, fixer la valeur de $U_x = 2,9214 \times 10^{-3}$ m/s en utilisant Velocity Specification Method = Magnitude And Direction.
 - vérifier que les paramètres choisis correspondent bien à la configuration physique souhaitée, ie. $Re = 20$.
3. Rentrez tous les paramètres du solveur dans les menus Solve/
 - /Controls/Solution : choisir PRESTO! pour la pression et SIMPLEC avec $\alpha_p = 1$ et $\alpha_v = 0,7$;
 - /Initialize/Initialize : fixer Gauge-P à 0 Pascal et X-Velocity tel que $U_x = 2,9214 \times 10^{-3}$ m/s ;
 - /Monitors/Residual : fixer les résidus souhaités
 - /Monitors/Force : sélectionner Options=Plot, Coefficient=Drag et Wall-Zones=wall ; aller ensuite dans le menu Report/Reference Values pour changer la valeur de la vitesse et de la surface de référence : fixer Velocity = $2,9214 \times 10^{-3}$ m/s et Surface = $0,1 \text{ m}^2$;
4. Sauvegardez toute la configuration du modèle et du solveur avec File/Export/Case dans un fichier *.cas. (Les fichiers *.cas comprennent le maillage et l'ensemble des paramètres physiques et numériques de la simulation. Les fichiers *.dat(.gz) sont les champs calculés pour l'itération enregistrée).
5. Lancer 100 itérations dans le menu Solve/Iterate. Vérifiez l'évolution des résidus et du coefficient de trainée C_d (d pour drag, aussi noté C_x). Vérifiez la conservation du débit avec Report/Fluxes/Mass Flow Rate. Améliorer la convergence et la précision de la solution en jouant sur les coefficients de sous-relaxation et l'ordre du schéma de discrétisation (prendre Second Order Upwind dans Solve/Controls/Solution) et en baissant les critères de convergence dans Solve/Monitors/Residual. Visualisez les champs obtenus (Display/Velocity Vectors et Display/Contours).

6. Sauvegardez toutes les données et les champs calculés (sauvegarde du projet)
7. Déterminez la longueur L du sillage tourbillonnaire en dessinant avec Plot/XY puis Plot la courbe donnant la composante horizontale de la vitesse le long de l'axe médian à mi-hauteur du domaine de calcul. Pour cela, il faudra avoir défini au préalable la ligne médiane dans le menu Surface/Iso-Surface et en donnant un nom à cette ligne dans New Surface Name. Vous pouvez exporter la courbe dans un fichier (avec write dans Plot/XY Plot) et relire ce fichier (après avoir enlevé les en-têtes propres à Fluent) avec les logiciels Qtgrace ou gnuplot.

4.2.4 Calcul de l'écoulement instationnaire laminaire à $Re = 100$ avec Fluent

L'objectif de cette partie est de déterminer l'évolution temporelle des coefficients de trainée C_x (ou C_d) et de portance C_y (ou C_l , l pour lift) (valeur moyenne, amplitude et fréquence des oscillations), de calculer le nombre de Strouhal St et de comparer ces grandeurs aux données de la littérature. En fonction du temps dont vous disposerez, vous pourrez déterminer C_x , C_y et St pour le même écoulement à $Re = 200$. Les différentes étapes pour mener à bien ce travail sont les suivantes :

