

Filière Systèmes industriels

Orientation Design & Materials

Travail de bachelor Diplôme 2023

Quentin Torrent

*Appendices Aérodynamiques pour Formula
Student*

-  *Professeur*
Gabriel Paciotti
-  *Expert*
Florian Cottier
-  *Date de la remise du rapport*
18.08.2023

Ce rapport est l'original remis par l'étudiant.
Il n'a pas été corrigé et peut donc contenir des inexactitudes ou des erreurs.

SYND	ETE	TEVI
X	X	X

Filière / Studiengang SYND	Année académique / Studienjahr 2022-23	No TB / Nr. BA DM/2023/78
Mandant / Auftraggeber <input type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input checked="" type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>	Etudiant / Student Quentin Torrent Professeur / Dozent Gabriel Paciotti	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input checked="" type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes) Florian Cottier , florian.cottier@nammo.ch Nammo MTH SA – Rue Principale 3 – 1987 Hérémece	

Titre / Titel

Appendices aérodynamiques pour Formula Student

Description / Beschreibung

Le Formula Student est une compétition estudiantine automobile internationale d'envergure mondiale, mobilisant près de 800 écuries et initiée en 1981 par la société SAE International. Elle a pour objectif la formation de futurs professionnels à l'ingénierie de la mobilité et le développement des compétences des élèves-ingénieurs à la conception, la fabrication et la validation de solutions modernes de mobilité terrestre de compétition.

Le Valais-Wallis Racing Team développe actuellement sa première voiture de course électrique. Afin d'augmenter la vitesse lors des passages en courbes, il est nécessaire de compléter le véhicule d'appendices permettant d'augmenter les appuis aérodynamiques. Le but de ce projet sera donc l'étude, la conception et l'optimisation des appendices aérodynamiques (ailerons avant/arrière et diffuseur) pour cette voiture de course électrique.

Objectifs / Ziele

- Dresser un état de l'art au travers des solutions existantes dans divers types de compétitions
- Etablir un catalogue de solutions et déterminer la solution la plus prometteuse en termes de design et d'interface au véhicule
- Concevoir (CAO + CFD) le design en détail ainsi que son interface au véhicule
- Analyser le comportement aérodynamique du système et en justifier son efficacité
- Etablir le dossier d'exécution en vue de sa production.

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum

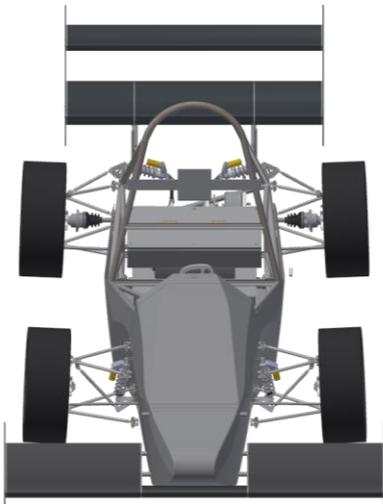
Responsable de l'orientation /
Leiter der Vertiefungsrichtung:

¹ Etudiant / Student:


Délais / Termine

Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags:
15.05.2023Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation:
19 - 20.06.2023Remise du rapport final / Abgabe des
Schlussberichts:
18.08.2023, 12:00Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten:
25.08.2023 – HEI
28.08.2023 – Monthey
31.08.2023 – VispDéfense orale / Mündliche Verfechtung:
Semaine/Woche 36 (04-07.09.2023)

¹ Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.
Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.



Appendices aérodynamiques pour Formula Student

Diplômant/e Quentin Torrent

Objectif du projet

L'objectif de ce projet est de proposer une première étude et conception des appendices aérodynamiques (aileron avant/arrière) pour la formule électrique développée par l'équipe Valais-Wallis Racing Team dans le cadre de la compétition Formula Student.

Méthodes | Expériences | Résultats

En première étape, des résultats de références sur des formes simples provenant de la littérature et les résultats obtenus à l'aide d'un logiciel d'analyse éléments finis (Ansys CFX) ont été comparés. Ce logiciel permet de simuler et d'analyser les écoulements aérodynamiques autour de corps physiques.

Une fois ces résultats validés, l'étude s'est portée sur 6 éléments principaux agissant significativement sur l'aérodynamique d'une monoplace. Chacun a été étudié individuellement afin d'en comprendre le comportement. La voiture aussi a été soumise au logiciel, d'abord sans appendice aérodynamiques afin d'obtenir une référence et d'étudier ensuite l'efficacité de chaque élément additionnel.

Les résultats obtenus ont permis de concevoir les premiers modèles d'ailerons avant et arrière et surtout de comprendre l'effet des réglages de position et d'inclinaison relativement au flux d'air, permettant ainsi d'optimiser les performances du système en fonction des besoins.

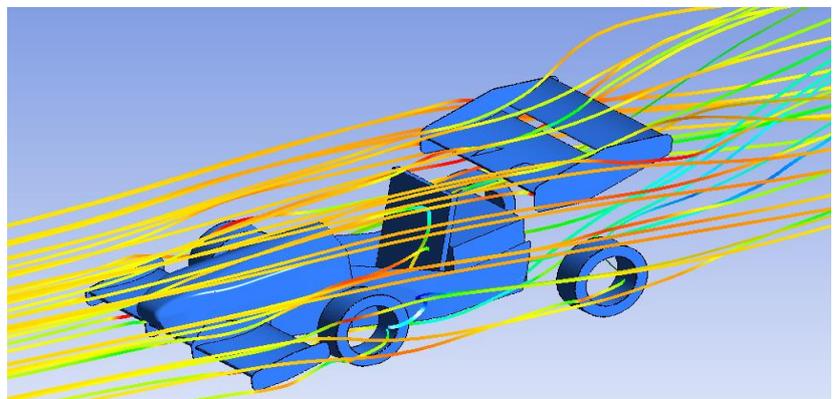
Cette étude montre la capacité à produire un appui au sol additionnel de 200N et ce même à des vitesses aussi faibles que 50km/h et fournit un pré-design général des appendices aérodynamiques principaux de la voiture de course.

Travail de diplôme
| édition 2023 |

Filière
Système industriel

Domaine d'application
Design & Materials

Professeur responsable
Gabriel Paciotti
Gabriel.paciotti@hevs.ch



Visualisation des écoulements 3D
autour de la formule équipée de
ses appendices aérodynamiques

Table des matières

2. INTRODUCTION	2
2.1. Cadre du projet	2
2.2. Déroulement du travail	3
2.3. Intégration de la durabilité au sein de ce projet	3
3. ETAT DE L'ART	4
3.1. Bases théorique	4
3.1.1. <i>Concepts fondamentaux en aérodynamique</i>	4
3.1.2. <i>Modèles mathématiques</i>	4
3.1.3. <i>Types d'écoulements</i>	5
3.1.4. <i>Nombre de Reynolds</i>	5
3.1.5. <i>Nombre de Strouhal</i>	6
3.1.6. <i>Equations de Bernoulli</i>	6
3.1.1. <i>Effet de la différence de pression sur un solide</i>	7
3.1.2. <i>Profil aérodynamique</i>	8
3.1.3. <i>Analogie de l'équation de Bernoulli pour un profil d'aile</i>	8
3.1.4. <i>Forces sur un corps soumis à un écoulement</i>	9
3.1.5. <i>Coefficients de traînée et de portance</i>	9
3.1.6. <i>Les types de traînées aérodynamiques</i>	10
3.1.7. <i>Les traînées parasites</i>	10
3.1.8. <i>La traînée Induite</i>	10
3.1.9. <i>La traînée de compressibilité ou d'onde</i>	11
3.1.10. <i>Couche limite</i>	11
3.1.11. <i>Notion Yplus</i>	12
3.2. Simulation numérique	13
3.2.1. <i>NACA 4310</i>	13
3.2.2. <i>Corps cylindrique</i>	14
3.2.1. <i>Ahmed</i>	17
4. CONCEPTION –AÉRODYNAMIQUE	19
4.1. Méthodologie	19
4.1.1. <i>Règlementation Formula Student</i>	19
4.1.2. <i>Critères de choix des profils</i>	20
4.1.3. <i>Profils choisis</i>	21
4.1.4. <i>Choix des éléments étudiés</i>	23
4.2. Etudes aérodynamiques	24
4.2.1. <i>Simulation de la voiture complète</i>	24

4.2.2.	<i>Modèle de simulation</i>	25
4.2.3.	<i>Influence de la proximité du sol</i>	28
4.2.4.	<i>Influence d'un saut de vent</i>	30
4.2.5.	<i>Influence de l'aileron avant sur les roues</i>	32
4.2.6.	<i>Multi-Element Airfoil</i>	34
5.	CONCEPTION – MÉCANIQUE	36
5.1.	Choix de conception	36
5.1.1.	<i>Appendices</i>	36
5.1.2.	<i>Interfaçage</i>	38
5.2.	Prédimensionnement des appendices	39
5.2.1.	<i>Prédimensionnement des éléments en composites</i>	40
5.2.2.	<i>Prédimensionnement de l'interfaçage arrière</i>	43
6.	ANALYSE DE LA VOITURE COMPLÈTE	46
6.1.	résultats	46
6.2.	Influence de la traînée sur le temps d'accélération	47
7.	CONCLUSION	49
7.1.	Conclusion	49
7.2.	Perspectives d'améliorations	49
8.	SOURCES	50
9.	TABLE DES FIGURE	51
10.	REMERCIEMENTS	53
11.	SIGNATURE	53
12.	ANNEXES	53
12.1.	Mise En Plans	53
12.2.	Fichier Excel Résultats Forme Simple	53
12.3.	Fichier Excel De Conception Des Appendices	53
12.4.	Fichier Excel Résultats Simulation 3D	53

2. INTRODUCTION

2.1. CADRE DU PROJET

Le Formula Student représente une compétition estudiantine internationale d'envergure mondiale, destinée aux étudiants en ingénierie, qui a vu le jour en 1981 sous l'impulsion de la société SAE International. Son principal objectif réside dans la préparation des futurs professionnels l'ingénierie de la mobilité en offrant aux élèves-ingénieurs l'opportunité de développer leurs compétences en matière de conception, de fabrication et de validation de solutions modernes de mobilité axées sur la compétition. À ce jour, près de 800 équipes participent activement à cet événement.

