

Compte rendu PJT

Élèves :

POUILLY Léo

BREUVART Kylian

Professeur encadrant :

ROMANO Francesco

Table des matières

I)	Présentation	3
II)	Objectifs	3
III)	Création du modèle	3
IV)	Principe de convergence de maillage.....	4
V)	Choix du modèle physique	5
VI)	Convergence du maillage pour le modèle choisit.....	10
VII)	Étude approfondie de notre modèle	11

CFD sur un profil d'aile de planeur

I) Présentation

Dans le cadre de notre étude du profil d'aile d'un planeur, nous avons modélisé à l'aide du logiciel CCM+ le profil d'aile CLARK-Y. Le choix de ce profil provient du prédimensionnement effectué en première partie de notre projet. L'objectif de cette modélisation est d'étudier le comportement de notre profil dans trois cas de figure distincts : en régime laminaire, turbulent et pour un fluide non visqueux.

Rappel du cahier des charges :

$M = 500$ kg, la masse du planeur.

$V = 80$ km/h, la vitesse de vol du planeur.

$L = 22$ m, l'envergure totale du planeur.

$c = 1.25$ m, la corde.

II) Objectifs

L'objectif principal de ce TP est d'analyser l'écoulement de l'air autour d'un profil d'aile à l'aide du logiciel CCM+ afin de déterminer les **coefficients de portance** et de **traînée**, qui sont essentiels en aérodynamique. Pour cela, on va étudier comment la qualité du maillage influence les résultats et le temps de calcul.

Il s'agit de trouver un **équilibre entre précision et performance numérique** : un maillage trop grossier peut fausser les résultats, tandis qu'un maillage trop fin augmente fortement le temps et les ressources de calcul. Le TP vise donc à expérimenter différentes stratégies de maillage, notamment en adaptant la finesse selon les zones d'intérêt autour du profil (comme l'intrados, l'extrados ou le bord d'attaque), afin d'obtenir des résultats fiables tout en optimisant le coût de simulation.

III) Création du modèle

La première étape de la simulation est d'importer le profil d'aile 2D et de s'assurer que l'esquisse est bien un contour fermé. On modifie alors l'esquisse en fermant le bord de fuite du profil. L'étape suivante est de créer le domaine de notre simulation, c'est-à-dire le domaine spatial de notre expérience. Ensuite, on passe à une étape cruciale de notre simulation : le maillage. C'est sur ce principe que repose tout notre étude. Il est

extrêmement important de faire un maillage adapté à l'étude de notre profil. C'est pourquoi nous allons dédier une partie spécifique dans notre rapport à l'explication de cette étape et de comment elle va nous permettre d'obtenir les coefficients de portance et de trainée que l'on recherche.

L'étape d'après consiste à déterminer les caractéristiques physiques de notre écoulement, c'est à cette étape que l'on déterminera si l'on a un écoulement non visqueux, laminaire ou turbulent.

Finalement, on pourra lancer notre simulation afin de pouvoir relever les coefficients qui nous intéressent dans le cadre de notre étude.

IV) Principe de convergence de maillage

IV.1) Etablissement d'un maillage cohérent

Cette étape de notre simulation est comme nous l'avons dit cruciale. Un bon maillage est la clé d'une simulation réussie.

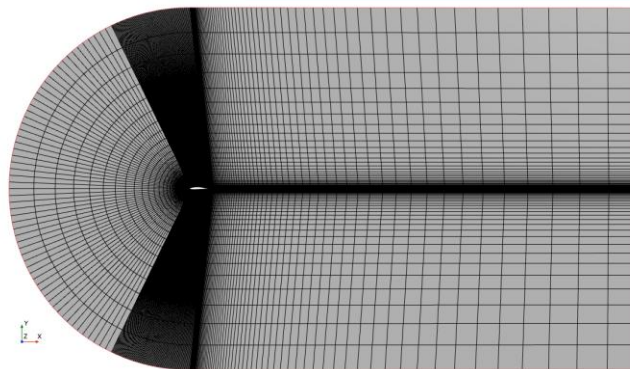


Figure 1 : Vue d'ensemble du maillage

L'objectif est de trouver les coefficients de portance et de trainée pour un coût de calcul minimal, un maillage avec un nombre de divisions important compte plus cher en calcul qu'un maillage avec un faible nombre de divisions.