1. L'établissement de l'écoulement avant le détachement du premier tourbillon étant très lent, pour gagner du temps, faites converger la solution à $Re = 100$ par un calcul stationnaire.
2. Cette étape achevée, dans Define/Models/Solver, choisir Unsteady (1st order implicit) et dans Solve/Controls/Solution, choisir PRESTO ! pour la pression, le schéma 2^{nd} order upwind et PISO avec $\alpha_p = 0,9$ et $\alpha_v = 0,9$.
3. Permettre l'affichage (plot) et l'écriture à l'écran (print) et dans un fichier (write) des coefficients de trainée et de portance dans Solve/Monitors/Force.
4. Définir dans le menu Surface/Point le point en $x = 70$ cm et $y = 0$ (sur l'axe horizontal) comme point d'enregistrement de la composante verticale de la vitesse au cours du temps. Pour cela aller dans Solve/Monitors/Surface.
5. Sauvegardez toutes les données avec File/Write/Case dans un nouveau fichier *.cas.
6. Lancer 200 itérations dans le menu Solve/Iterate avec un pas de temps $\Delta t = 0,5$ s pour le maillage grossier, mais sûrement avec Δt plus petit pour le maillage fin (pour éviter les problèmes de convergence). Vérifiez l'évolution des résidus et des grandeurs "monitorées" (C_x , C_y , Y-Velocity) et visualisez les champs obtenus. Les premières oscillations et la dissymétrie de l'écoulement devraient apparaître.
7. Sauvegardez toutes les données et les champs calculés avec File/Write/Case & Data et relancer 500 itérations (adaptez Δt si nécessaire). Il faut environ 600 secondes pour que l'allée de Bénard-Karman soit pleinement développée. Pensez à sauvegarder automatiquement les champs calculés en utilisant la commande File/Write/Autosave (mettre l'extension "flow time" au nom du fichier pour voir le temps écoulé pour chaque enregistrement).
8. Servez-vous de l'enregistrement au cours du temps de C_x , C_y ou U_y en $x = 70$ cm et $y = 0$ pour calculer le nombre de Strouhal. On mesurera la période de ces signaux à partir du moment où ils seront pleinement établis (amplitude et période constantes). On en déduira la fréquence puis St . On étudiera l'influence du pas de temps Δt sur ces valeurs.

Re	10^{-2}	10^{-1}	1	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
C_x	400	60	11	3	1,2	1,1	1,12	1,23	0,4	0,6

TABLE 3 – Coefficient de traînée et fonction du nombre de Reynolds

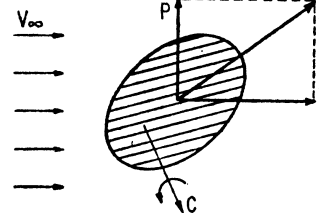
4.3 Annexes

4.3.1 Rappels sur les coefficients de traînée C_x et de portance C_y

Un fluide, de masse volumique ρ , en mouvement dans la direction x , qui possède une vitesse U_∞ loin d'un obstacle, exerce sur cet obstacle un système de forces qui peut se réduire à une force F et à un couple C (cf. figure). La composante de F selon x s'appelle la force de traînée T et la composante de F dans la direction y perpendiculaire à l'écoulement s'appelle la force de portance P . Les forces de traînée et de portance peuvent s'exprimer comme suit :

$$T = \frac{1}{2} C_x \rho S U_\infty^2$$

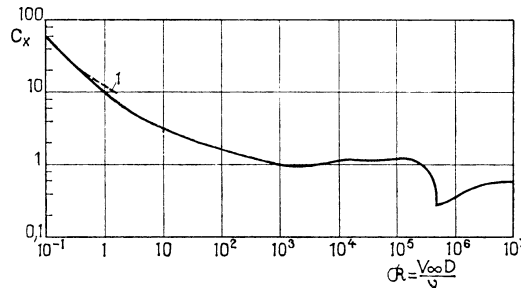
$$P = \frac{1}{2} C_y \rho S U_\infty^2$$



où :

- C_x est le coefficient de traînée, encore appelé "drag coefficient" et noté C_d en anglais,
- C_y est le coefficient de portance, encore appelé "lift coefficient" et noté C_l en anglais,
- S est le maître-couple : c'est l'aire de la surface de l'obstacle projetée sur un plan perpendiculaire à la direction x de l'écoulement (S est homogène à $[L]^2$).

Pour des fluides à $\rho = \text{cste}$, C_x et C_y sont fonction de la géométrie de l'obstacle, de la rugosité de paroi, de la viscosité du fluide et du nombre de Reynolds. On présente sur les figures 11 et 12 ainsi que dans le tableau 3 des résultats numériques et expérimentaux donnant $C_x = f(Re)$ dans le cas d'obstacles lisses cylindriques.


 FIGURE 11 – Valeurs numériques et tracé du coefficient de traînée C_x en fonction du nombre de Reynolds Re pour un obstacle cylindrique lisse de longueur infinie (résultats expérimentaux [1])

4.3.2 Définition du nombre de Strouhal

Le nombre de Strouhal est un paramètre adimensionnel défini par $St = Df/U_\infty$, où f est la fréquence de passage des tourbillons de l'allée de Bénard-Karman, D est le diamètre du cylindre et où U_∞ est la vitesse établie loin de l'obstacle. On présente sur les figures 12 des résultats numériques et expérimentaux donnant $St = f(Re)$ et $C_x = C_d = f(Re)$ dans le cas d'obstacles cylindriques.

