

Séance de Travaux Dirigés 3

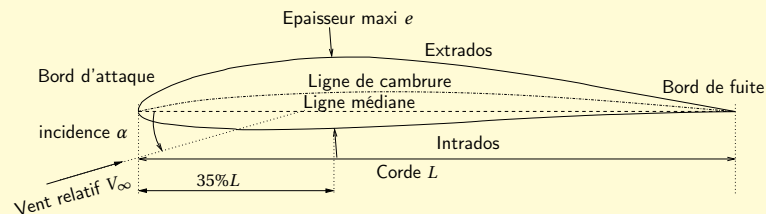
Calcul de la portance d'un profil NACA4412

Objectifs de la séance

1. mener un calcul 2D-plan autour d'un profil d'aile avec des conditions aux limites *ad hoc*,
2. générer une CAO à partir d'un fichier de points de coordonnées,
3. gérer un maillage sur un domaine étendu,
4. mener une analyse de convergence au maillage en s'appuyant sur un critère adapté,
5. extraire d'un calcul convergé, les coefficients C_z et C_x et les profils du coefficient de pression sur les frontières extrados et intrados à comparer à des données expérimentales.

Notions de mécanique du vol

La figure ci-dessous illustre la nomenclature classiquement utilisée en aérodynamique :



En vol, la résultante des forces aérodynamiques qui s'exercent sur un profil d'envergure infinie (approche 2D pour simplifier)^a peut se décomposer en :

1. une composante de portance, **perpendiculaire à la direction de l'écoulement relatif**,
2. une composante de traînée, **parallèle à la direction de l'écoulement relatif**,

$$\text{Portance} = \frac{1}{2} C_z \rho V_\infty^2 S, \quad \text{Traînée} = \frac{1}{2} C_x \rho V_\infty^2 S,$$

Les coefficients C_z et C_x sont respectivement nommés coefficients de portance et de traînée. La surface S correspond à la surface portante de l'aile : pour une approche 2D, elle est obtenue par le produit de la corde L par une envergure unité. Les conditions d'écoulement correspondent à un Reynolds de :

$$\mathcal{R}_e = \frac{V_\infty L}{\nu} = 1.52 \times 10^6,$$

L'angle d'incidence de l'écoulement par rapport à la corde ($L = 1 \text{ m}$) du profil est de :

$$\alpha = 13.87^\circ.$$

Le fluide considéré est de l'air de propriétés $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ et $\nu = 1.56 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Confrontation avec des mesures expérimentales

La confrontation avec des données expérimentales se fera par comparaison des profils extrados et intrados du coefficient de pression C_p (*Pressure coefficient*) et qui correspond à la pression statique pariétale normalisée par la pression dynamique, à savoir :

$$C_p = (p - p_\infty) / \left(\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 \right).$$

Celui-ci est directement calculé par StarCCM+ moyennant les valeurs de références.

Les données expérimentales sont à télécharger directement depuis Moodle et à intégrer sous StarCCM+.

^a. Dans la réalité, l'aile est d'envergure limitée et il est alors nécessaire de convertir les différents coefficients 2D en leurs équivalents pour l'aile réelle (relation de Prandtl, 1917) un peu hors sujet pour ce TD...

Cette session s'appuie sur vos connaissances acquises au préalable en matière :

1. d'extraction d'un plan de calcul 2D,
2. de génération d'une zone de raffinement de maillage,
3. de mise en données d'un calcul CFD, calcul et post-traitement.

Seules les notions nouvelles font ici l'objet d'une présentation détaillée. Ne pas hésiter à vous reporter aux sessions précédentes pour le déroulement des compétences pré-citées.

Déroulement

1. Calculer la vitesse V_∞ à imposer en fonction des données transmises dans l'énoncé,
2. Création d'une CAO du profil NACA4412 à partir d'un fichier de points au format .csv,
3. Ajoût d'un domaine extérieur de type disque ou de votre choix,
4. Ajoût d'une zone de raffinement de maillage autour du profil (à disposer comme vous le souhaitez),
5. Extraction d'un plan de calcul 2D (fortement conseillé pour réduire le temps de calcul),
6. Maillage et mise en données du problème avec les bons choix de modèles,
7. Calcul avec tracé du coefficient de portance C_z en cours de convergence. Une analyse de convergence au maillage sera menée autour de ce critère,
8. Extraction du coefficient de pression C_p et comparaison avec les données expérimentales.