L'équipe VRT (*Valais Racing Team*) fondée il y a une année par un groupe d'étudiant s'est lancé le défi de concevoir sa première monoplace pour intégrer la compétition. Un objectif qu'elle a récemment fièrement validé avec sa participation à l'évènement de Barcelone 2023. L'objectif final de la VRT est de réaliser la formule électrique la plus performante de la compétition. Pour y arriver ces membres travaillent sans relâche durant leur temps libre pour concevoir et optimiser les différents composants de leur formule tel que le châssis, le groupe motopropulseur et bien d'autre encore. Dans leur quête de performance et d'optimisation ils ont besoin d'une étude et d'une optimisation de l'aérodynamique de la monoplace qui actuellement possède uniquement une coque en fibre autour du cockpit.

L'objectif de ce travail est donc de fournir à la VRT la première étude et la première conception d'un kit aérodynamique leur permettant d'augmenter l'efficacité de leur véhicule. Ce document apporte également une base référence à partir de laquelle elle pourra continuer de développer et optimiser les différents composants aérodynamiques.



Figure 1 : Illustration de la première formule électrique conçue entièrement par l'équipe Valais Racing Team

2.2. DÉROULEMENT DU TRAVAIL

Le déroulement de ce Travail se décompose en quatre parties distinctes. La première, aborde les notions théoriques de bases de la mécanique des fluides qui sont nécessaire à la compréhension et à la conception d'éléments aérodynamique. Cette partie contient également 3 simulations préliminaires permettant la prise en main du logiciel de simulation Ansys CFX. Ces simulations permettent de visualiser certains phénomènes physiques, d'effectuer des liens avec la théorie ou encore d'évaluer la crédibilité des modèles numériques utilisé en comparant les résultats à des sources connues.

La deuxième partie permet de choisir en fonction de critères pertinent pour cette étude trois profils d'aile qui seront utilisé dans les études. Ces études par simulation numérique (*Ansys CFX*) traitent 6 des nombreux éléments qui composent un kit aérodynamique. Il s'agit des éléments qui ont été jugés comme étant les plus judicieux pour une première itération. Les résultats obtenus serviront à la conception CAO des premiers appendices aérodynamiques.

La troisième partie décrit la conception CAO des appendices avant et arrière ainsi que leur interfaçage au véhicule. Les choix de conception, les hypothèses et un prédimensionnement des différents éléments est présenté dans cette partie.

Finalement, la dernière étape consiste à évaluer l'efficacité des appendices réalisés. Pour le faire des simulation 3D de la voiture complète permettent de comparer ces coefficients de portance et de traînée avec et sans kit aérodynamique sont effectuées.

2.3. INTÉGRATION DE LA DURABILITÉ AU SEIN DE CE PROJET

La conception d'un aileron pour une voiture de Formule 1 peut être accordée avec les Objectifs de Développement Durable (ODD) des Nations Unies. En intégrant des principes de durabilité et d'efficacité, ce projet peut contribuer à plusieurs ODD. Par exemple, en optimisant l'aérodynamisme de l'aileron, on peut améliorer l'efficacité énergétique de la voiture, réduisant ainsi la consommation de carburant et les émissions de gaz à effet de serre, ce qui soutient l'ODD n° 7 (Énergie propre et d'un coût abordable) et l'ODD n° 13 (Mesures relatives à la lutte contre les changements climatiques).

De plus, une conception intelligente de l'aileron peut également contribuer à augmenter la sécurité des conducteurs en améliorant la stabilité et la maniabilité à haute vitesse, ce qui s'aligne avec l'ODD n° 3 (Bonne santé et bien-être). La recherche et le développement nécessaires pour créer un aileron performant peuvent favoriser l'innovation technologique (ODD n° 9), tout en encourageant la collaboration entre les ingénieurs, les scientifiques et l'industrie automobile (ODD n° 17 - Partenariats pour la réalisation des objectifs).

En résumé, un projet de conception d'aileron pour une voiture de Formule 1 peut être conçu de manière à soutenir plusieurs Objectifs de Développement Durable, en visant à améliorer l'efficacité énergétique, la sécurité et l'innovation dans l'industrie automobile, tout en minimisant l'impact environnemental et en favorisant des partenariats constructifs.

3. ETAT DE L'ART

3.1. BASES THÉORIQUE

3.1.1. Concepts fondamentaux en aérodynamique

L'aérodynamique est une branche de la dynamique des fluides qui porte sur l'étude de l'écoulement de l'air autour d'un corps. Le but est d'observer les phénomènes physiques générés autour de ces corps, comme les forces de portance et de traînée. Dans le cas d'une étude pour un véhicule automobile le but sera de réduire l'impact de la traînée pour augmenter son rendement énergétique ainsi que son comportement en fonctionnement.

Les études aérodynamiques se divisent en deux parties distinctes. L'aérodynamique incompressible et compressible en fonction du nombre de Mach auquel évolue le fluide.

Le nombre de Mach est le rapport de la vitesse du fluide avec la célérité du son.

Équation 1 : Nombre de Mach [1]

$$Ma = \frac{C}{c}$$

Ma : Nombre de Mach [-]

C : Vitesse du fluide ou du mobile en déplacement [m/s]

c : Célérité du son [m/s]

- L'aérodynamique incompressible concerne les écoulements pour lesquels le nombre de Mach est inférieur à 0.3 environ. Cela correspond à une vitesse d'environ 102.9[m/s]. Cette classe d'écoulement permet d'émettre des hypothèses simplificatrices.
- L'aérodynamique compressible concerne les écoulements à vitesses supérieures à 0.3 Mach. Elle se subdivise en plusieurs catégories, subsonique, transsonique, supersonique et hypersonique.

Dans les études qui suivent le domaine d'intérêt est le sport automobile. Les véhicules évoluant à des vitesses bien inférieures à 0.3 Mach, tous les écoulements sont considérés comme étant incompressibles.

3.1.2. Modèles mathématiques

Il existe différents modèles mathématiques développés au fil du temps pour tenter de modéliser au mieux les écoulements.

- Equations de Navier-Stokes, lorsque les effets visqueux ne sont pas négligeables. Le nombre de Reynolds est prépondérant pour quantifier ces effets.
- Equations d'Euler, lorsque les effets visqueux sont négligeables (fluide parfait).
- Equations de Stokes, lorsque les effets visqueux sont conséquents par rapport aux effets inertiels (Reynolds proche de 0).

Dans cette études les simulations sont basées sur les équations RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes). On peut les définir comme étant les équations moyennées de Navier Stokes.

3.1.3. Types d'écoulements

Il existe plusieurs types d'écoulements qui se manifeste en fonction de la vitesse à laquelle évolue le fluide (ou le mobile). Pour des faibles nombres de Reynolds, le régime est appelé laminaire. Il devient ensuite turbulent à mesure que le nombre de Reynolds augmente.

Dans un régime laminaire les particules du fluide se déplacent parallèlement à la vitesse de l'écoulement. A l'inverse, dans un régime turbulent les particules ne respectent pas d'ordre précis, leur vitesse peut par conséquent être parallèle ou perpendiculaire à l'écoulement.

Les écoulements peuvent également être :

- *Stationnaire* : qui ne varie pas dans le temps
- *Instationnaire* : qui varie dans le temps

Un exemple d'écoulement instationnaire sont les allées de Von Karman dans le sillage d'un cylindre qui seront abordées plus tard.

3.1.4. Nombre de Reynolds

Il s'agit d'un nombre adimensionnel utilisé en mécanique des fluides pour caractériser un écoulement, principalement la nature de son régime (laminaire, stationnaire, instationnaire ou turbulent). Il représente physiquement le rapport entre les forces d'inerties et de viscosité. Il permet également d'introduire la notion de similitude dans les couches limites. Cela permet de garantir que les efforts mesurés sur une maquette peuvent s'extrapoler à une taille réelle[2].

Équation 2 : Formule du nombre de Reynolds [3]

$$Re = \frac{C * L}{\nu}$$

Re : Nombre de Reynolds [-]
C : Vitesse du fluide ou du mobile en déplacement [m/s]
L : Longueur du corps ou corde pour les profils [m]
ν : viscosité cinématique du fluide [m²/s]

Il existe pour chaque géométrie et écoulement un nombre de Reynolds critique qui marque la transition du régime laminaire vers le régime turbulent. A noter que la transition n'a pas lieu exactement lorsque le Re critique est atteint, cela peut varier en fonction des états de surface ou d'éventuelles perturbation de l'écoulement.

- Dans une conduite fermée le $Re_{crit}^{lam \rightarrow turb}$ se situe entre 2000 et 3000 [3]
- Pour un cylindre placé perpendiculairement à l'écoulement son $Re_{crit}^{lam \rightarrow turb}$ se situe à environ 3.8×10^5 [4]
- Pour un profil d'aile de type NACA le $Re_{crit}^{lam \rightarrow turb}$ peut se trouver au-delà de 7×10^6 [5]

3.1.5. Nombre de Strouhal

Le nombre de Strouhal est un nombre adimensionnel représentant le nombre d'oscillation du fluide par unité de temps en fonction de la vitesse initiale de l'écoulement. En d'autre terme ce nombre permet de calculer la fréquence des lâchers de tourbillon en fonction de la vitesse de l'écoulement et d'une dimension caractéristique du corps soumis à l'écoulement. Ces lâchers de tourbillons sont appelés allées de Von-Karman.

