

Simulation numérique d'écoulements autour d'un profil aérodynamique.*

P. Kuszla¹, F. Ravelet¹

¹ *DynFluid, Arts et Metiers ParisTech,*
151 boulevard de l'Hôpital, 75013 Paris, France.
contact: florent.ravelet@ensam.eu

16 juin 2014

Table des matières

1	Cas de simulation	2
2	Création du maillage	4
2.1	Importation et préparation de la géométrie à mailler	4
2.2	Génération du maillage	5
3	Paramétrage des conditions aux limites	9
4	Simulation de l'écoulement autour d'un profil aérodynamique	9
4.1	Choix des modèles	9
4.2	Paramétrage de l'écoulement incident	10
4.3	Obtention de la solution	10
4.4	Post-traitement	10

*Ce document a été écrit en L^AT_EX, en utilisant les distributions GNU/Linux Ubuntu (<http://www.ubuntu-fr.org/>) et Fedora (<http://www.fedora-fr.org/>).

1 Cas de simulation

On souhaite simuler l'écoulement autour d'un profil NACA0012. Ce profil largement utilisé dans l'aéronautique constitue un cas de calcul intéressant puisqu'on dispose à son sujet de données expérimentales qui vont permettre de valider les simulations effectuées. Cette démarche de validation est fondamentale pour s'assurer que notre méthodologie de simulation est satisfaisante, pour en cerner les faiblesses et pour ensuite pouvoir effectuer des calculs prédictifs pour des profils moins bien documentés.

Il s'agit donc de reproduire, par une simulation, l'écoulement autour d'un profil d'allongement infini (nous travaillerons donc en deux dimensions d'espace) que l'on place dans la veine d'essai d'une soufflerie comme on l'a représenté sur la figure 1. Sur cette figure, α est l'angle d'attaque ou l'incidence du profil et U_∞ est la vitesse du vent à l'infini amont. Les efforts aérodynamiques exercés sur le profil permettent de définir les coefficients de traînée et de portance :

$$\begin{aligned}\text{Coefficient de traînée ("drag")} : C_d &= \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 S_{ref}} \\ \text{Coefficient de portance ("lift")} : C_l &= \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 S_{ref}}\end{aligned}$$

Ici, la surface de référence S_{ref} sera la surface projetée d'une aile d'allongement unitaire. On note ρ la masse volumique du fluide.

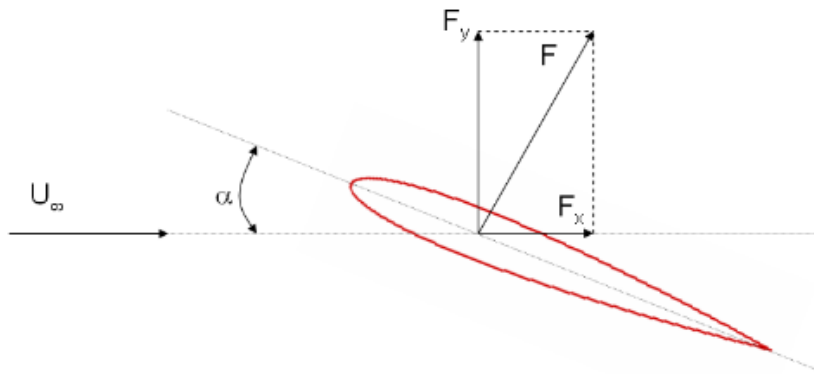


FIGURE 1 – Efforts aérodynamiques sur un profil

On dispose de la polaire du NACA0012 pour un nombre de Reynolds $Re = \frac{\rho U_\infty L}{\mu} = 9 \times 10^6$ et lorsque l'écoulement est incompressible. L est la corde du profil et μ désigne la viscosité dynamique. Cette polaire est représentée sur les figures 2 et 3.