Pour votre culture aéronautique... Le NACA¹4412 appartient à la catégorie des profils dits à 4 chiffres avec :

- 1^{er} chiffre : cambrure maximale (4% dans notre cas),
- 2^{ème} chiffre : position (en dizaine) de la cambrure maximale (soit 40%),
- 3^{ème} et 4^{ème} chiffres : épaisseur relative (soit 12%).

Le NACA4412 est donc un profil biconvexe et dissymétrique (car 44).

1 Création de la CAO

La CAO du profil sera directement importée depuis le fichier NACA4412.csv. Après avoir ouvert une session StarCCM+ que vous aurez au préalable sauvegardée :

- ▷ Ouvrir une session CAO avec un clic-droit sur **3D-CAD Models > New**,
- ▷ Pour importer un fichier de points :
 1. Clic-droit sur **3D-CAD Model 1 > Import > 2D Curves**
 2. Sélectionner le fichier de contour avec l'extension .csv²
 3. Cocher les options **Spline** ou **Polyline**³ ainsi que **Close the curve**
- ▷ Editer le *Sketch 1* nouvellement créé pour ajouter le contour délimitant les frontières du domaine. La forme de ce contour peut être circulaire centrée sur le bord d'attaque du profil par exemple. Cette partie ne posant pas de souci particulier, elle ne sera pas détaillée ici. **Relever les coordonnées du centre de ce disque.**

L'étape suivante consiste à nommer le profil, le contour et les deux faces planes, en particulier celle qui sera **badgée** pour extraire un plan 2D. Si le profil a été importé avec le mode *Polyline*, il ne peut être sélectionné directement car chaque segment qui le compose est indépendant.

1. *National Advisory Committee for Aeronautics* devenu la NASA en 1958

2. *csv* pour *Comma-Separated Values*

3. Retenir cette dernière option si la courbe spline résultante s'écarte trop du profil

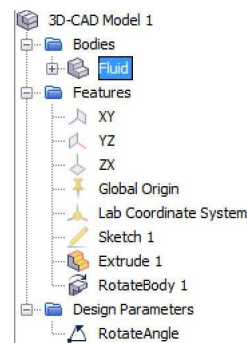
- Procéder (si nécessaire) à une saisie collective en sélectionnant l'outil de sélection rectangulaire.



- Nommer la profil *NACA4412*.
- Renommer le **Body 1** en **Fluid**.

Pour tenir compte d'une inclinaison relative entre la corde du profil et l'écoulement, le domaine complet peut être associé à un **Design Parameters** de type *rotation* pour facilement le faire pivoter et moyennant quelques mise-à-jour consécutives. Procéder selon les étapes :

- Clic-droit sur **Fluid** > **Transform** > **Rotate**
- Spécifier les coordonnées du centre du disque (contour) comme axe de rotation.
- Imposer la valeur de l'angle α (négative !) comme angle et cliquer sur l'icône située juste à droite avec un point d'interrogation.
- Cocher **Expose Parameter** et fermer cette fenêtre.
- Vérifier que le profil est bien incliné de l'angle requis.
- Cliquer OK et vérifier la présence de **Design Parameters** > **RotateAngle**
- Quitter l'outil de CAO.



2 Génération du maillage 2D

La procédure ayant été détaillées lors des précédentes séances, elle ne sera pas décrite ici. Les points importants qui doivent cependant attirer votre attention :

- Noter la présence d'un onglet **Design Parameters** avec l'angle d'inclinaison que vous pourrez modifier à votre convenance par la suite,
- Extraire un plan 2D,
- Déterminer une taille de maille **Base size** en adéquation avec votre domaine,
- Générer une zone de raffinement autour du maillage destinée à bien capter le sillage en sortie de bord de fuite.

Juste pour rappel, les étapes immanquables :

- Création de **New Geometry Part**,
- Créer et exécuter une opération **Badge for 2D Meshing**,
- Etape **Assign Parts to Regions** et bien vérifier que dans l'onglet **Regions**, les plans de symétrie n'apparaissent plus,
- Création du maillage avec l'opération **Automated Mesh (2D)**. Définir les paramètres de mailles.
- Paramétrer le maillage de la zone de raffinement,
- Spécifier les types de CL : *Velocity Inlet* pour le contour est une bonne idée...
- Mailler...

Ne passer à l'étape suivante qu'après avoir *checké* votre maillage et vérifié qu'il vous convenait.

3 Mise en données

L'écoulement est supposé :

- stationnaire,
- visqueux,
- incompressible.

A vous de jouer !