Équation 3 : Nombre de Strouhal [2]

$$St = \frac{f_t * L}{C}$$

St : Nombre de Strouhal [-]

f_t : Fréquence d'émission des structures tourbillonnaires [Hz]

L : Dimension caractéristique (p.ex. le diamètre pour un cylindre) [m]

C : Vitesse du fluide ou du mobile en déplacement [m/s]

3.1.6. Equations de Bernoulli

L'équation de Bernoulli est fondamentale en mécanique des fluides. Elle permet entre autres de comprendre l'évolution de la vitesse et de la pression autour d'un corps.

Sa théorie repose sur le fait que l'énergie contenue dans le fluide est constante le long d'une ligne de courant. Elle se présente comme suit :

Équation 4 : Equation de Bernoulli [3] en un point sur une ligne de courant

$$P + 0.5 * \rho * C^2 + \rho * g * h = \text{constant}$$

P : Pression statique du fluide au point fixé [Pa]

ρ : Masse volumique du fluide [kg/m³]

C : Vitesse du fluide au point fixé [m/s]

g : Accélération gravitationnelle [m/s²]

h : Altitude du fluide au point fixé [m]

Hypothèses faites pour l'application de Bernoulli [3] :

- Fluide incompressible (densité constante)
- Régime stationnaire
- Fluide parfait (non visqueux)

On peut par l'équation de la continuité de Bernoulli[3] démontrer que la vitesse diminue ou augmente respectivement si la section de la conduite augmente ou diminue (Figure 2).

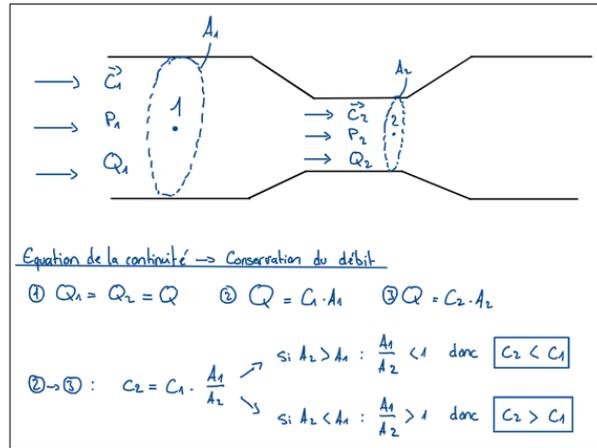


Figure 2 : Démonstration de la variation de la vitesse sur une ligne de courant dans une conduite fermée en fonction du changement de section selon l'équation de la continuité de Bernoulli

On peut ensuite en conclure que la pression augmente à mesure que la vitesse diminue et inversement grâce à l'équation de la conservation de l'énergie de Bernoulli (Figure 3).

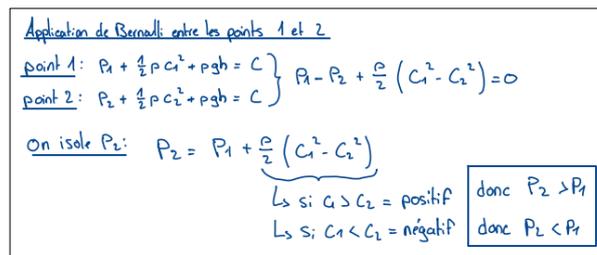


Figure 3: Démonstration de l'évolution de la pression en fonction de la variation de vitesse sur une ligne de courant selon Bernoulli

3.1.1. Effet de la différence de pression sur un solide

Il est possible, à l'aide du principe fondamentale de la statique de représenter l'effet d'une différence de pression entre deux faces d'un même solide. Il en résultera une force positive ou négative (selon le référentiel) respectivement si la pression 1 est inférieure ou supérieure à la pression 2.

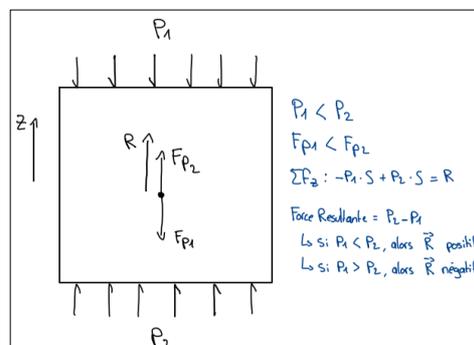


Figure 4 : Démonstration de la force résultante d'une différence de pression entre les faces inférieur et supérieur d'un corps volumique

3.1.2. Profil aérodynamique

En aérodynamique automobile les profils utilisés sont les même que ceux utilisés en aéronautique. Ces profils servent normalement à créer une force de portance orientée verticalement vers le haut (F_L en Figure 5). Dans l'automobile ils sont simplement retournés ce qui leur permet de créer une force dite de déportance ou d'appuis orientée vers le bas.

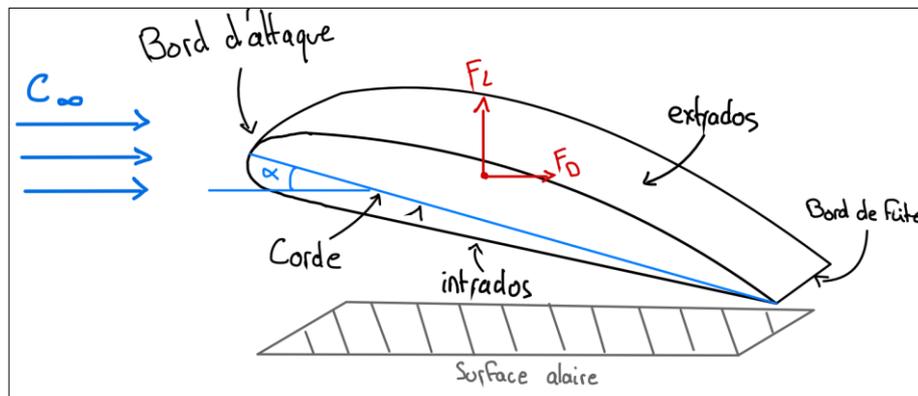


Figure 5 : Illustration d'un profil d'aile de type NACA utilisé en aéronautique

- Bord d'attaque** : Partie frontale du profil
- Corde** : Segment de droite en le borde de fuite et le bord d'attaque
- Bord de fuite** : Partie Arrière du profil
- Extrados** : face qui se situe du même côté que la cambrure indépendamment du sens de la portance
- Intrados** : face opposée à la cambrure indépendamment du sens de la portance
- Angle d'incidence (alpha)** : L'angle entre la direction de l'écoulement et la corde
- Surface alaire** : Surface considérée pour les calculs des forces sur un profil d'aile

Les profils les plus connus sont les NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). Il existe cependant une multitude de profil répondant à des normes différentes sur le marché. Ils offrent tous en fonction de leur géométrie des propriétés différentes.

3.1.3. Analogie de l'équation de Bernoulli pour un profil d'aile

Il est possible de faire l'analogie de la loi de Bernoulli pour un profil de type NACA en schématisant le flux d'air dévié par ce corps. En supposant que l'écoulement est contenu dans un volume rectangulaire, on voit que la section de l'écoulement se restreint et donc entraine une augmentation de la vitesse de l'écoulement à l'extrados. Cette augmentation de vitesse crée une diminution de pression comme vu précédemment (Figure 3).

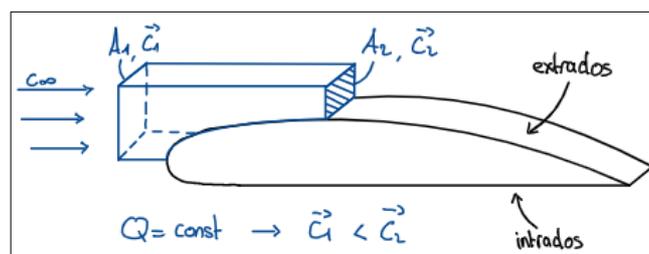


Figure 6 : Démonstration simplifiée de Bernoulli pour un profil d'aile de type NACA

3.1.4. Forces sur un corps soumis à un écoulement

Les calculs d'efforts sur un corps soumis à un écoulement sont généralement complexes. Cela car ils doivent tenir compte de multiples phénomènes comme la déviation des lignes de courant, les efforts de frottement au sein de la couche limite composé d'éventuels décollements, les turbulences générées en aval ou encore la géométrie du solide.

C'est pour cette raison qu'il est possible de résumer ces efforts avec des formules générales. On distingue une force de portance et une force de traînée. La force de portance est de direction perpendiculaire au déplacement du mobile tandis que la force de traînée elle est de direction opposée au sens de déplacement du mobile.

Équation 5 : Formules générales des forces de traînée (Drag) et de portance (Lift) [3]

$$\text{Drag : } F_d = 0.5 * \rho * S * C_d * C^2$$

$$\text{Lift : } F_l = 0.5 * \rho * S * C_l * C^2$$

ρ : Masse volumique du fluide [kg/m³]

S : Section caractéristique considérée [m²]

C_d : Coefficient de traînée [-]

C_l : Coefficient de portance [-]

C : Vitesse du fluide ou du mobile en déplacement [m/s]

Il est important de noter que ces équations sont une approximation permettant de calculer manuellement ces forces. Pour des résultats plus précis, il est nécessaire d'avoir recourt à des simulations numériques qui elles sont basées sur les équations de Navier Stokes[6] ou encore réaliser des expérimentations en soufflerie.