Il est important d'adapter notre maillage en fonction des différentes zones de notre domaine. Certaines zones de notre domaine vont être le lieu de variations importantes des grandeurs physiques liées à l'écoulement de l'air autour de notre profil et d'autres beaucoup moins.

Simcenter STAR-CCM+

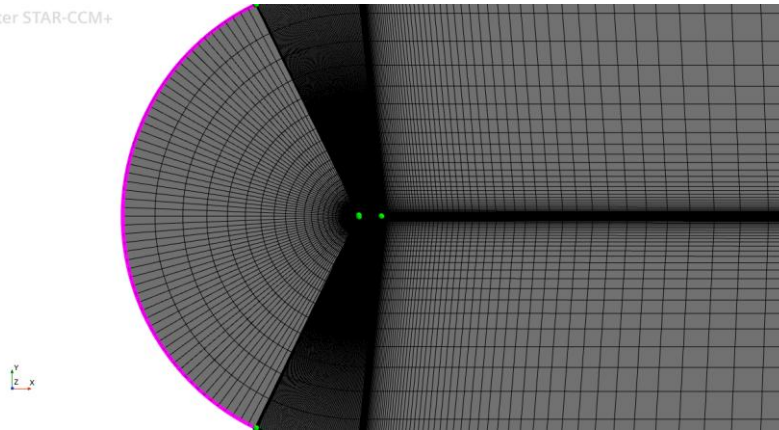


Figure 2 : Maillage du bord d'attaque

La zone en amont du bord d'attaque va être le siège de nombreuses variations des grandeurs physiques liées à l'écoulement de l'air, on se doit de mettre en place un maillage précis afin d'être le plus précis possible dans notre simulation. En revanche, les zones éloignées du profil de l'aile ne vont quasiment pas être affectées par des variations de ces grandeurs, on privilégie alors un maillage simple pour un coût de calcul plus raisonnable.

Les zones les plus importantes demeurent celles situées sur l'intrados et l'extrados où les variations de pression seront les plus importantes.

On comprend alors que la clé d'une simulation réussie est un compromis entre précision et coût de calcul.

V) Choix du modèle physique

Dans notre situation ci-dessous, nous allons nous concentrer sur un écoulement turbulent. En effet, en toute rigueur, nous aurons dû faire une étude complète pour chaque mode d'écoulement. Dans la suite, nous allons quand même interpréter chaque modèle pour un maillage par défaut établi au préalable.

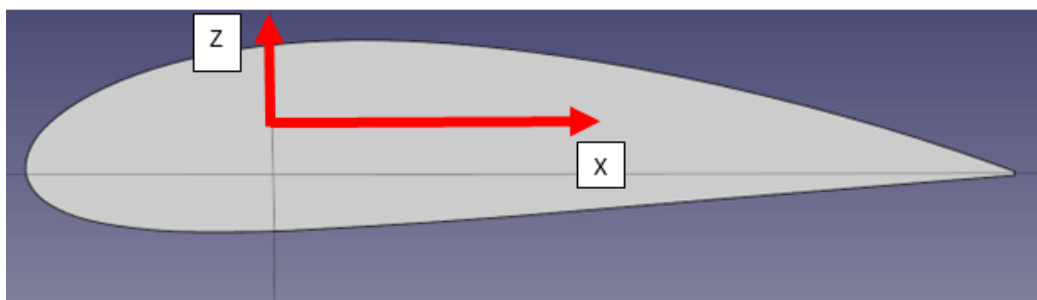


Figure 3 : Profil d'aile de planeur

Dans chaque mode d'écoulement, on trace les courbes de résidus (« residuals ») qui représentent l'évolution de l'erreur numérique dans les équations résolues lors du processus de convergence d'une simulation CFD : c'est donc une **mesure d'erreur locale**

V.1) Écoulement non visqueux

Dans un premier temps, nous effectuons une simulation pour un fluide non visqueux.