3.1 Création d'un *Plot* pour visualiser l'évolution du C_z en cours de calcul

Commencer tout d'abord par créer un **Report** avec :

- ▷ Clic-droit sur **Reports>New Reports>Element count... > Force Coefficient**
- ▷ Sélection **Force coefficient** et renseigner les valeurs de *Reference* pour :
 - **Density** (air), **Velocity** (V_∞), **Area** (L),
 - **Direction**, **Force option**,
 - et enfin la **Parts** sur laquelle procéder à l'intégration des efforts.
- ▷ Créer une figure pour affichage au cours des itérations : **Force coefficient 1>Create Monitor and Plot from Report**,
- ▷ Une figure dans l'onglet **Plot** est alors ajoutée. La configurer à convenance (échelles, légendes...),
- ▷ Créer une figure pour visualiser le champs de pression.

3.2 Initialisation et calcul

- ▷ Définir les conditions aux limites. Le contour impose par défaut une vitesse normale à sa frontière. Spécifier la vitesse d'après ses composantes.
- ▷ Initialiser puis lancer le calcul.

A l'issue du calcul, étudier l'influence du maillage sur la valeur du coefficient de portance et mener d'autres calculs en modifiant les paramètres de taille des mailles, voire le type de mailleur. Soyez imaginatif !

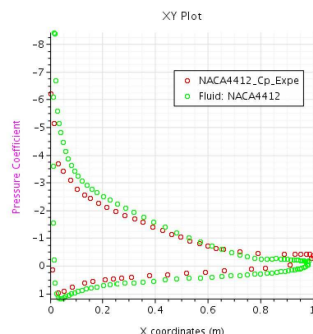
Important 1 Il pourra être utile de cocher un modèle de turbulence dans les options du modèle pour calmer les humeurs instationnaires que l'analyse des courbes de résidus révélera. Si nécessaire, privilégier le modèle de **Spalart Allmaras**.

3.3 Comparaison calcul vs expérimental

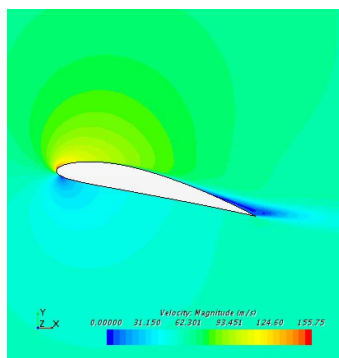
La comparaison des résultats du calcul avec l'expérience consiste à tout d'abord créer une figure, y afficher le C_p calculé par StarCCM+ et enfin d'y superposer les données expérimentales. Procéder selon les étapes décrites ci-après :

- ▷ Charger les données expé. avec clic-droit sur **Tables > New Table > Add File...**
- ▷ Créer une figure avec clic-droit sur **Plot > New Plot > XY Plot**. La renommer *Pressure coefficient*.
- ▷ Sélectionner la frontière où extraire le C_p avec clic-droit et sélectionner NACA4412 pour la **Parts**
- ▷ Spécifier **Pressure coefficient** dans **Y Type > Y Type 1 > Scalar Function**
- ▷ Imposer valeur de référence V_∞ dans **Tools > Field Functions > Pressure coefficient**
- ▷ Ajouter les données expérimentales avec clic-droit sur **Data Series > Add Data** et sélectionner le fichier fourni.
- ▷ Inverser l'échelle des ordonnées avec **Axes > Left Axis** et cocher **Reverse** dans le menu **Properties**

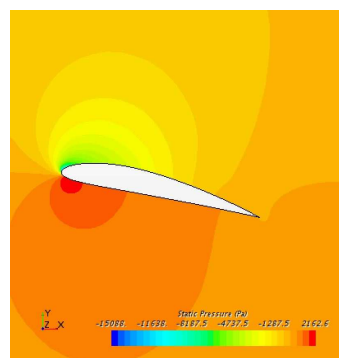
Les figures ci-après illustrent le type de résultats que vous devez obtenir.



(a) Profils de C_p : CFD vs Expé.



(b) Champ de vitesse



(c) Champ de pression

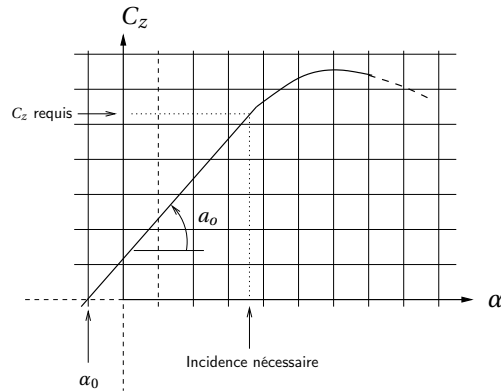
- ▷ Analyser et commenter l'écoulement sur la partie extrados du bord de fuite en vous appuyant par exemple sur l'affichage du champ de vitesse sous forme de vecteurs⁴.