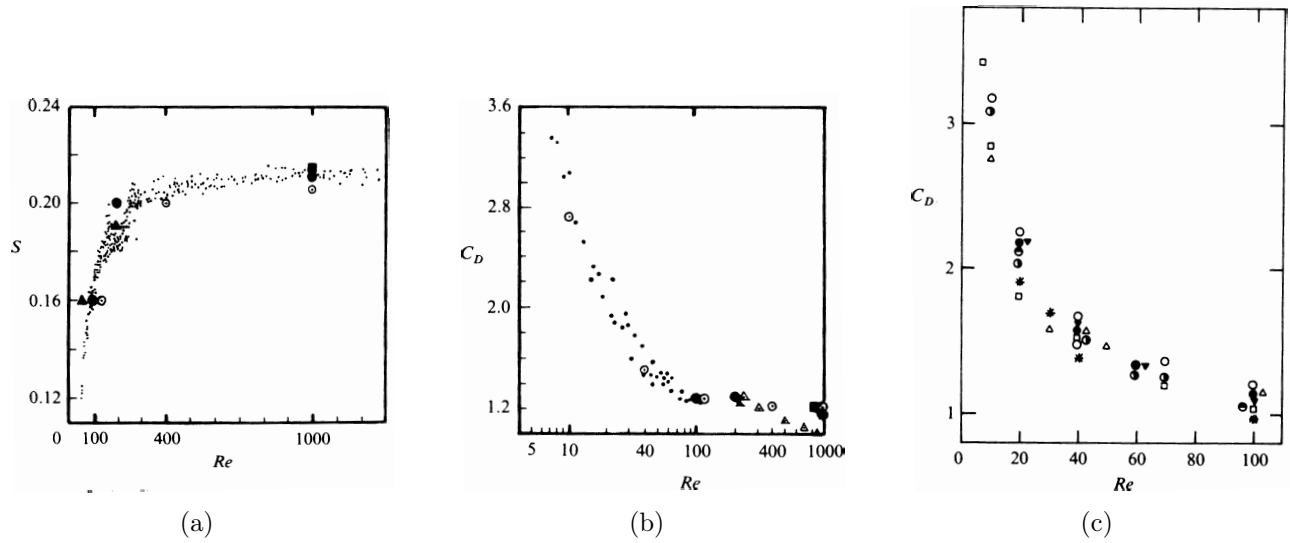


FIGURE 12 – Nombre de Strouhal St et coefficient de trainée C_x en fonction du nombre de Reynolds pour un obstacle cylindrique lisse de longueur infinie (résultats numériques et expérimentaux [2])

Références

- [1] R. Comolet, Mécanique expérimentale des fluides, Tome II, Edition Masson
- [2] M. Braza, P. Chassaing et H. Ha Ming, Numerical study and physical analysis of the pressure and velocity fields in the near wake of a circular cylinder, J. Fluid Mech., vol. 165, pp. 79-130 (1986).

5 TP 3 : Échangeur thermique dans un écoulement périodique

Introduction

L'objectif de ce TP est d'utiliser **Workbench** pour établir un projet et simuler un problème de transferts thermiques dans un écoulement périodique (échangeur thermique). Vous allez créer une géométrie bi-dimensionnelle et un maillage associé en utilisant les outils **DesignModeler** et **Meshing**. L'écoulement turbulent sera simulé avec le solveur **Fluent** et des paramètres d'entrée et de sorties seront définis pour contrôler l'efficacité des transferts thermiques dans l'échangeur. Différents outils de **Workbench** permettront ensuite de trouver les solutions optimales : minimisation des pertes de charges et maximisation du transfert de chaleur.

5.1 Géométrie et physique du problème

Le problème est montré sur la figure 13. Un fluide froid à la température $T = 293$ K dans le domaine de l'échangeur Des tuyaux chauds à la température $T = 493$ K sont placés uniformément au sein du fluide. L'écoulement est turbulent et symétrique dans la direction transverse à l'écoulement entrant. Les configurations optimisant les transferts de chaleur dans l'échangeur seront déterminées après les simulations.