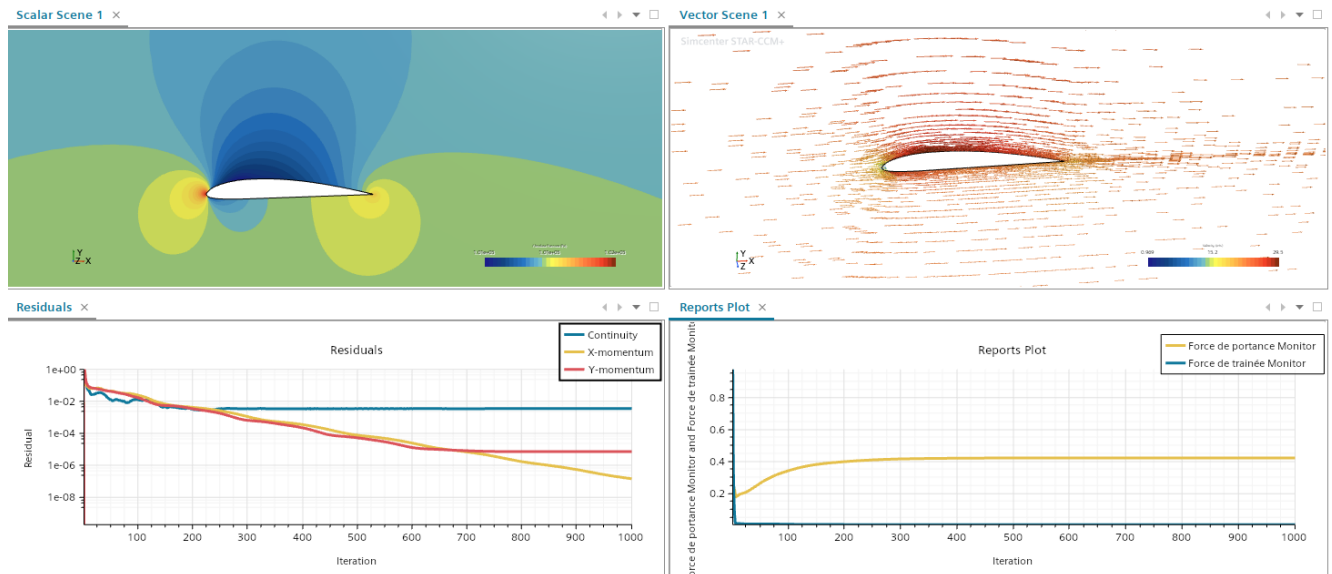


Figure 4 : tracés des courbes de résidus, évolution du gradient de pression, évolution de vitesse de l'écoulement et évolution des forces de portance et de trainée pour un écoulement non visqueux.

IV.1.a) Interprétation des courbes

Pour le champ de pressions :

On observe une haute pression (jaune/rouge) à l'avant de l'objet au niveau du point d'impact du fluide où l'air ralentit fortement. Sur l'extrados de l'aile, on voit une zone de basse pression (bleu), ce qui est typique en aérodynamique : la vitesse de l'écoulement augmente, ce qui réduit la pression ce qui est compatible avec le principe de Bernoulli. À l'arrière de l'objet, il y a une zone de pression intermédiaire (vert), indiquant un sillage où la pression se rééquilibre après le passage de l'objet.

Cette distribution de pression suggère une portance significative (due à la différence de pression entre l'extrados et l'intrados) et une traînée due à la haute pression à l'avant et à la dépression dans le sillage.

Pour la vitesse de l'écoulement :

Le champ de vitesse est représenté par des couleurs (bleu pour une vitesse faible, rouge pour une vitesse élevée) et des vecteurs indiquant la direction du flux. On observe une vitesse élevée (rouge) sur le dessus de l'objet, cohérente avec la basse pression observée dans le champ de pression.

À l'avant de l'objet, la vitesse est faible (bleu), car l'air est comprimé et ralentit au point de stagnation.

À l'arrière, les vecteurs montrent un écoulement plus chaotique, avec des variations de vitesse et des tourbillons, typiques d'un sillage turbulent.

L'accélération de l'écoulement sur le dessus de l'objet confirme la génération de portance. Le sillage turbulent indique une traînée aérodynamique, potentiellement due à un décollement de la couche limite.

Pour les forces de portances et de traînées :

Les courbes de force de portance et de traînée (Reports Plot) se stabilisent après environ 400 itérations, avec des valeurs cohérentes avec les champs observés. La force de portance est positive et constante (≈ 0.4), tandis que la force de traînée est plus faible (≈ 0.2), ce qui est attendu pour un profil aérodynamique.

Résidus :

La courbe « Continuity » descend rapidement et se stabilise jusqu'à environ $3 \cdot 10^{-3}$ puis se stabilise à ce niveau à partir de l'itération 500. Cela indique que la conservation de la masse n'évolue plus mais n'est pas complètement satisfaite car le résidu est encore très haut. En effet, on veut un résidu de l'ordre de 10^{-4} pour considérer une solution convergée de manière robuste. Ce problème de convergence peut venir d'un maillage sous-résolu ou des conditions limites non équilibrées.