Sur la figure 2, on peut observer aux faibles incidences la dépendance linéaire du coefficient de portance en fonction de l'angle d'incidence ainsi que le décrochage du profil pour une incidence d'environ 15 degrés. Le profil étant symétrique, sa portance est nulle pour une incidence nulle. La figure 3 permet d'obtenir le coefficient de traînée pour une

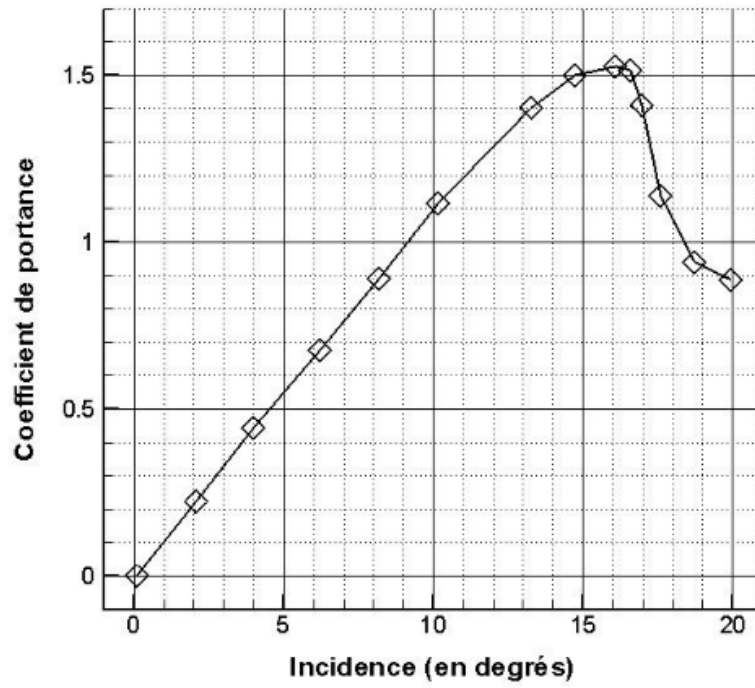


FIGURE 2 – Coefficient de portance d'un profil NACA0012, $Re = 9 \times 10^6$

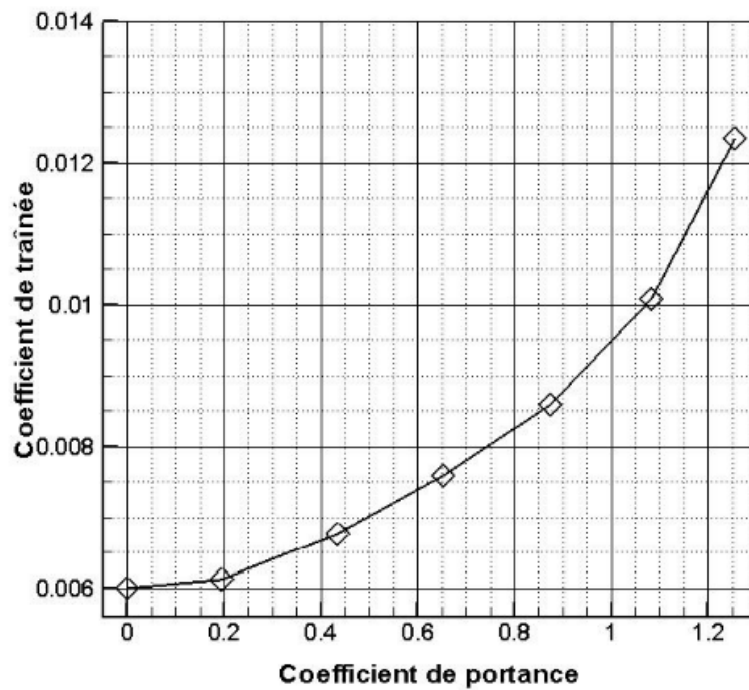


FIGURE 3 – Polaire de Eiffel du NACA0012, $Re = 9 \times 10^6$

portance donnée.

L'objet de ce travail est de vérifier que l'on peut retrouver numériquement le comportement observé sur la polaire du NACA0012. A cette fin, on effectuera des simulations autour de ce profil différentes incidences. On comparera les résultats numériques aux résultats expérimentaux des figures 2 et 3.

La première étape, pour mener à bien cette étude, consiste à générer un maillage autour d'un profil NACA0012.