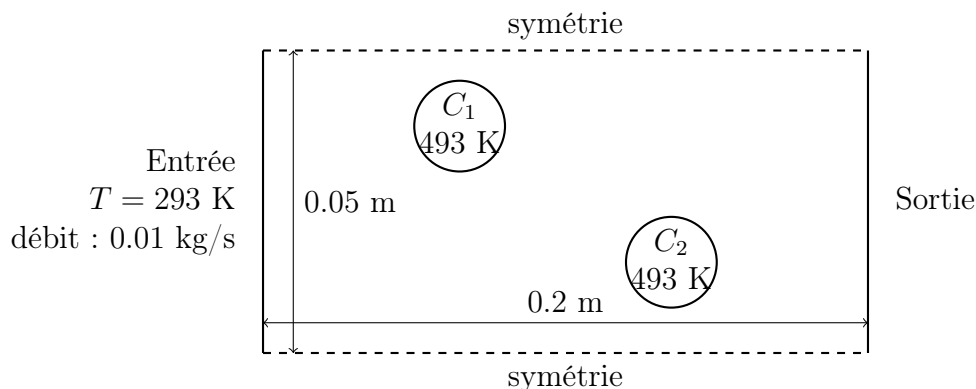


FIGURE 13 – Géométrie du problème. C_1 et C_2 dénotent respectivement les cylindres 1 et 2

Les sections suivantes donnent des explications détaillées afin de créer et mailler la géométrie.

5.2 Résolution sous ANSYS/FLUENT

5.3 Créer un projet Fluent sous Workbench

Workbench se lance avec la commande `runwb2`. Créez votre projet **Fluent** en double-cliquant sur **Mécanique des Fluides (Fluent)** et spécifiez dans les propriétés de l'élément **Géométrie** le type d'analyse (2D).

5.4 Construire la géométrie sous DesignModeler

Lancer **DesignModeler** et choisir l'unité (cm).

Dans le plan XY, on crée un nouveau croquis (Nouvelle esquisse) puis l'on trace un rectangle à l'aide de l'outil **Rectangle** (onglet **Esquisse**). Les dimensions seront ajustées dans la suite. Pour des raisons pratiques, ne positionnez pas les arêtes du rectangle sur les axes du repère (contraintes implicites)

Les axes (Ox) et (Oy) sont des axes de symétrie du rectangle. L'outil **Contraintes** → **Symétrie** permet de configurer la symétrie en trois étapes :

1. clic sur l'axe de symétrie,
2. clic sur l'un des segments dont on connaît un symétrique,
3. clic sur son symétrique par rapport à l'axe choisi.

Une fois ces étapes effectuées pour les deux paires d'arêtes du rectangle, ce dernier est centré en $(0, 0)$. On définit maintenant les dimensions.

- Dans l'étiquette **Cotes**, choisir **Général** puis cliquer sur l'arête inférieure, déplacer la souris pour définir la dimension horizontale $H1$. De la même façon créer la dimension verticale $V2$.
- Dans le panneau **Vue de détail** modifier les valeurs : $H1 = 20$ cm et $V2 = 5$ cm.

Les deux cylindres sont définis avec la procédure suivante :

- Dans **Dessiner**, choisir **Cercle** et tracer un cylindre dans la partie haute du rectangle.
- Dans **Modifier**, choisir la **Copie**, cliquer sur le cercle, puis faire clic droit et choisir la méthode de copie **Fin/Utiliser l'origine du plan comme poignée**. Déplacer la souris en bas et à droite de sorte à créer un cylindre différent et cliquer.
- Clic droit puis **Fin** pour terminer la procédure

De cette façon, les deux cylindres sont liés : modifier la taille de l'un modifie également l'autre.

On définit maintenant leurs dimensions et leurs positions.

- Avec **Cotes** → **Diamètre**, on définit le diamètre $D3$ d'un des cercles : $D3 = 1.5$ cm
- Toujours dans **Cotes**, l'outil **Horizontale** permet de définir des distances horizontales. On crée les distances, $H4$ la distance entre la paroi gauche et le centre du cylindre gauche et $H5$ celle entre les centres des deux cylindres.
- De la même manière, avec l'outil **Verticale**, on définit les distances $V6$ entre les deux cylindres et $V7$ la distance entre le cylindre bas et la paroi inférieure.
- On modifie les valeurs : $H4 = 4$ cm, $H5 = 8$ cm et $V6 = V7 = 1$ cm.
- Pratiquement toutes ces étapes peuvent se faire avec l'outil **Général**

Après cette étape, vous devriez vous retrouver avec une esquisse ressemblant à celle présentée dans la figure 14.