La courbe « X-Momentum » a une bonne tendance décroissante et régulière, sans oscillation. Cela montre que l'équation de la quantité de mouvement en X est progressivement mieux résolue ce qui est essentiel dans ce genre de simulation car la traînée est liée à cette direction.

La courbe « Y-Momentum » décroît et se stabilise à partir de 700 itérations autour de 10^{-4} . Ce phénomène de résidu résiduel bloqué peut être dû au fait que l'air génère de la portance et donc un blocage de ce genre peut être dû à une séparation non bien résolue, une instabilité numérique ou encore un problème d'ajustement des conditions limites ou du maillage.

Iteration	Continuity	X-momentum	Y-momentum	Force de traînée	Force de portance
991	3.467481e-03	1.564110e-07	7.074581e-06	3.978323e-04	4.181365e-01
992	3.475259e-03	1.552538e-07	7.062503e-06	3.978317e-04	4.181366e-01
993	3.467481e-03	1.531764e-07	7.074564e-06	3.978312e-04	4.181366e-01
994	3.475257e-03	1.520481e-07	7.062485e-06	3.978307e-04	4.181366e-01
995	3.467480e-03	1.500222e-07	7.074546e-06	3.978302e-04	4.181366e-01

Figure 5 : Relevé des forces de portance et de traînée

On va maintenant déterminer les coefficients de portance et de traînée à l'aide des relations suivantes :

$$C_z = \frac{Z}{\frac{1}{2} \cdot \rho V^2 L \cdot c}$$

$$C_x = \frac{X}{\frac{1}{2} \rho V^2 L c}$$

On trouve :

$$C_z = 5,14 \cdot 10^{-5}$$

$$C_x = 4,79 \cdot 10^{-9}$$

V.2) Écoulement laminaire

Ensuite, nous effectuons une simulation pour un écoulement laminaire.

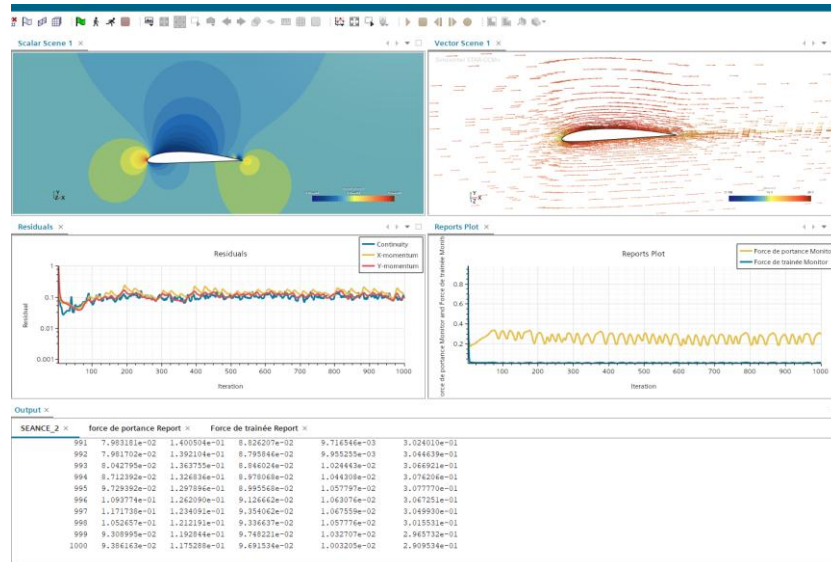


Figure 5 : tracés des courbes de résidus, évolution du gradient de pression, évolution de vitesse de l'écoulement et évolution des forces de portance et de trainée pour un écoulement non visqueux.