2 Création du maillage

Travail à réaliser

- Importer la géométrie, définir les conditions aux limites.
- Construire un maillage en C-H autour du profil NACA0012.
- Bien choisir la taille de la première maille près du profil.
- Préciser toutes les caractéristiques de ce maillage.

2.1 Importation et préparation de la géométrie à mailler

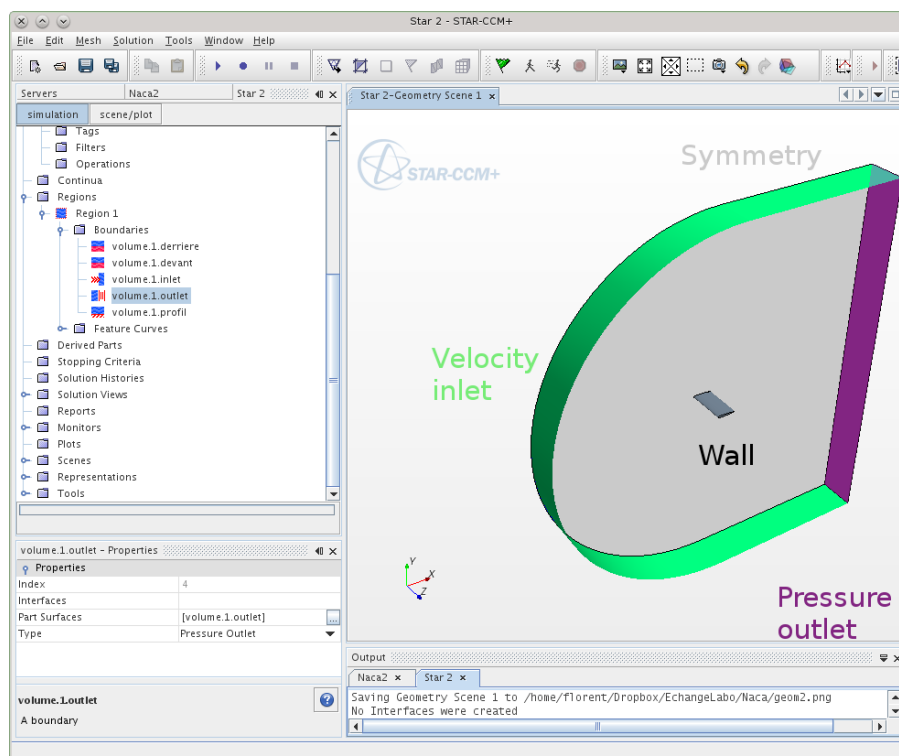


FIGURE 4 – Domaine fluide utilisé et conditions aux limites.

- Importer le maillage surfacique contenu dans le fichier :
X:\Enseignants\ravelet\Naca\naca0012.step
- Garder les valeurs par défaut (“create new Part”). La figure 4 représente le domaine fluide 2D et les frontières d’intérêt. Les deux faces latérales sont des symétries, et seront éliminées lors du passage à 2D.
- Il faut mettre à l’échelle la géométrie :
 - Faire un clic-droit dans “Geometry” → “Parts” → “volume.1” ;
 - Choisir “Transform” → “Scale” ;
 - Appliquer un facteur 1000.

2.2 Génération du maillage

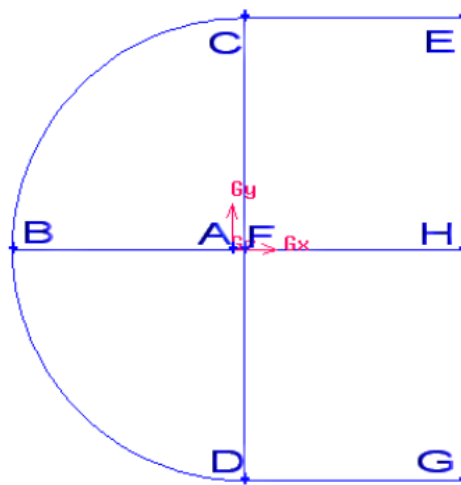



FIGURE 5 – Points définissant les patches du domaine de calcul

Le maillage proposé est un maillage structuré en C-H, composé de mailles quadrangulaires. Le domaine fluide est schématisé en figure 5, où le profil s’étend des points A (bord d’attaque) à F (bord de fuite). Les quadrilatères ABCF, ABDF, FHGD, FCEH sont les “patches” supports pour obtenir un maillage structuré.