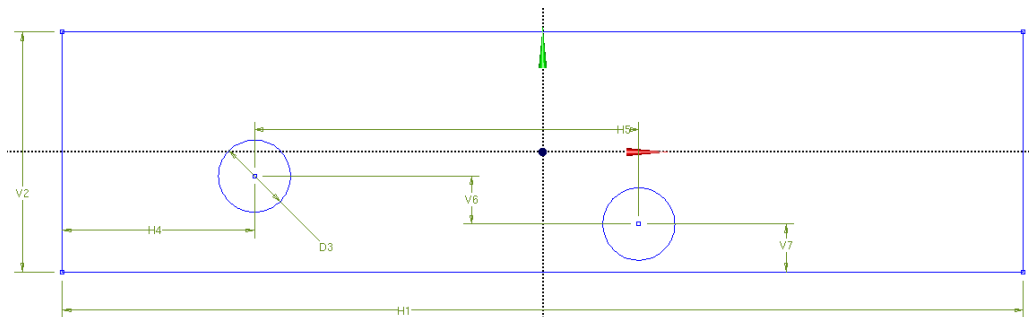


FIGURE 14 – Esquisse après avoir défini les différentes longueurs

On définit maintenant certaines valeurs comme des paramètres d'entrée du problème. Ces paramètres pourront alors être modifiés depuis l'interface **Workbench** ce qui permet un gain de

temps et d'efficacité lors d'une étude à paramètres multiples. Dans la **Vue de détails** cliquer sur la case à côté de *D3* (une lettre P bleue apparaît) et donner un nom, ici *diametre* par exemple (pas de caractères spéciaux : accent, espace...). Les autres paramètres sont la distance *H5* que l'on nomme *distance* et les longueurs *V6* et *V7* que l'on nomme *deplacement*. Le fait de nommer plusieurs éléments de la même façon les lie entre eux. Dans le menu général, **Outils** → **Paramètres** permet de visualiser et de modifier les valeurs des paramètres définis. On note que les valeurs ne sont plus modifiables dans la **Vue de détails**, elles le sont seulement ici. Par exemple, changer la valeur de *deplacement* modifie la position des deux cylindres.

Enfin, on crée la surface : **Concept** → **Surface à partir d'esquisses**. Ne pas oublier de générer la surface.

On peut maintenant sauver le projet et quitter **DesignModeler**. On note que dans le schéma du projet est apparu une flèche avec **Ensemble de paramètres** ainsi qu'une nouvelle case **Paramètres**.

5.4.1 Mailler la géométrie avec Meshing

On rafraîchit le projet avec **Rafraîchir le Projet** puis lance l'outil **Meshing**.

La première étape consiste à identifier et nommer les différentes conditions aux limites. Avec l'outil **Arête** :

- Sélectionner la surface d'entrée ; clic droit et **Créer une sélection nommée**. On donne le nom **inlet**.
- De façon similaire on nomme la surface de sortie **outlet**, les deux cylindres respectivement **cyl1** et **cyl2** et les surfaces haute et basse **symm1** et **symm2**.
- On se retrouve avec 6 surfaces définies.

La deuxième étape permet de définir les différents paramètres du maillage. Ici, on va construire un maillage plus raffiné autour des deux cylindre et un maillage d'éléments de tailles homogènes dans le reste de la cavité. On commence par le maillage de la zone proche des cylindres :

- Clic droit sur **Maillage** → **Insérer** → **Inflation**.
- Dans le détail de **Inflation**, on choisit la surface autour de laquelle on va contraindre le mailleur (autour des deux cylindres). Dans le détails de **Inflation** : la **géométrie** est donc la surface (1 Face) autour des cylindres et la **limite** est définie par les deux cylindres (2 arêtes) (utiliser la touche **Ctrl** pour les sélections multiples).
- Dans la case **Nombre de couches**, on entre 3 et on définit l'**épaisseur totale** à 0.0015 m.
- Essayer de modifier ces paramètres pour visualiser leurs influences respectives.