3.1.5. Coefficients de traînée et de portance

Il s'agit de nombres sans dimensions utilisés pour quantifier les forces agissant sur un corps dans un écoulement. Ils sont régulièrement utilisés car ils permettent de transposer les efforts mesurés sur une maquette au modèle réel.

Généralement lorsqu'on évoque le coefficient de traînée il se compose d'au minimum la somme des effets visqueux et de pression (cf. chapitre 3.1.7)[3]. Il existe également d'autres effets qui peuvent s'ajouter à la traînée selon les cas étudiés (cf. chapitre 3.1.6).

Les coefficients aérodynamiques s'obtiennent à l'aide de mesures expérimentales ou à l'aide de simulation numériques et s'expriment comme suit :

Équation 6 : Formule générale du coefficient de traînée (C_d) et de portance (C_l) [3]

$$C_d = \frac{2 * F_d}{\rho * S * V^2} \quad C_l = \frac{2 * F_l}{\rho * S * V^2}$$

Les paramètres sont identiques à la formule de la force de traînée (cf. Équation 5)

Ces coefficients varient selon le type d'écoulement et la géométrie du corps. Pour un corps aux arêtes vives, la couche limite décolle toujours au même endroit, ils dépendent donc principalement de la géométrie. Dans le cas d'un corps profilé¹ ils dépendent également du nombre de Reynolds car la vitesse influence fortement l'écoulement à proximité de sa surface.

3.1.6. Les types de traînées aérodynamiques

En aérodynamique la traînée se traduit par une force de direction opposée au déplacement du corps dans l'écoulement. Cela entraîne des effets souvent indésirables comme :

- Génération de structure tourbillonnaire
- Diminution du rendement énergétique du groupe motopropulseur
- Echauffement de la surface du mobile
- Génération de bruit

Il existe plusieurs traînées qui sont différenciées en trois types principaux :

- Les traînées parasites
- La traînée induite
- La traînée d'onde

3.1.7. Les traînées parasites

La traînée de frottement (efforts visqueux)

L'action mécanique du frottement apparaît à proximité de la surface du profil. Les particules au voisinage de la paroi se font ralentir par les forces de frottement et forme la couche limite. Ce ralentissement se traduit par une consommation d'énergie compensée par le générateur qui définit cette traînée.

La traînée de forme ou de pression

Elle dépend uniquement de la géométrie du corps qui impacte directement la répartition de pression à sa surface et donc les forces qui en résultent. La traînée de forme a un grand impacte pour les corps peu aérodynamiques aux angles vifs.

La traînée d'interférence

Cette forme apparaît lorsqu'un obstacle/perturbation s'oppose à l'écoulement. Comme une antenne sur une voiture par exemple.

3.1.8. La traînée Induite

Elle renvoie à la notion de l'effort induit par la portance. Elle résulte des interactions entre les répartitions de pression à l'extrados et l'intrados. Ces interactions créent une structure tourbillonnaire dans la zone où les deux flux se rejoignent. Pour un avion elles apparaissent en bout d'aile. La création

¹ Corps de conception aérodynamique dont la portance est plus élevée que la traînée [4]

et l'entretien de ces structures nécessitent un apport d'énergie qui est pris au groupe motopropulseur[6].

L'expression simplifiée du coefficient de traînée induite selon Prandtl est la suivante :

Équation 7 : Expression simplifiée du coefficient de traînée induite [6]

$$C_{xi} = \frac{C_z^2}{\pi * \lambda}$$

C_{xi} : Coefficient de traînée induite [-]
 C_z : Coefficient de portance du corps [-]
 λ : Allongement de l'aile [-]

L'allongement d'une aile représente le rapport entre l'envergure élevée au carré et sa surface en plan (ou surface alaire) :

Équation 8 : Formule de l'allongement [6]

$$\lambda = \frac{b^2}{S}$$

b : L'envergure de l'aile [m]
 S : Surface alaire [m²]

La traînée induite peut être diminuée en effectuant une répartition elliptique de la portance le long de l'aile, en augmentant l'allongement ou encore en ajoutant des Winglets qui empêchent l'interférence des flux.

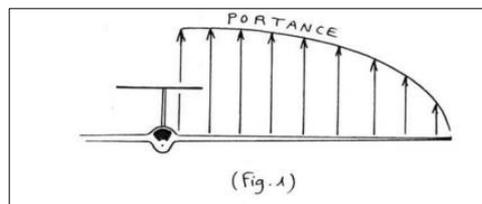


Figure 7 : Illustration de la théorie de la ligne portante de Prandtl sur la répartition elliptique [7]

3.1.9. La traînée de compressibilité ou d'onde

Traînée qui apparaît uniquement pour des vitesses d'écoulement transsonique ou supérieure à Mach 1. Elles ne sont donc pas prises en considération dans ces études car les vitesses d'écoulement sont inférieures à Mach 0.3.

3.1.10. Couche limite

La couche limite correspond à la zone de l'écoulement qui est soumise à l'influence de la paroi solide. L'épaisseur de cette couche varie de quelques dixièmes de millimètre pour un écoulement laminaire à environ 10[mm] pour un écoulement turbulent[8].

Dans un cas optimale la couche limite épouse parfaitement les contours du corps. Cependant dans certains cas il arrive que la couche limite décolle de la surface. Le décollement de la couche limite est à l'origine de l'apparition de structure tourbillonnaire dans le sillage du corps. La création, l'entretien et le transport de ces structures vers l'aval du corps nécessite de l'énergie qui est compensée par le groupe motopropulseur[6]. Cette énergie définit une partie de la traînée que subit un corps.

Le décollement de la couche limite apparait lorsqu'il y a un gradient de pression contraire en surface du solide. Point (D) en Figure 8, la vitesse nulle marque le point d'inversion du gradient de pression. Selon l'amplitude de ce gradient les particules peuvent se détacher du solide car les forces d'inerties ne suffisent plus à les maintenir à la surface[4].

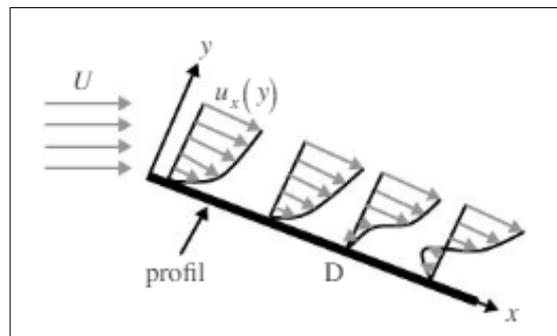


Figure 8 : Illustration du gradient de vitesse en fonction de la distance à la paroi (Y) avec décollement de la couche limite (point D) sur un profil [4]

3.1.11. Notion Y^+

Le concept de « Y^+ » présente une équivalence avec le nombre de Reynolds, qui est un indicateur de la nature de l'écoulement. Le nombre de Reynolds permet de caractériser si un écoulement est laminaire ou turbulent. Le « Y^+ » assume un rôle similaire, mais il se concentre exclusivement sur la couche limite d'un écoulement. En analysant sa valeur il est possible de déterminer si le point étudié réside dans la couche limite visqueuse ou turbulente de l'écoulement.

Cette valeur est utilisée En simulation numérique pour s'assurer que la modélisation de la couche limite est correct. Les valeurs de « Y^+ » aident à choisir la taille appropriée des maillages pour capturer les détails de la couche limite de manière précise. Une valeur de « Y^+ » bien choisie permet de s'assurer que les effets visqueux sont correctement pris en compte dans la modélisation du flux, ce qui est particulièrement important dans les zones de forte variation de vitesse et de pression, comme à proximité de la paroi.

3.2. SIMULATION NUMÉRIQUE

Le but de cette section est de se mettre à niveau avec l'utilisation d'ANSYS CFX. Pour rendre cette prise en main pertinente, 3 géométries permettant d'étudier une partie des points théoriques abordés seront simulées. Les attentes ne sont pas d'avoir les résultats les plus précis possible mais d'être capable de représenter des phénomènes physiques connus et faire des liens avec la théorie.

La première géométrie est le profil NACA 4310 qui permet de prendre en main la configuration du logiciel et la visualisation des résultats. La deuxième, un cylindre, dont la mécanique des fluides qui le régit est complexe mais complète, permet de visualiser les différents régimes d'écoulement. Finalement la dernière est celle du corps d'Ahmed. Cette géométrie représente une voiture simplifiée et permet d'étudier notamment l'influence de la lunette arrière sur sa traînée.

3.2.1. NACA 4310

L'objectif de cette simulation est simplement d'en faire une première et de comprendre l'utilisation du logiciel. Le profil NACA 4310 a été choisi car il est dans le thème du sujet et un des référents de ce travail possédait un tutoriel sur cette géométrie. La configuration mise en place pour cette simulation est issue du tutoriel.