Etapas à réaliser :

- Créer un “Directed Mesh” :
 - Faire un clic-droit dans “Geometry” → “Operations” ;
 - Choisir “New” → “Directed mesh”.
- Faire un clic-droit dessus, pour l’éditer ;
- Définir les surfaces sources et cibles :
 - Faire un clic-droit sur la première surface, et choisir “add to source” (voir Fig. 6) ;
 - Procéder de même pour la seconde surface en choisissant “add to target”.
- Faire un clic-droit dans “Mesh Settings” et sélectionner “new source mesh” → “patch mesh”.
- Cliquer sur le bouton  (“Autopopulate feature edges with patch curves”).

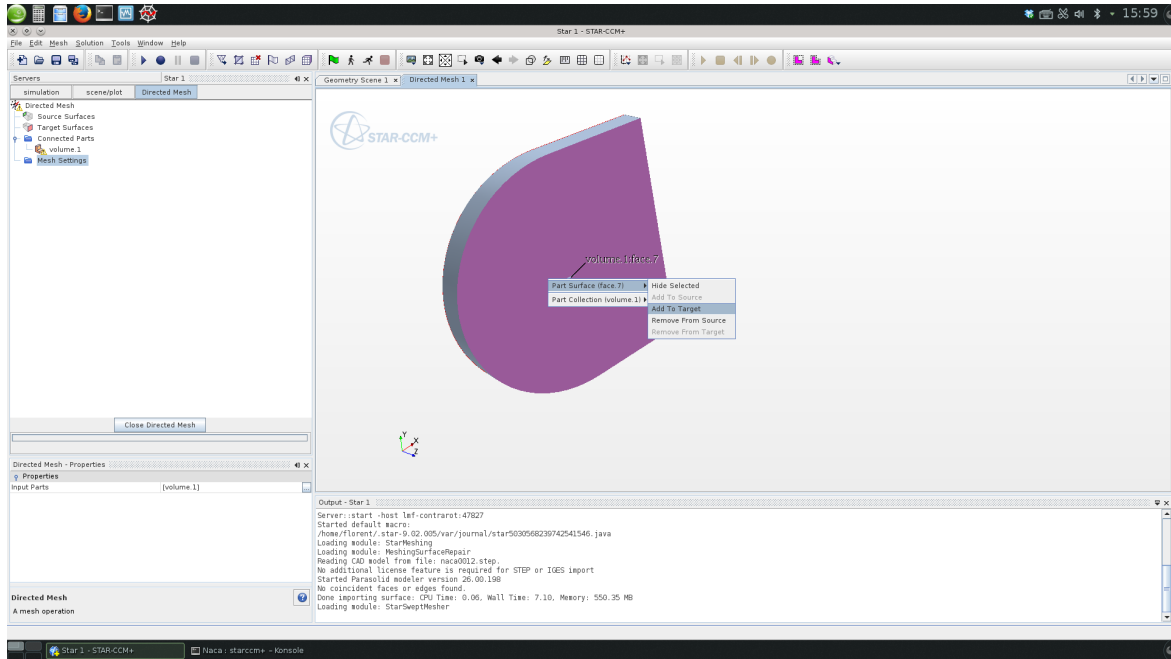




FIGURE 6 – Définition de la surface source

- Sélectionner le point du bord d'attaque, vérifier que ses coordonnées sont $\{x = 0; y = 0; z = 2\}$ (l'origine du repère est au bord d'attaque, le volume fluide a deux mètres dans la direction z).
- Sélectionner le deuxième point sur le profil, l'amener vers le bord de fuite, imposer les coordonnées $\{x = 1; y = 0; z = 2\}$ (la corde du profil vaut 1 m).
- Création des autres points :
 - Prendre l'outil « ciseaux »  (“Split the selected patch curve”);
 - Cliquer approximativement sur le tour au niveau des points B, C, D, H de la Fig. 5;
 - Reprendre le premier outil, sélectionner les points et imposer leurs coordonnées :
 - Point B : $\{x = -9; y = 0; z = 2\}$;
 - Point C : $\{x = 1; y = 10; z = 2\}$;
 - Point D : $\{x = 1; y = -10; z = 2\}$;