V.3) Ecoulement turbulent

Comme évoqué précédemment, nous allons choisir un modèle pour un mode d'écoulement spécifique : écoulement. Il y a plusieurs critères pour pouvoir bien choisir un modèle :

- **Difficulté à faire converger le modèle**
- **Robustesse du modèle** : Aptitude à maintenir sa capacité de calcul malgré les différents changements des paramètres physiques.
- **y^+ lié à y qui est l'épaisseur de la cellule en contact avec la paroi**

V.3.a) Modèle Spallart-Allmaras

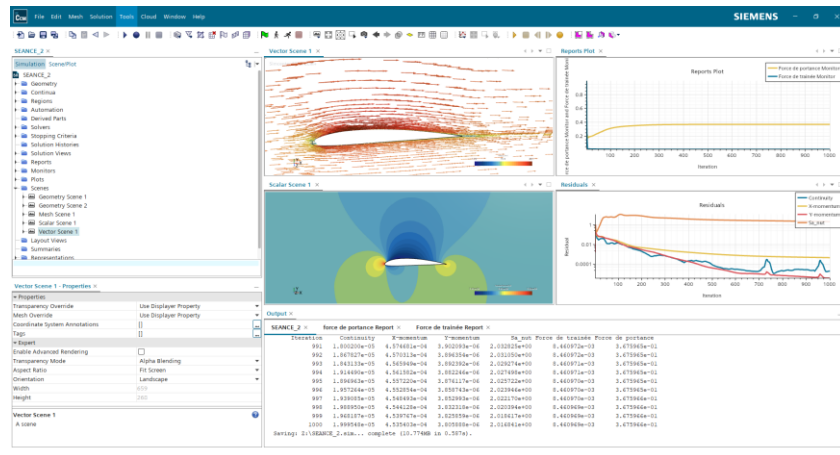


Figure 6 : tracés des courbes de résidus, évolution du gradient de pression, évolution de vitesse de l'écoulement et évolution des forces de portance et de trainée pour un écoulement turbulent (modèle Spallart-Allmaras).

V.3.b) Modèle K- Ω

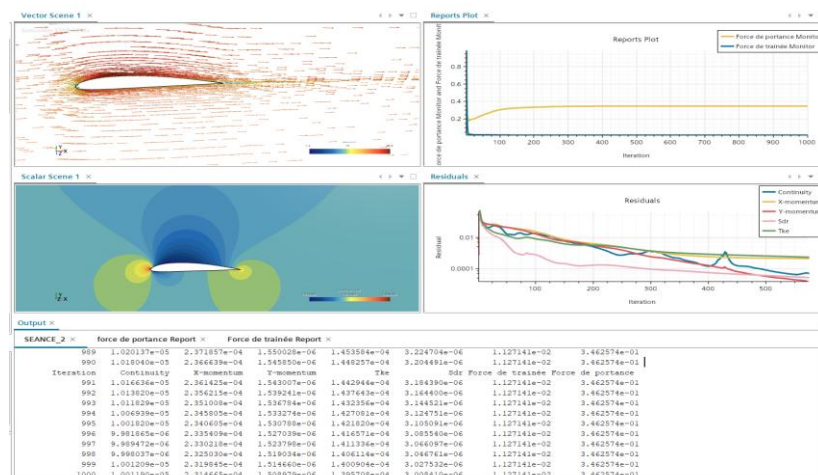


Figure 7 : tracés des courbes de résidus, évolution du gradient de pression, évolution de vitesse de l'écoulement et évolution des forces de portance et de trainée pour un écoulement turbulent (modèle K- Ω).

V.3.c) Modèle K-Epsilon

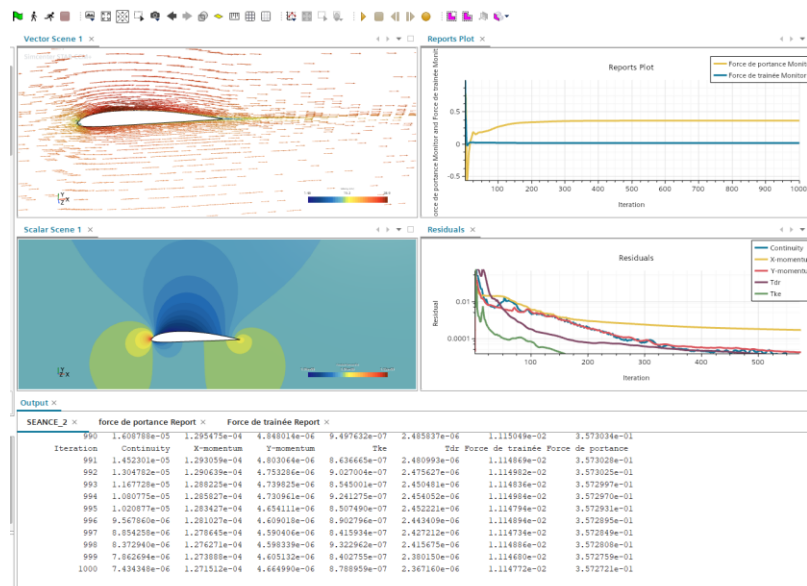


Figure 8 : tracés des courbes de résidus, évolution du gradient de pression, évolution de la vitesse de l'écoulement et évolution des forces de portance et de trainée pour un écoulement turbulent (modèle K-Epsilon).