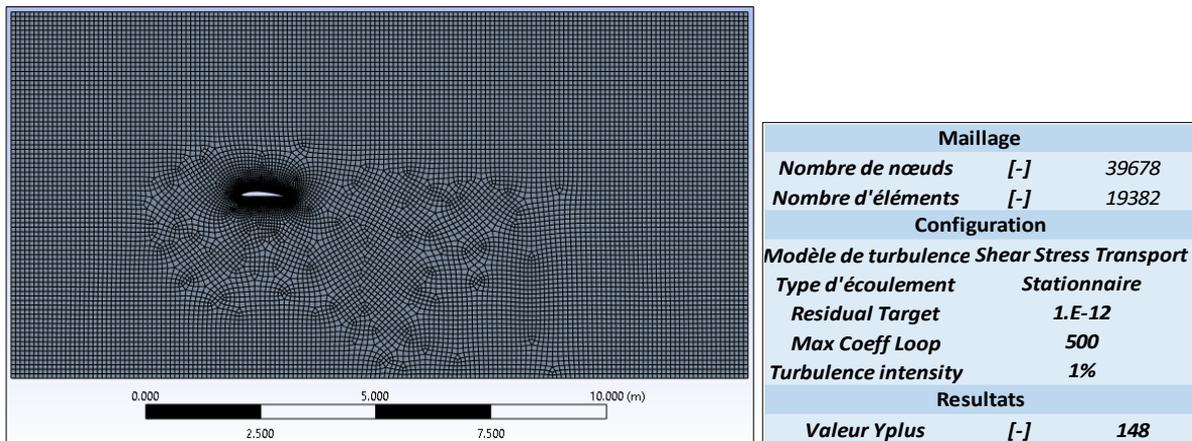


Figure 9 : A gauche, le maillage réalisé pour le NACA 4310 / A droite, les paramètres principaux de la simulation

Les résultats de la simulation du NACA 4310 (*courbes grises*) montrent une tendance qui correspond aux données fournies par JavaFoil (*courbes bleues*). Cependant, on voit que les valeurs pour le coefficient de portance (c_{lift}) sont environ 10% inférieures. Cette différence peut être expliquée par la différence de modélisation de l'écoulement entre JavaFoil et la simulation. Ce qu'il est important de retenir c'est que ces résultats sont satisfaisants pour les besoins de ce travail car la tendance générale est cohérente.

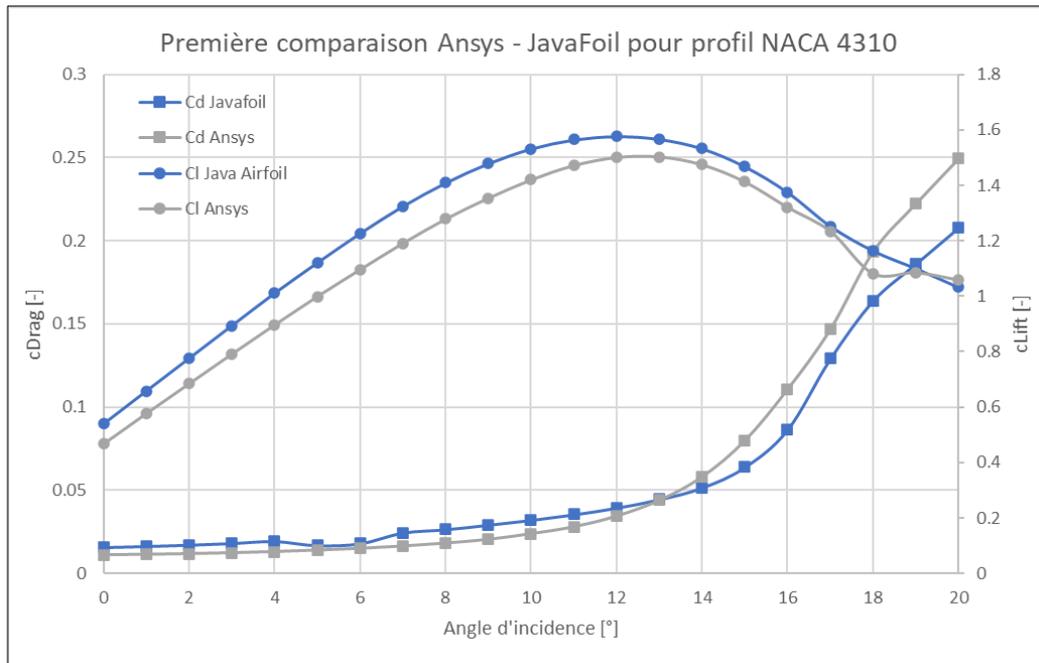


Figure 10 : Comparaison des coefficients de traînée (cDrag) et de portance (cLift) en fonction de l'angle d'incidence obtenus par simulation avec ceux fournis par JavaFoil

En visualisant les lignes de courants et le champ de pression on peut faire le parallèle avec la théorie de Bernoulli. On voit ici que la vitesse de l'air augmente et que la pression diminue à l'extrados du profil. L'inverse se produit à l'intrados. On remarque à l'aide des lignes de courant une zone de recirculation(A) qui apparait à proximité du bord de fuite. Cette zone de turbulence apparait lorsqu'il y a décollement de la couche limite en raison d'un angle d'incidence trop élevée. Ce phénomène cause le décrochage du profil si on augmente l'incidence et donc une diminution de portance car l'écoulement est perturbé.

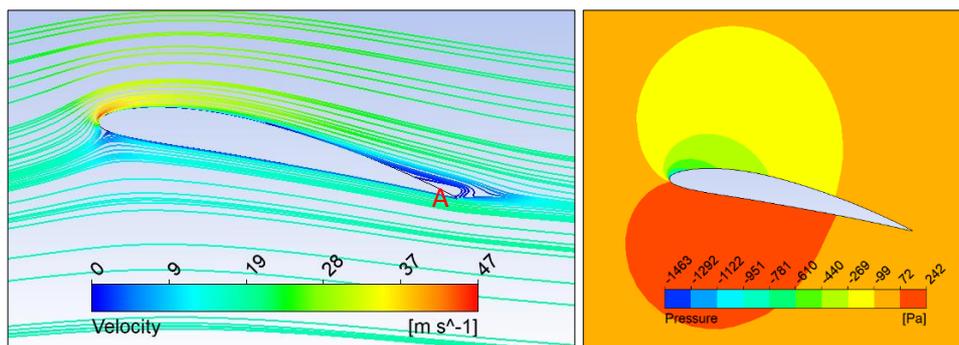


Figure 11 : Visualisation des lignes de courants (à gauche) et du champ de pression (à droite) pour la portance maximale à l'angle d'incidence de 12°

3.2.2. Corps cylindrique

L'écoulement autour d'un cylindre est encore activement étudié de nos jours car il s'agit d'un cas d'étude complexe. Il permet d'observer un bon nombre de phénomènes physiques présents en mécanique des fluides. Dans cette étude l'objectif est d'observer les transitions de régimes et de les comparer à une source connue pour évaluer la crédibilité des résultats obtenus.

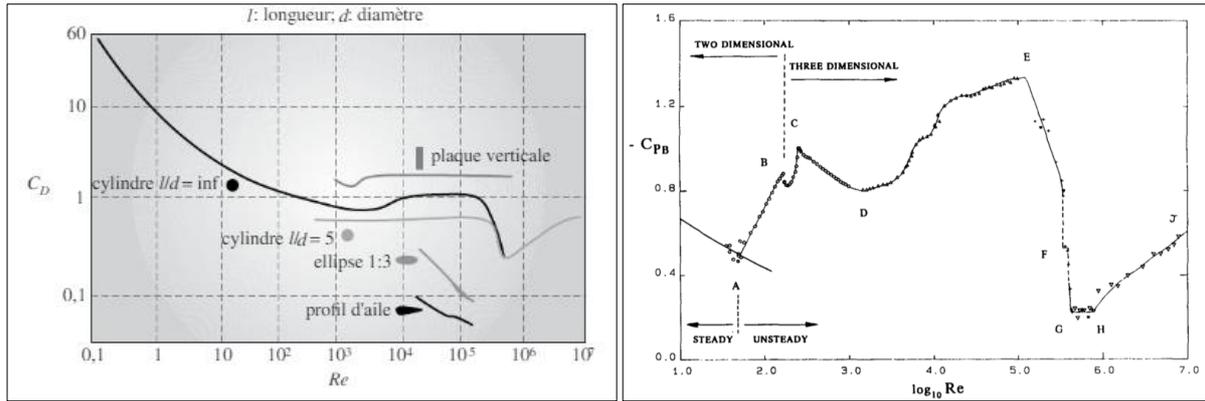


Figure 12 : Courbes de références pour un cylindre. A gauche l'évolution du coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds[4]. A droite l'évolution du coefficient de pression en fonction du nombre de Reynolds[9].

Le maillage et la configuration réalisés pour cette simulation sont représentés en Figure 13. Les paramètres comme le type d'écoulement et l'intensité de la turbulence varient en fonction du nombre de Reynolds auquel évoluent le fluide comme décrit ci-dessous.

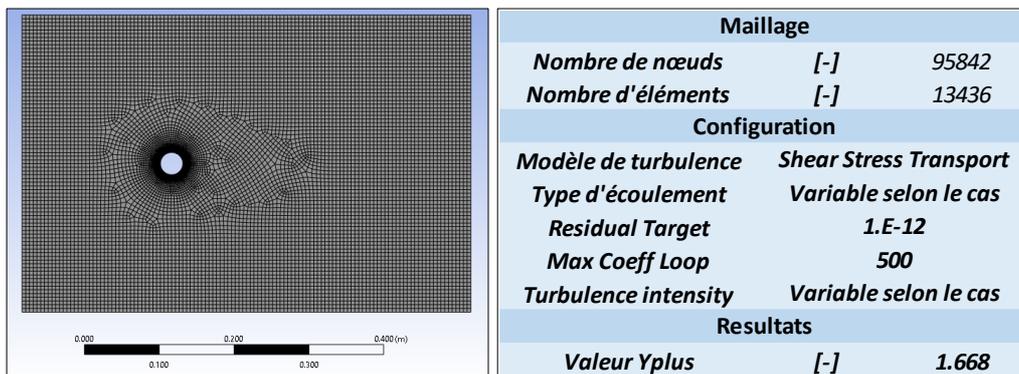


Figure 13 : A gauche, le maillage réalisé pour le cylindre / A droite, les paramètres principaux de la simulation

La courbe « simulation initiale » représente une première simulation réalisée en instationnaire avec une turbulence faible de 1% identique pour chaque point. On voit que la courbe n'est fidèle que d'environ $Re \cong 50$ à 1000 et diverge pour les autres régimes. En se référant à la publication annuelle de Williamson[9] (graphique de droite en Figure 12) on voit qu'en fonction du nombre de Reynolds il y a les changements de régimes suivant :

- ($Re < 49$) : Régime laminaire stationnaire
- ($Re \cong 49$ à 200) : Lâcher de tourbillons laminaire (instationnaire)
- ($Re \cong 200$ à 260) : Transition progressive vers des écoulements 3D (organisés)
- ($Re \cong 260$ à 1000) : Désorganisation progressive de l'écoulement 3D
- ($Re > 1000$) : Progression de la désorganisation vers un écoulement 3D

La configuration instationnaire de cette première simulation explique que nos résultats ne correspondent pas pour les nombres de Reynolds inférieur à $Re \cong 50$ selon Williamson.