 - Point H : $\{x = 10; y = 0; z = 2\}$;
- Relier les points pour créer les 4 patches avec l'outil  (“Create Patch Curve”).
- Le contour doit être vert, passer en mode “patch mesh” (voir Fig. 7).
- Paramétrage du maillage :
 - La procédure consiste à cliquer successivement sur les arrêtes de chaque “patch” et d'y imposer les points du maillage. Ces points peuvent être régulièrement espacés ou bien répartis avec une progression géométrique, ou hyperbolique;
 - Commencer par mailler les segments qui définissent le profil avec 80-100 points sur l'extrados et l'intrados par exemple. Resserrer les points vers le bord d'attaque et le bord de fuite;
 - Mailler également le segment dans le sillage du profil avec 80-100 points en veillant à ce que la taille des mailles ne change pas brusquement.

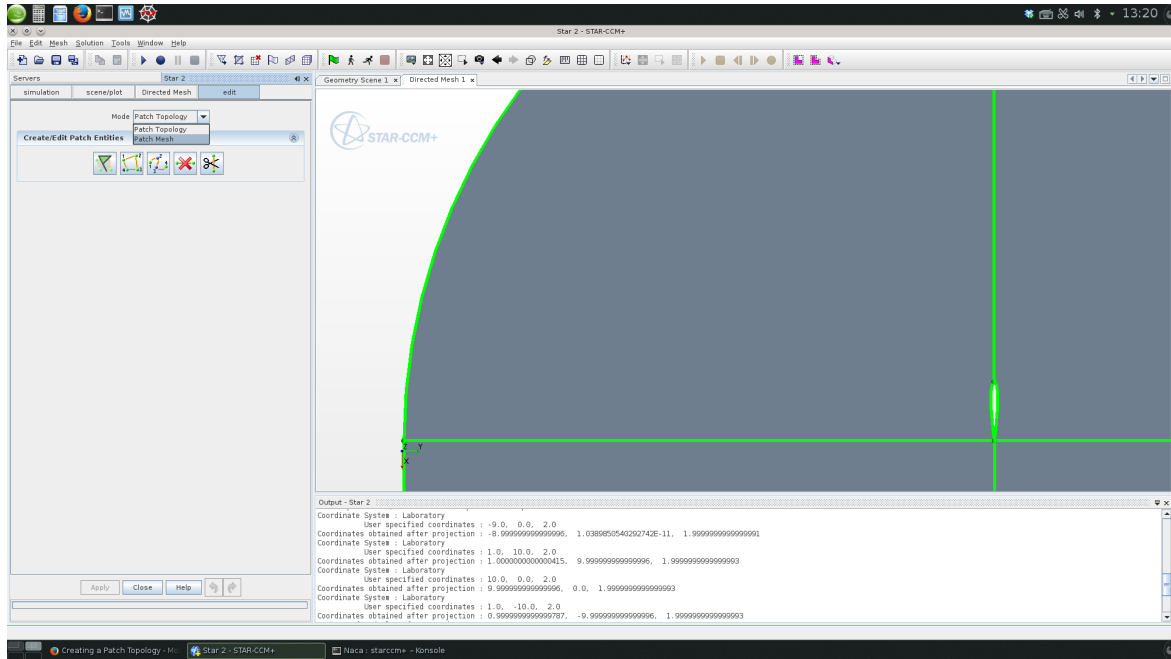


FIGURE 7 – Fin de création des patches, passage en mode “patch mesh”

— Mailler enfin les arrêtes perpendiculaires au profil, en choisissant une taille proche du profil respectant la condition suivante :

Épaisseur de la première maille

Pour calculer l'épaisseur de la première maille, on se base sur des résultats connus concernant le comportement d'une couche limite turbulente sur une plaque plane à laquelle on assimilera notre profil aérodynamique. Les détails de cette étude dépassent le cadre de ce document, aussi ne donnera-t-on que les résultats permettant d'évaluer cette taille de maille.