Le modèle de turbulence K-epsilon a été choisi pour la simulation de l'écoulement autour de l'aile en raison de plusieurs avantages observés :

- **Convergence** : Ce modèle montre une excellente stabilité numérique. Les résidus diminuent régulièrement sans oscillations marquées, et les forces aérodynamiques (portance et traînée) se stabilisent rapidement, ce qui confirme une bonne capacité de convergence.
- **Robustesse** : Le K-epsilon réalisable est reconnu pour sa robustesse face aux variations de maillage et de conditions aux limites. Il maintient ses performances de calcul même en présence de changements physiques, ce qui en fait un choix fiable pour des simulations variées.
- **Compatibilité avec le** : Ce modèle est compatible avec un traitement tout y^+ , ce qui permet d'utiliser un maillage modéré sans nécessiter de raffinement excessif près des parois. Cela convient parfaitement à la grille utilisée dans cette étude, où les valeurs de y^+ sont majoritairement supérieures à 30.

En comparaison, d'autres modèles comme le K-Omega sont plus sensibles au maillage et nécessitent un traitement bas y^+ rendant leur mise en œuvre plus complexe et moins stable dans ce contexte. Le choix du K-epsilon s'impose donc comme une solution équilibrée entre précision, stabilité et simplicité de mise en œuvre.

VI) Convergence du maillage pour le modèle choisit

On va désormais essayer de changer notre maillage en augmentant sa précision et déterminer si nos valeurs sont fiables. On choisira le maillage le moins couteux qui nous permet d'avoir une valeur correcte.

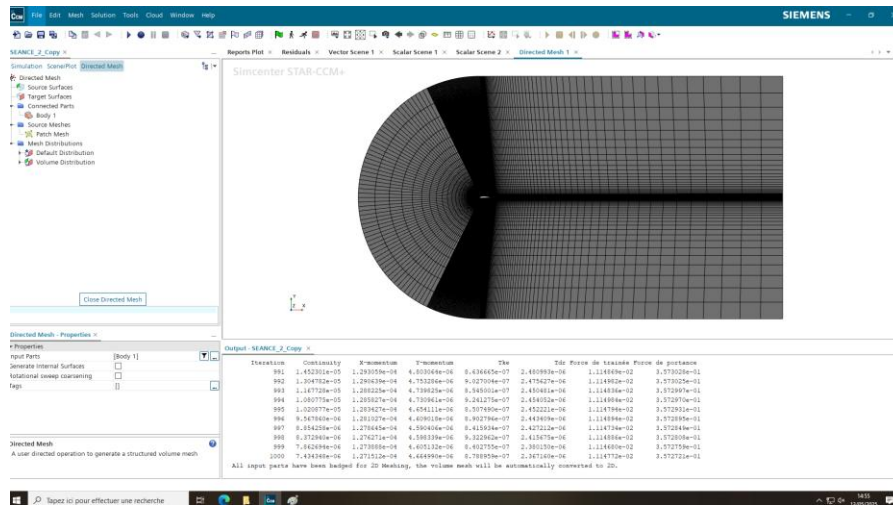


Figure 9 : Maillage initial dans le cadre du modèle K-Epsilon.

Dans un premier temps, on choisit un maillage initial puis on relève la valeur des forces de portance et de trainée. On changera ce maillage afin d'étudier la convergence de ces valeurs.

Le choix du maillage se fera selon les critères expliqués dans la partie IV) de notre rapport.