En adaptant les paramètres de simulations pour cette plage de nombre de Reynolds on obtient la courbe « Simulation optimisée ». On note une amélioration à $Re < 49$ et une constance à $Re \cong 50$ à

1000 car les paramètres étaient déjà corrects pour cette portion. Finalement à $Re > 1000$ les résultats divergent toujours de la référence. La raison en est que cette simulation résout des écoulements 2D, or les écoulements deviennent de nature 3D à partir de ce nombre de Reynolds. Il n'est donc pas possible d'obtenir des résultats corrects avec cette simulation pour des nombres de Reynolds supérieur à environ 1000.

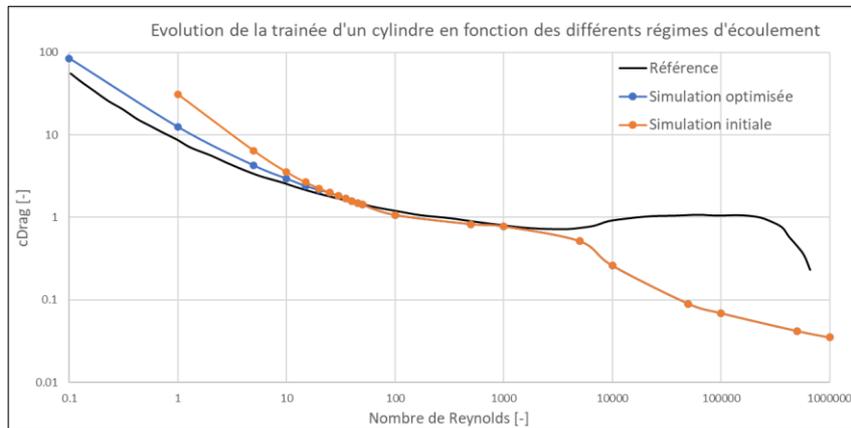


Figure 14 : Courbes finales de l'évolution du coefficient de traînée d'un cylindre en fonction du Reynolds de l'écoulement obtenues par simulation ANSYS Fluent (CFX). La courbe noire représente la référence (Figure 2)

Finalement cette simulation nous permet de visualiser trois types écoulements. Le premier à $Re = 1$ est complètement stationnaire, l'écoulement suit parfaitement la surface du cylindre (Figure 15). Le deuxième, à $Re = 26$ est laminaire avec deux zones de recirculation stationnaire (Figure 16). Le dernier, à $Re = 138$ est laminaire instationnaire, cela signifie qu'il y a des lâchers de tourbillon alterné à l'arrière du cylindre (Figure 17). Ces lâchers de tourbillons sont appelés « Allée de Von Karman ». La période des lâchers de tourbillon doit être calculée à l'aide de l'Équation 3 pour paramétrer la simulation. La période pour ce cas est de 0.1[s].

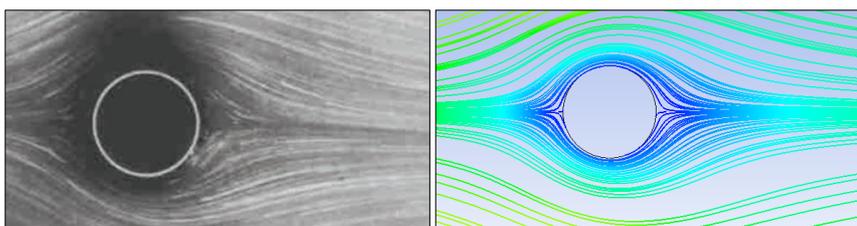


Figure 15 : Comparaison de l'écoulement obtenu par simulation à $Re = 1$ avec la littérature[4]. L'écoulement est laminaire

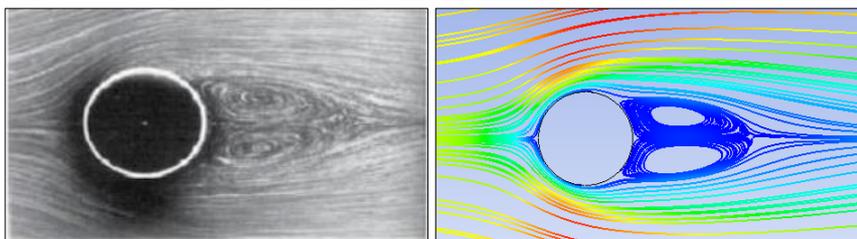


Figure 16 : Comparaison de l'écoulement obtenu par simulation à $Re = 26$ avec la littérature[4]. L'écoulement est laminaire stationnaire.

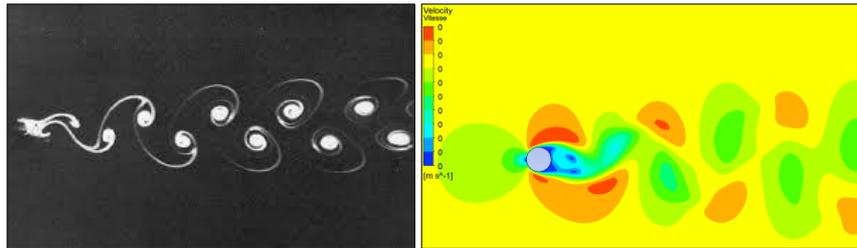


Figure 17 : Comparaison de l'écoulement obtenu par simulation à $Re = 138$ avec la littérature[4]. L'écoulement est laminaire instationnaire ($T = 0.1[s]$)

En conclusion de cette étude il est important de relever de l'importance de configurer correctement la simulation en fonction de la nature de l'écoulement étudié. La sphère est un cas d'étude complexe qui nécessite des configurer méticuleusement la simulation en fonction du nombre de Reynolds pour obtenir des résultats cohérents.

3.2.1. Ahmed

Il s'agit d'un corps en forme de voiture simplifiée, utilisé pour étudier la façon dont l'air interagit avec un véhicule. Les études autour de ce corps aident à concevoir des véhicules plus économiques en réduisant leur traînée et en optimisant le flux d'air autour de la carrosserie. L'élément concerné dans cette étude est l'influence de l'angle de la lunette arrière sur la traînée de ce corps.

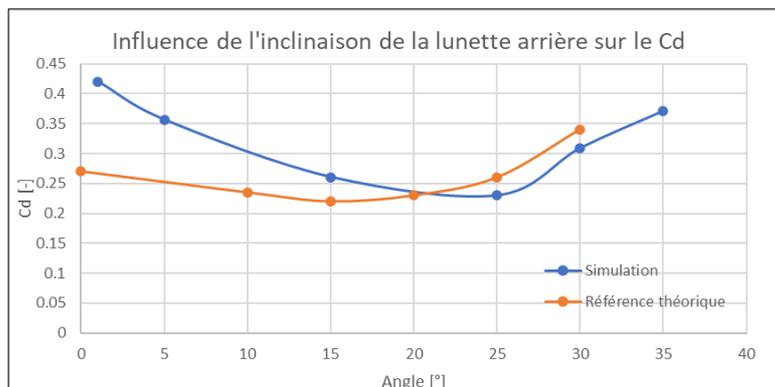


Figure 18 : Evolution du coefficient de traînée du corps d'Ahmed en fonction de l'angle d'inclinaison de la lunette arrière. La courbe orange représente la référence littéraire[6].

Les résultats de la simulation présentent une tendance similaire à la référence. L'augmentation de l'angle de la lunette arrière tend à diminuer la traînée du véhicule jusqu'à un certain point. Passé cet angle maximal la traînée se dégrade à nouveau.

Cela se visualise bien à l'aide des lignes de courant. Avec un angle nul, une zone de recirculation se crée sur tout l'arrière du corps. En augmentant l'angle, on diminue la taille de cette zone jusqu'à une valeur limite à laquelle la couche limite décolle. La zone se comporte alors à nouveau comme pour un culot droit et occupe tout l'arrière du corps.