On introduit une distance adimensionnée $y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}$ où y est l'ordonnée de la première maille : c'est cette dimension que nous cherchons à connaître.

On note $\nu = \mu/\rho$ la viscosité cinématique du fluide.

La quantité $u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$ est la vitesse de frottement : pour l'évaluer on doit connaître la contrainte de frottement pariétal τ_w .

A cette fin on utilisera l'expression approchée suivante du coefficient de frottement pariétal C_f :

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \simeq 0.0244 Re^{-1/7}$$

Ici, $Re = 9 \times 10^6$ est le nombre de Reynolds basé sur la vitesse infinie amont et la longueur du profil.

⇒ Prendre une cible pour y^+ de l'ordre de 300. C'est avec cette valeur que l'on choisira la taille de la première maille de couche limite.

→ Inspecter le maillage (Fig. 8).

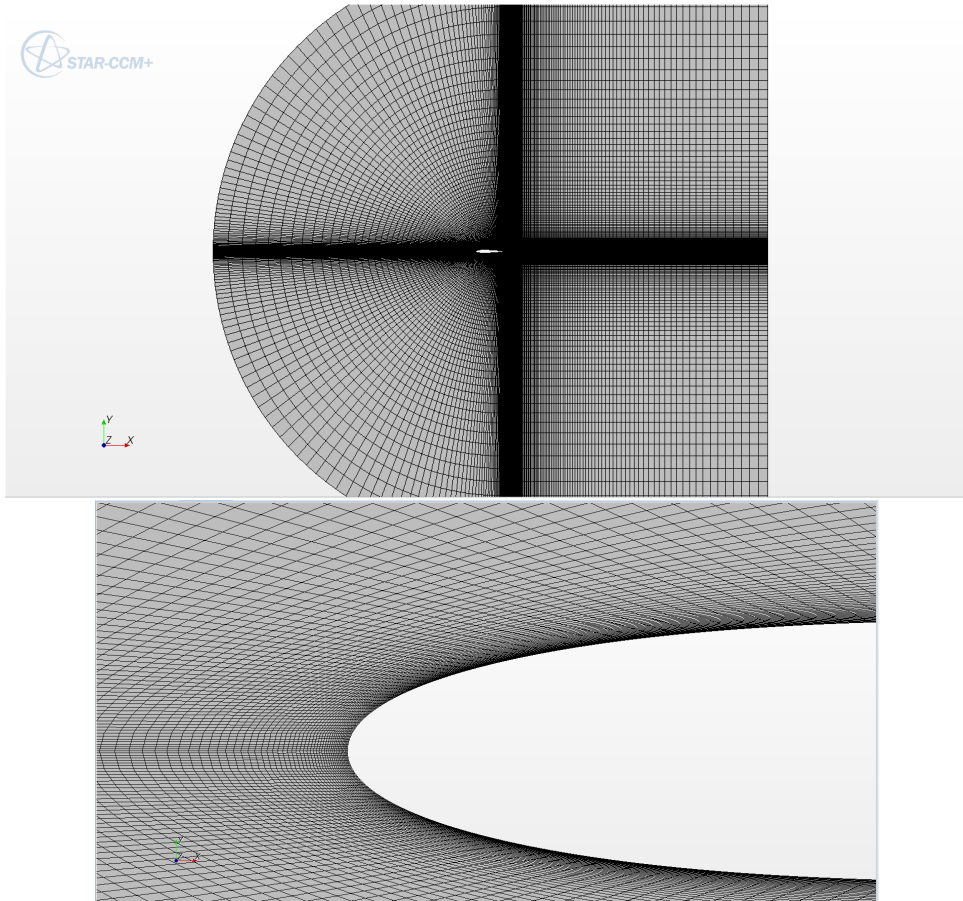


FIGURE 8 – Allure du maillage à obtenir et détail proche du profil

- Sortir des menus d'édition et "directed mesh" pour revenir dans l'arborescence principale.
- Création du maillage en volume :
 - Faire un clic-droit dans "Geometry" → "Parts" → "volume.1" ;
 - Sélectionner "Assign Parts to Regions" ;
 - Faire un clic-droit dans "Geometry" → "Operations" → "Directed Mesh" → "Mesh Settings" ;
 - Choisir "New Volume distribution" ;
 - Lancer l'opération de maillage (clic-droit dans "Geometry" → "Operations" → "Directed Mesh" : "Execute").