VI.1) Evaluation du coefficient de portance en fonction du maillage

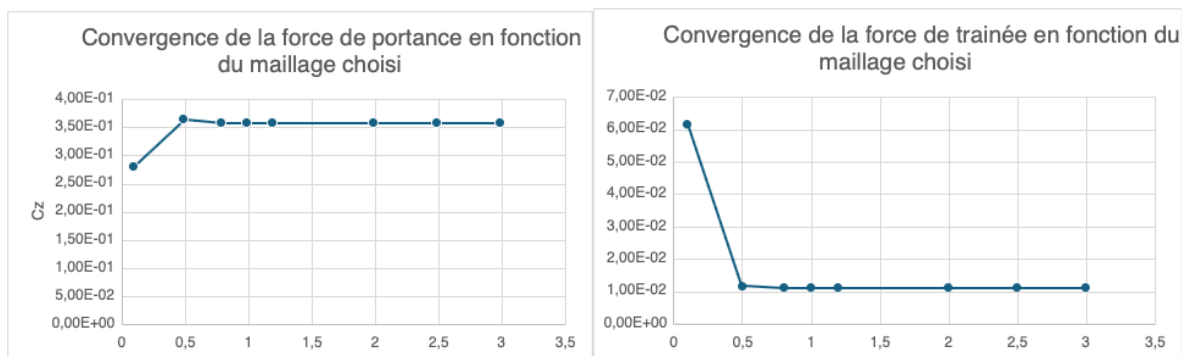


Figure 10 : Évolution de la force de portance et de trainée en fonction du maillage

Le maillage retenu correspond à 80 % de la taille du maillage initial, car il offre un bon compromis entre précision des résultats et coût de calcul raisonnable, tout en garantissant la stabilité numérique et la convergence des simulations.

VII) Étude approfondie de notre modèle

VII.1) Influence de l'angle de calage sur C_z

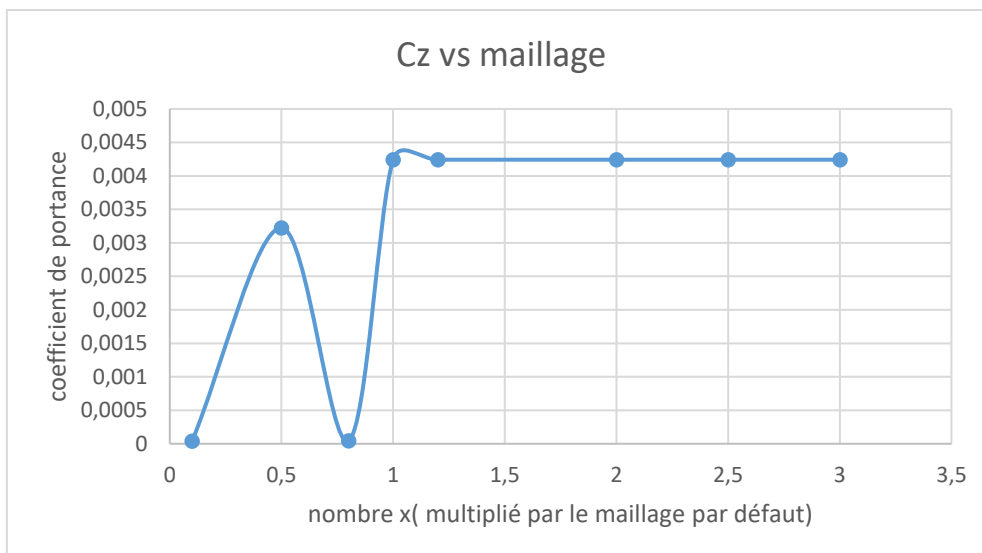


Figure 11 : Évolution du coefficient de portance en fonction du maillage

Jusqu'à $x \approx 1$, C_z varie fortement, on observe des oscillations numériques dues à un maillage trop grossier ou le champ de pression autour du profil est mal capté. Le coefficient de portance nous fait dire qu'il faut prendre un maillage 1,2 au lieu de 0.8 qui n'est pas trop coûteux et on atteint bien une convergence de maillage.