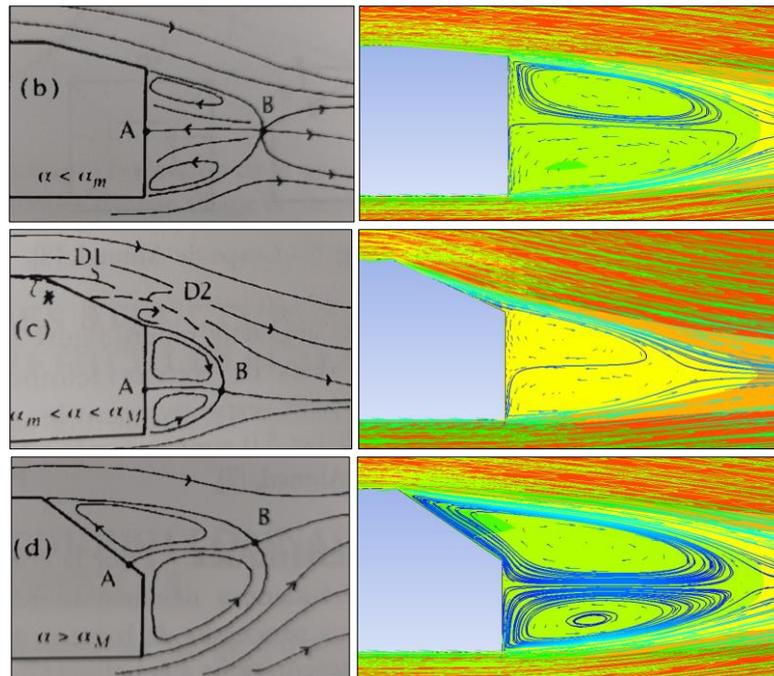


Figure 19: Représentation des lignes de courant au culot du corps d'Ahmed pour différents angles d'inclinaison

En conclusion, le corps d'Ahmed est utilisé comme un outil de base pour étudier les principes aérodynamiques autour d'un véhicule simplifié. Cette compréhension peut ensuite être appliquée à des véhicules plus complexes tels que les Formule 1 pour améliorer leur efficacité.

4. CONCEPTION – AÉRODYNAMIQUE

4.1. MÉTHODOLOGIE

L'objectif principale de ce travail est de concevoir des appendices aérodynamiques permettant de générer une force d'appuis supplémentaire sur le véhicule sans trop dégrader sa traînée globale. Pour arriver à ce résultat, l'étude et la conception du kit a été décomposé en plusieurs sous-partie.

La première partie s'intéresse à la réglementation en vigueur imposée par la Formula SAE. Il est essentiel de s'y intéresser dès le début afin d'en tenir compte tout au long du développement.

La deuxième partie porte sur le choix des profils d'aile qui seront étudiés. Des critères de choix sont définis en fonction des performances actuelles de la monoplace et des attentes du cahier des charges.

La troisième partie consiste à lister tous les composants d'un kit aérodynamique. Cela permet ensuite de définir les blocs qui sont étudiés dans ce travail, car par faute de temps et de quantité d'éléments, il n'est pas possible de tous les étudier en une fois.

En quatrième partie, les appendices aérodynamiques sont conçus par CAO sur la base des conclusions faites lors des différentes études. Un prédimensionnement des appendices et leur interfaçage est également effectué en vue d'une future première fabrication.

Finalement la dernière partie permet d'évaluer l'efficacité du kit en analysant deux simulations 3D de la voiture avec et sans éléments aérodynamique.

4.1.1. Règlementation Formula Student

Le kit aérodynamique doit respecter des règles de conception précises[10]. Elles définissent principalement l'encombrement maximal, la géométrie des arrêtes verticales et la résistance mécanique des éléments. Les règles principales sont résumées ci-dessous.

- Le kit doit respecter l'encombrement total illustré ci-dessous

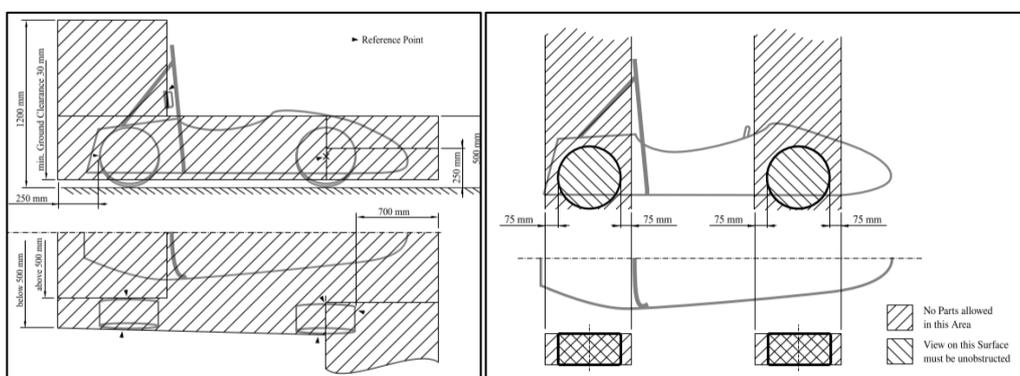


Figure 20 : A gauche l'illustration de l'encombrement maximal admissible des appendices, à droite l'illustration des espaces qui ne doivent pas être obstrués [10]

- Toutes les arrêtes orientées vers l'avant susceptible d'entrer en contact avec un piéton doivent respecter un rayon de courbure précis.
 - Les arrêtes verticales doivent avoir un rayon de 3[mm]
 - Les arrêtes horizontales doivent avoir un rayon de 5[mm]
- La résistance mécanique des éléments doit respecter les exigences suivantes
 - L'élément doit résister à une charge de 200[N] répartie sur 225[cm²] sans fléchir de plus de 10[mm] dans son sens de travail
 - L'élément doit résister à une charge de 50[N] appliquée dans n'importe quelle orientation sans fléchir de plus de 25[mm]

Pour plus de détail référez-vous à la réglementation complète[10].

4.1.2. Critères de choix des profils

Les critères de choix ont été définis en fonction de deux paramètres, les performances actuelles du véhicule ainsi que l'attente de l'équipe VRT. Le premier paramètre permet de définir la vitesse moyenne actuelle de la formule qui sera utilisée pour les simulations. Le second, l'attente de l'équipe est de pouvoir augmenter la vitesse de passage en courbe de leur monoplace grâce à une force d'appuis aérodynamique supplémentaire.

Des simulations effectuées grâce au logiciel Optimum Lap pour plusieurs circuits (Figure 21), ont permis de montrer que la voiture évolue à une vitesse moyenne de 50[km/h]. Le logiciel se base sur des données physiques réelles de ce véhicule, tel que la masse, le rapport de transmission, les courbes caractéristiques du moteur, les coefficients aérodynamiques et d'autres encore qui assurent une simulation au plus proche de la réalité.

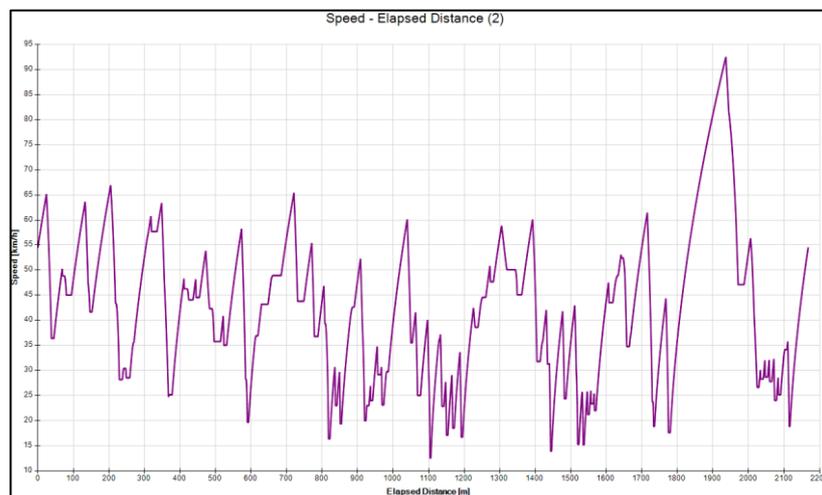


Figure 21 : Simulation OptimumLap de l'évolution de la vitesse du véhicule en fonction de la distance parcourue sur le circuit d'endurance du Michigan (vitesse moyenne 47km/h)

Pour cette vitesse moyenne et les longueurs de corde des profils autorisée par la réglementation il est possible de définir une plage de nombre de Reynolds qui sera utilisé pour les études. La plus longue corde admissible est de 0.625[m] (appendice avant) et la plus petite à été fixée à 0.1[m] pour des raisons de possibilité de fabrication. Il en résulte donc la plage ci-dessous.

Plage de Reynolds des appendices		
	Longueur corde [m]	Re [-]
Max	0.625	578704
Min	0.1	92593

Figure 22 : Nombres de Reynolds de l'écoulement calculés en fonction de la longueur de corde des profils et de la vitesse moyenne actuelle du véhicule.

Les simulations durant ce travail seront réalisées aux nombres de Reynolds 100'000 et 500'000 pour la raison que les deux sources à disposition (*JavaFoil*[11] & *Airfoil Tools*[12]) fournissent les propriétés des profils pour une série de nombre de Reynolds prédéfinies dont ils font partie.

Finalement, un paramètre supplémentaire a été ajouté à la liste évoquée précédemment. Le kit aérodynamique doit être réglable au minimum sur deux positions. La première doit permettre de créer un maximum de portance sans s'inquiéter de la traînée, tandis que la deuxième, elle, doit permettre de réduire au maximum la traînée des appendices. Cela signifie donc que les profils doivent permettre d'avoir un angle d'incidence élevé avant de décrocher.

On peut conclure sur 3 critères de sélections :

- Les profils doivent avoir de bonnes propriétés à faible nombre de Reynolds (C_d & C_l)
- Les profils doivent permettre de créer beaucoup de portance même à faible nombre de Reynolds (profil courbé)
- L'angle d'incidence de décrochage des profils doit être d'au minimum 8-10 degrés

4.1.3. Profils choisis

A la vue des critères évoqués précédemment, 3 profils ont été retenus des recherches effectuées. Ils sont connus dans le monde du sport automobile pour être des profils « High-lift low Reynolds Number airfoil »[13]. Ils sont donc des candidats parfaits pour répondre aux besoins de cette monoplace.