Pour mailler le reste de la cavité on modifie les paramètres de **Dimensionnement** situés dans le détail du **Maillage**.

- On utilise la fonction de taille avancée à proximité.
- Le **centre de pertinence** est défini comme **Fin**.
- **dimensionnement** : dans capturer la courbure → **oui**.

Les détails du maillage ainsi que la répartition des volumes de contrôle peuvent être visualisés dans l'option **Statistiques** du maillage.

Le maillage est terminé, on peut sauver, quitter **Meshing** et mettre à jour le projet.

5.4.2 Paramétrer Fluent et définir les sorties

Paramétrer le logiciel Fluent revient à spécifier les modèles utilisés, les matériaux, les conditions aux limites et les méthodes numériques utilisées lors de la résolution. **Il est impératif de savoir quelles équations l'on résout** et la signification des différentes options cochées. Un aide est disponibles depuis le menu des différents outils, apprenez à vous en servir.

Partie Problem Setup :

- **General** → **Mesh** → **Check** donne des informations sur le maillage
- **Models** → **Energy** active la prise en compte de l'équation de l'énergie
- **Models** → **Viscous** → **Edit**, on choisit le modèle de turbulence $k - \omega$ *SST* (2 eqn), laisser les paramètres par défaut
- **Material** → **Fluid** → **air** choisir **incompressible-ideal-gas** dans la case **Density**. **Change/Create** pour valider
- Dans **Boundary Condition** :
 - **inlet** ; changer le type à **mass-flow-inlet**. Dans la case à coté de **Mass Flow Rate** choisir **New Input Parameter**, enter le nom **inlet-mass-flow** et modifier la valeur à 0.01 kg/s. Prendre **Normal to Boundary** comme direction. Pour **Specifation Method** du modèle de turbulence choisir **Intensity and Viscosity Ratio** et mettre les deux paramètres à 1. Sur l'onglet gérant la thermique, changer la valeur de température d'entrée à 293 K.
 - Modifier les température des deux cylindres à $T = 493$ K.
 - Changer le type en **Symmetry** pour les deux surface symétriques.
 - **outlet** : modifier le modèle de turbulence **Specifiation method** en **Intensity and Viscosity Ratio** et mettre les valeurs à 1. Sur l'onglet **Thermal**, changer le **Backflow Total Temperature** à 293K.

Le fait de choisir **New Input Parameter** dans les paramètres de la face d'entrée permet de définir la vitesse d'entrée comme un paramètre du problème. Elle sera visible dans la case **Paramètres** du projet. On pourra dans la suite faire varier cette valeur du débit directement depuis **Workbench**.

Partie Solution

- Laisser les paramètres de la méthode numérique par défaut.
- Dans **Solution Initialization**, choisir de calculer depuis l'entrée et initialiser le calcul.
- Dans **Calculation Activities** on active **Automatically Initialize** puis on édite. Lors de l'étude paramétrique, le logiciel lance plusieurs calculs à la suite. Il faut donc lui dire de ré-initialiser à chaque simulation. On choisit d'initialiser avec **Values from Case**. Dans l'onglet **Case Modification** on définit une modification (passer à 1 **Defined Modofication**). On entre 500 itérations pour les paramètres de base et 1000 pour les calculs modifiés et on entre la commande `/solve set ds mom 1 /solve set ds tem 1`. On clique sur **OK** et on refuse d'appliquer la stratégie que le logiciel propose.

Ce choix sous entend que l'on a déjà fait une simulation avec les paramètres de base et que l'on sait que la simulation donne des résultats convergés en 500 itérations ! Dans une autre étude il faudrait faire un premier calcul pour estimer ce nombre d'itérations initial. Dans les autres cas, on prend deux fois plus d'itérations comme sécurité.

On ne lance pas le calcul directement depuis **Fluent**. Cette opération se fera en tâche de fond depuis **Workbench**. Il ne nous reste plus qu'à définir les paramètres de sortie du logiciel. Ils seront visibles et utilisables depuis **Workbench**.