3 Paramétrage des conditions aux limites

- Dans "Regions" → "Region" → "Boundaries", regrouper ou découper les différentes frontières et les renommer ;
- Changer alors le type de conditions aux limites pour les frontières (voir Fig. 4) :
 - "Velocity Inlet" pour l'entrée ;
 - "Pressure Outlet" pour la sortie ;
 - "Symmetry" pour les deux faces latérales ;
 - "Wall" pour le profil.
- Passer à 2D (non sans sauver d'abord sous un nom différent).

4 Simulation de l'écoulement autour d'un profil aérodynamique

Travail à réaliser

- *Mettre en place des simulations correspondant à la situation reportée sur les figures 2 et 3, pour des angles d'incidence de 0, 5, 10, 15 et 20 degrés.*
- *Décrire précisément chaque cas d'un point de vue physique (modèles choisis, caractéristiques du fluide et de l'écoulement,...) ainsi que d'un point de vue numérique (type de solveur, précision, convergence,...).*
- *Calculer la solution pour ces différents cas et proposer une analyse critique des résultats obtenus pour chacune des incidences retenues.*
- *Ne pas oublier l'un des objectifs du TP qui est de comparer les solutions aux mesures expérimentales des Figs. 2 et 3!*

4.1 Choix des modèles

Les contraintes suivantes sont imposées :

- *Écoulement stationnaire*
- *Écoulement incompressible*

- **Nombre de Reynolds** basé sur la corde et la vitesse infinie amont égal à :

$$Re = 9 \times 10^6$$

- **Modélisation de la turbulence de type RANS**

Le modèle exact parmi *Spalart-Allmaras*, $k-\epsilon$, $k-\omega$ est à votre discrétion. Ces différents modèles comportent de nombreuses variantes ($k-\epsilon$ standard ou Realizable, ...). Vous avez le droit d'en tester plusieurs.

4.2 Paramétrage de l'écoulement incident

Pour faire varier l'angle d'incidence, il existe plusieurs méthodes. En voici une possible, qui a pour avantage de simplifier le dépouillement :

- Créer un nouveau système de coordonnées par angle d'incidence.
 - Faire un clic-droit dans "Tools" → "Coordinate System" ;
 - Choisir "New" → "Cartesian" et entrer les bonnes valeurs ;
 - Penser à renommer le système de coordonnées avec un nom significatif.
- Pour modifier l'angle d'incidence, il vous faut suivre la procédure suivante :
 - Sélectionner la méthode "Angles" dans "Regions" → « votre domaine » → "Boundaries" → « votre entrée » → "Physics Conditions" → "Flow Direction Specification" ;
 - Dans les propriétés de "Physics Values" → "Flow Angles", on voit alors que l'on peut choisir le système de coordonnées.

4.3 Obtention de la solution

Mettez en place le reste (critères de convergence et suivi d'une quantité) pour lancer les itérations et calculer la solution stationnaire recherchée. Lancez le calcul avec un nombre suffisant d'itérations, de manière à vous assurer de la bonne convergence de votre solution. Dans le cas présent, on peut attendre que tous les résidus décroissent jusqu'à leur minimum et atteignent un palier horizontal montrant que la solution ne convergera pas mieux.