□

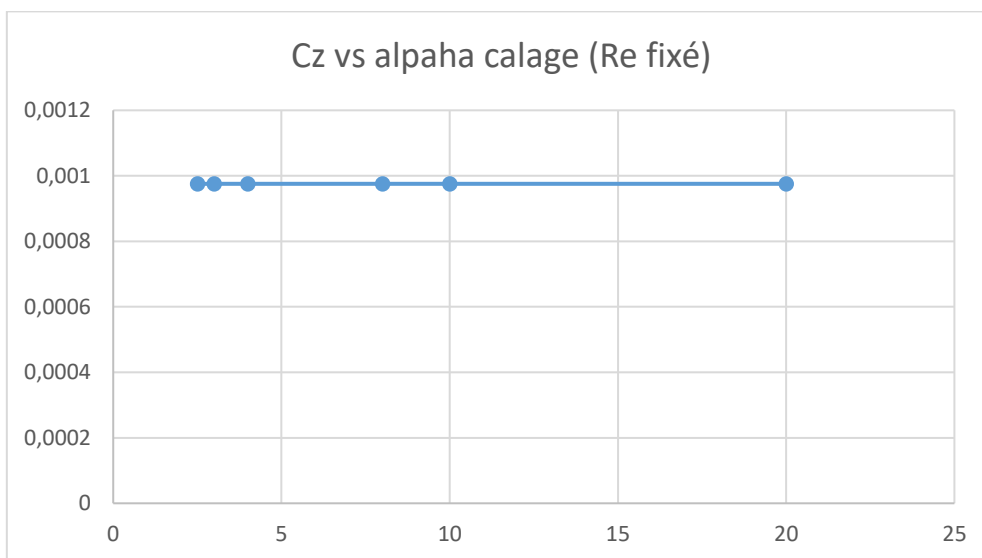


Figure 12 : Évolution du coefficient de portance en fonction de l'angle de calage

Dans cette courbe, le coefficient de portance C_z reste quasiment constant malgré l'augmentation de l'angle de calage. Ce résultat est surprenant, car en théorie, C_z devrait croître avec l'angle d'attaque jusqu'au décrochage. Cela suggère un **problème de modélisation ou de configuration** dans la simulation. Il est possible que l'angle de calage ne soit pas correctement appliqué sur la géométrie, ou que les forces soient mal projetées, ce qui fausse l'évaluation de la portance. Pourtant nous avons bien fait attention à définir notre force de portance dans le repère mobile.

VII.2) Influence du Reynolds sur C_z

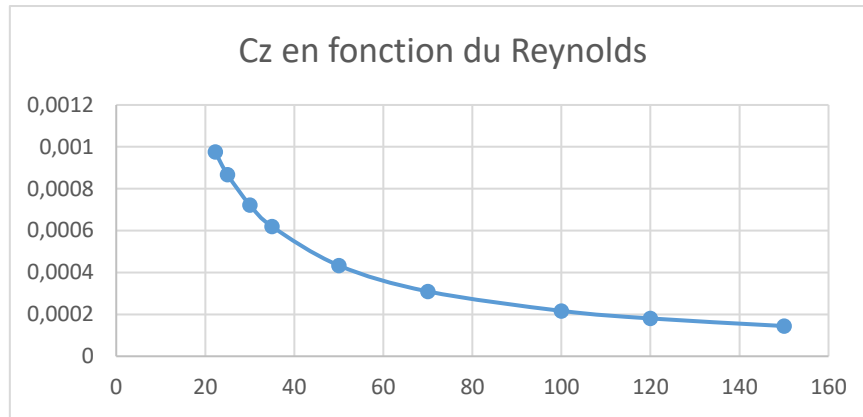


Figure 13 : Évolution du coefficient de portance en fonction du Reynolds

On observe ici que le coefficient de portance C_z diminue lorsque le Reynolds augmente, ce qui est à l'inverse du comportement aérodynamique attendu. Cela peut s'expliquer par le modèle $K - \epsilon$ utilisé, qui n'est pas fiable à bas Reynolds car il surestime les pertes turbulentes. De plus, un maillage mal adapté aux différentes valeurs de Reynolds peut amplifier cette erreur. Ce comportement met en évidence la nécessité d'un modèle de turbulence mieux adapté aux écoulements en régime de transition ou à faible Reynolds.

Dans cette étude en régime turbulent avec le modèle $K - \epsilon$, nous avons analysé l'influence du maillage, de l'angle de calage et du nombre de Reynolds sur le coefficient de portance C_z . Les résultats montrent une bonne convergence du maillage, ce qui valide la stabilité numérique de la simulation. En revanche, les variations de C_z avec l'angle de calage et le Reynolds révèlent des limitations physiques du modèle utilisé. Le comportement anormalement constant de C_z en fonction de l'angle de calage suggère une mauvaise application de l'angle ou un problème de projection des forces. De plus, la décroissance de C_z avec le Reynolds, contraire à la réalité physique, met en évidence les faiblesses du modèle $K - \epsilon$ à bas Reynolds. Ces résultats soulignent l'importance du choix du modèle de turbulence et d'un paramétrage rigoureux pour obtenir des prédictions aérodynamiques fiables.