4. La procédure d'affichage est laissée à votre initiative.

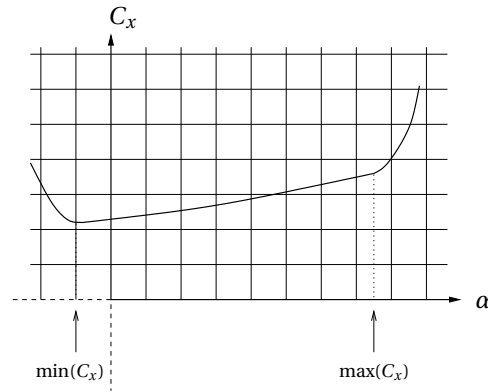
4 Extraction des polaires complètes

Cette partie consiste à déterminer les valeurs des deux coefficients $C_z(\alpha)$ et $C_x(\alpha)$ pour des angles d'incidence α compris entre -5 et 15 degrés.

Les deux figures ci-dessous illustrent le type de courbes à obtenir.



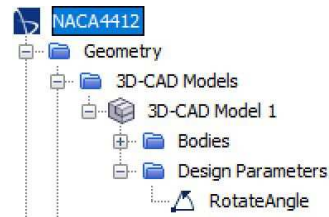
(d) C_z fonction de l'incidence α




(e) C_x fonction de l'incidence α

La mise en place d'un calcul pour une nouvelle incidence est rapide en raison du paramétrage de l'angle α :

- Ouvrir l'onglet **3D-CAD Model 1** dans lequel doivent figurer deux sous-menus **Bodies** et **Design Parameters**

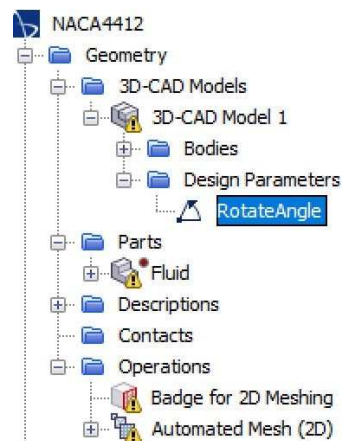


- En ouvrant le second, vérifier la présence du paramètre lié à l'angle

- Modifier la valeur de l'angle dans la partie du bas **Properties**
- Noter l'apparition d'icônes  sur fond jaune signifiant que certaines étapes requièrent d'être mises-à-jour :

1. **3D-CAD Models 1**
2. **Fluid**
3. **Badge for 2D Meshing**
4. **Automated Mesh (2D)**

... avec un clic-droit > **Update** ou **Execute** selon l'étape.



- Effacer les précédentes données de calcul,
- Réinitialiser ,
- Relancer le calcul jusqu'à convergence.

Fiche synthétique 1Importer un profil de points sous CAO-3D

1. Ouvrir une session CAO avec un clic-droit sur **3D-CAD Models > New**,
2. Clic-droit sur **3D-CAD Model 1> Import > 2D Curves**,
3. Sélectionner le fichier de contour avec l'extension .csv^a
4. Cocher les options **Spline** ou **Polyline**^b ainsi que **Close the curve**
5. Editer si nécessaire le *Sketch* nouvellement créé pour y ajouter d'autres frontières tel un contour externe.

La création de fichier d'import au format .csv consiste à associer chacune des lignes du fichier à un jeu de coordonnées X, Y, Z (même en 2D, spécifier un coordonnée Z nulle). Chacune des coordonnées doit être séparée des autres par une virgule "," et le nombre de chiffres significatifs (après la virgule) doit obligatoirement être de 8. Exemple :

```
...  
0.12387309,8.72593618,0.00000000  
...
```

a. csv pour *Comma-Separated Values*

b. Retenir cette dernière option si la courbe spline résultante s'écarte trop du profil

Fiche synthétique 2Importer un profil de points expérimentaux

Le fichier à importer doit être au format .csv mais sur seulement deux colonnes (voir fiche précédente pour le format),

1. Clic-droit sur **Tools > Tables > New Table > File Table**,
2. Sélectionner le fichier dans la boîte de dialogue qui s'ouvre,
3. Cliquer **Open**
4. Ajouter cette table à une fenêtre **Plots** précédemment créée (ou à créer),
5. Y sélectionner **Data Series > Add Data** et sélectionner le fichier précédemment chargé,
6. Gérer les axes et légendes à votre convenance.