4.4 Post-traitement

- Pensez à bien indiquer les valeurs de référence pour le calcul des coefficients de portance et de traînée.
- Projetez bien les efforts aérodynamiques dans le bon repère pour calculer les valeurs de C_l et C_d (voir Fig. 1).
- On peut vérifier les valeurs de y^+ en les traçant le long du profil.
- Il est également possible de tracer les courbes de niveau des différentes variables qui décrivent l'écoulement : pression, vitesse, variables turbulentes, ...
- Les possibilités de visualisation sont nombreuses, on peut par exemple tracer les valeurs du coefficient de frottement pariétal afin de détecter un éventuel décollement, on peut visualiser des lignes de courant etc.

Bilan

Votre travail consiste donc à simuler l'écoulement autour d'un profil NACA0012 à différentes incidences. Pour mener à bien une telle simulation vous suivrez les étapes décrites dans ce document :

- Réalisation du maillage en accord avec le cas à simuler ;
- Calcul de la solution numérique ;
- Post-traitement de cette solution, visualisation de l'écoulement, calcul des performances du profil.

Vous rédigerez un rapport faisant la synthèse de vos simulations. Ce rapport est à rendre à la fin de la seconde séance de travail.

Bon courage !

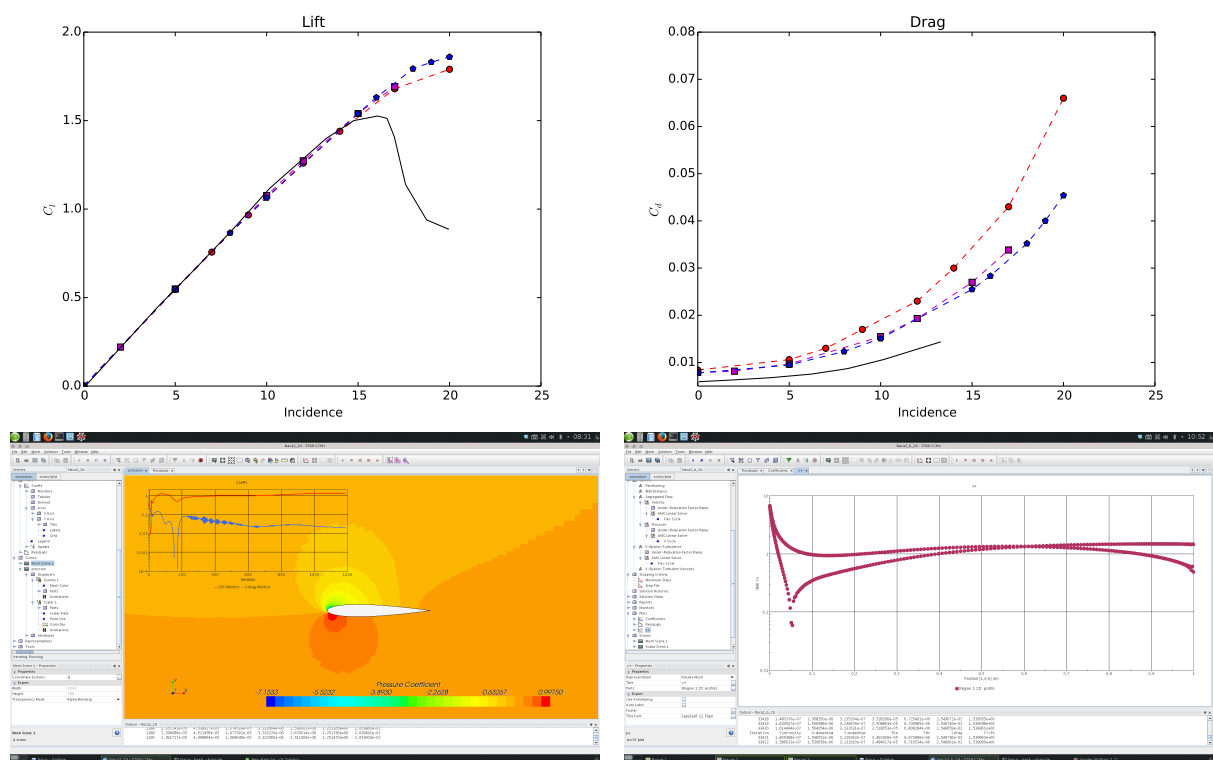


FIGURE 9 – Solutions obtenues.