- Dans **Report** puis **Parameters**, cliquer sur **Create-Forces** et choisir **cyl1**. Cliquer ensuite sur **Save Output Parameter** et choisir un nom, par exemple **force-cyl1**. Suivre la même procédure pour le cylindre 2.
- **Create-Surface Integrals**, choisir **cyl1**, cliquer sur **Save Output Parameter** et donner le nom **area-cyl1**.
- Changer le type de rapport à **Area-Weighted Average** puis choisir **Pressure** → **Static Pressure** comme variable et choisir l'entrée comme surface. Cliquer sur **Save Output Parameter** et donner le nom **inlet-pressure**. Faire de même avec la température totale en sortie avec le nom **outlet-temperature**.

Sauvegarder le projet et quitter **Fluent**.

5.4.3 Paramétrer les simulations

Le calcul ne s'est pas fait directement depuis l'interface graphique de **Fluent**. On va ici paramétrer un lot d'expériences dans lequel plusieurs paramètres vont changer puis l'on va exécuter les simulations en tâche de fond. Pour cela on double-clique sur **Ensemble de paramètres**. Une nouvelle interface s'affiche dans laquelle on peut définir de nouvelles simulations basées sur les paramètres d'entrée (Inputs) que l'on a défini.

- Dans la **Table de points de conception**, à la ligne 4, sous le paramètre **P1 - diameter**, on ajoute une valeur 1.7 du diamètre puis on presse le bouton **Entrée**. Une nouvelle étude est définie. De la même façon, on crée une simulation avec un flux de masse de 0.009 kg/s. Les "éclaircs" dans les zones situées à droite montrent que les paramètres de sortie ne sont pas encore à jour.
- On met ces nouvelles simulations à jour avec **Mettre à jour tous les points de conception**. On peut cliquer sur **Afficher progression** pour voir l'avancement des calculs. Le temps de calcul varie principalement selon le nombre d'itérations choisi (ici 500 pour le cas de référence et 1000 pour les autres cas).
- une fois terminé, vérifier la cohérence des résultats et commenter.

On retourne au projet avec **Return to Project**.

5.4.4 Design Exploration

Dans cette partie, on va s'intéresser à l'impact de la disposition des deux cylindres sur les transferts de chaleur au sein de l'échangeur. Dans la colonne **Boîte à outils**, on choisit l'objet **Surface de réponse** que l'on fait glisser dans la case verte sous **Ensemble de paramètres**. Un double clic dans **Plan d'expérience** affiche une nouvelle interface de paramétrage. On va ici choisir de faire varier la distance entre les deux cylindres et le déplacement. Les autres paramètres (**P1** et **P4**) sont décochés.

Dans les propriétés du paramètre **P2** (distance), on change les bornes inférieure et supérieure respectivement à 3 et 10. De même pour l'élément **P3**, on calibre le déplacement entre 0.85 et 2. **Aperçu** donne un aperçu des simulations qui vont être réalisées. **Mettre à jour** lance les calculs.

On peut ensuite aller analyser les résultats dans **Surface de réponse** et tracer l'influence des différents paramètres. (Par exemple via la case 17 de la table du schéma)

5.4.5 Optimisation des simulations

Cette partie permet d'introduire la fonction d'optimisation de **Workbench**. Des calculs sont définis et lancés pour chercher l'écoulement dont une condition précise est souhaitée : on cherche la configuration qui maximise la température en sortie de conduite. Dans cette optique, on utilise l'outil **Optimisation par objectifs** que l'on fait glisser à côté de **Surface de réponse**. On connecte le plan d'expériences par un simple glissement. Les données sont alors partagées par les deux outils. On rafraichit puis on met à jour l'élément **Surface de réponse** et on lance le panneau d'optimisation. Dans les propriétés de l'optimisation, on choisit la méthode **Échantillonnage** et on prend un nombre initial d'échantillons de 1000. Dans **Table du schéma**, on choisit de minimiser la pression à l'entrée et de maximiser la température de sortie. **Mettre à jour** lance la procédure et trois candidats proches des critères d'optimisation sont affichés. L'élément **Trade off** dans le panneau de gauche permet d'afficher le nuage d'échantillons en fonction de deux paramètres. Les carrés bleus correspondent aux simulations optimales.

Une fois l'outil d'optimisation maîtrisé, on cherchera, en fonction de l'ensemble des paramètres, la situation permettant un transfert de chaleur maximal tout en minimisant la pression d'entrée (et donc les pertes de charges).