Il s'agit donc de ces 3 profils qui seront utilisés durant les différentes études de ce travail. L'objectif final est de déterminer quel profil est le plus adapté pour chacun des blocs qui seront étudiés.

Le profil CH10

Il s'agit d'un profil de géométrie plus standard et moins cambré que ces concurrents. De ce fait il affiche un coefficient de portance maximal pour $Re=500'000$ légèrement inférieur aux autres ($C_l \cong 2$). Cependant son coefficient de performance (rapport C_l/C_d) est le plus élevé pour ce nombre de Reynolds, ce qui signifie qu'il a le coefficient de traînée le plus petit des trois. Pour un $Re=100'000$ on constate que ce profil n'est pas très performant, il crée beaucoup de traînée pour peu de portance.

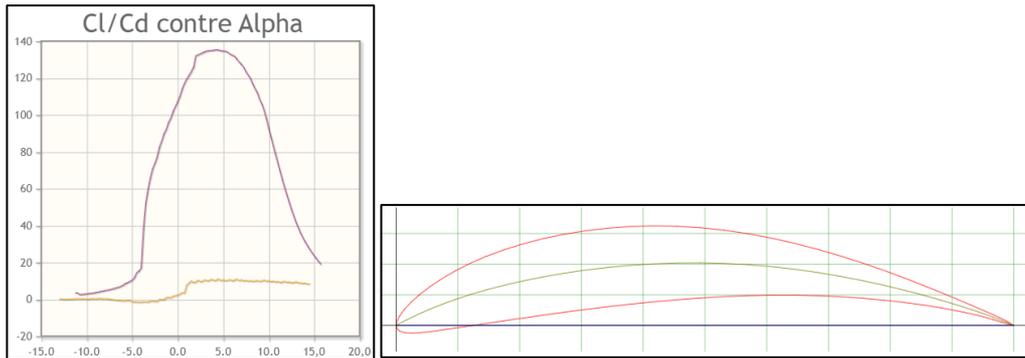


Figure 23 : A gauche : Courbes du coefficient de performance (Cl/Cd) en fonction de l'angle d'incidence (α) (Violet $Re=500'000$, Jaune $Re=100'000$) / A droite : Géométrie 2D du profil CH10 [14]

Le profil FX74 CL5 140

La géométrie plus cambrée que le CH10 de ce profil lui permet d'avoir un coefficient de portance pour un $Re=500'000$ plus élevé ($Cl \cong 2.25$). Son coefficient de performance, lui, diminue car la cambrure du profil engendre inévitablement une traînée plus importante. On remarque également que son comportement est meilleur que le CH10 pour un $Re=100'000$.

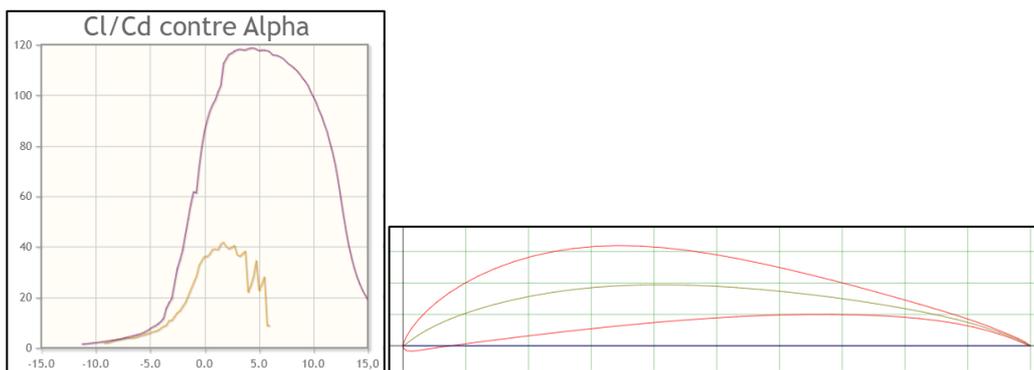


Figure 24 : A gauche : Courbes du coefficient de performance (Cl/Cd) en fonction de l'angle d'incidence (α) (Violet $Re=500'000$, Jaune $Re=100'000$) / A droite : Géométrie 2D du profil FX74 [15]

Le profil S1223

Grâce à sa géométrie cambrée il s'agit du profil qui a le plus grand coefficient de portance pour un $Re=500'000$, ($Cl \cong 2.4$) et $Re=100'000$ ($Cl \cong 2$). Il s'agit également du profil qui a le plus de traînée car on voit que son rapport Cl/Cd est le plus faible. A l'inverse de ces concurrents ce profil montre une performance bien meilleure pour un $Re=100'000$. Il s'agit donc d'un profil qu'on pourrait qualifier de « polyvalent » pour l'utilisation qui en sera faite dans ce projet.

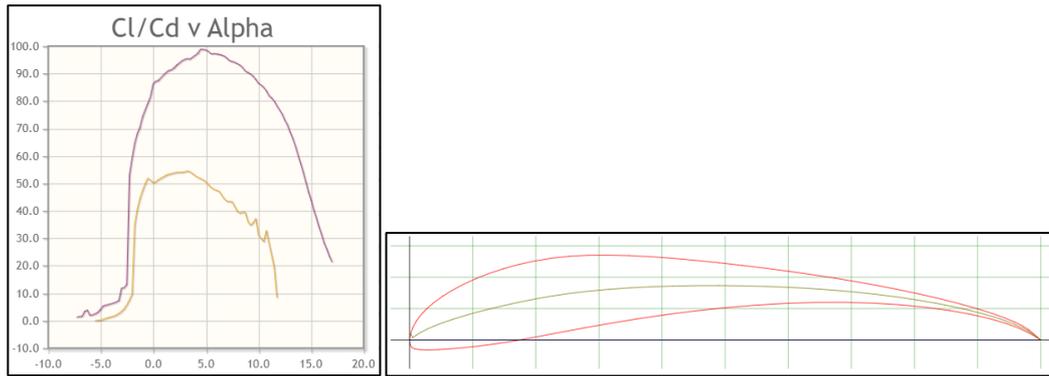


Figure 25 : A gauche : Courbes du coefficient de performance (Cl/Cd) en fonction de l'angle d'incidence (α) (Violet $Re=500'000$, Jaune $Re=100'000$) / A droite : Géométrie 2D du profil S1223 [16]

En conclusion il est intéressant de retenir les deux tendances à ce stade de l'étude :

- Le profil S1223 apporte le plus de portance aux deux nombres de Reynolds étudiés mais cela implique par conséquent que ça traînée soit plus élevée que ces concurrents.
- Le profils CH10 est le plus performant pour un $Re=500'000$ grâce à sa traînée plus faible que ces concurrents. Sa géométrie plus simple le rend également plus pratique à positionner en cas de réglage d'incidence.

4.1.4. Choix des éléments étudiés

Les éléments qui composent un kit aérodynamique complet sont nombreux. Il est nécessaire de tous les étudier indépendamment pour pouvoir les intégrer au mieux à une conception. Pour des raisons de temps limité, 5 blocs ont été choisi pour être étudiés dans ce travail. Il s'agit de ceux entourés en vert sur la Figure 26.

Ces blocs ont été choisi car ils ont été jugés comme étant les plus pertinent pour une première conception. Ils permettront de concevoir un premier kit qui pourra par la suite être optimisé et complété par d'autres éléments.

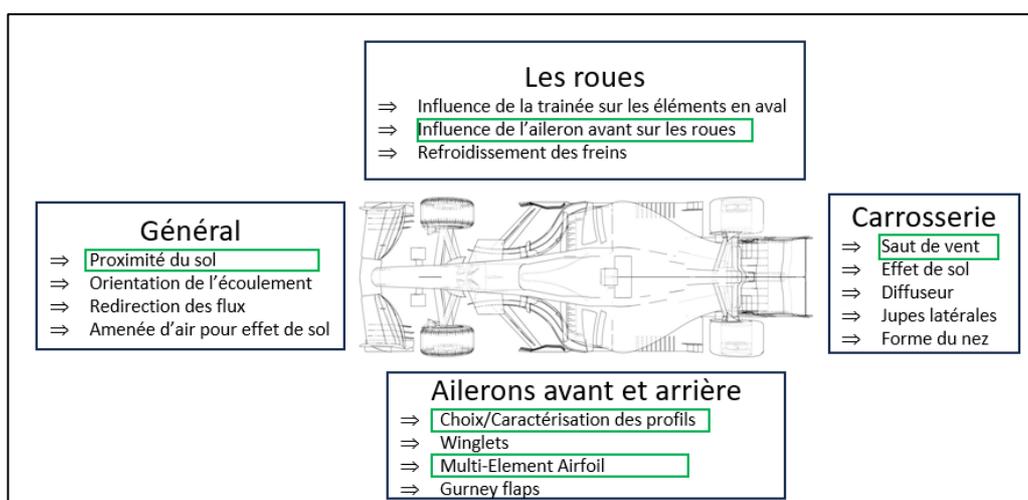


Figure 26 : Schémas décrivant les éléments principaux d'un kit aérodynamique. Les éléments encadrés en vert sont ceux étudiés dans ce travail

4.2. ETUDES AÉRODYNAMIQUES

4.2.1. Simulation de la voiture complète

Une simulation de la voiture complète a été réalisée afin d’avoir une base de comparaison. La géométrie a été simplifiée en retirant les éléments secondaires qui complexifie le maillage. Le pilote est représenté par une plaque verticale de largeur égale à celle du cockpit et de hauteur égale à l’appuis tête. La surface de référence est la surface frontale de la voiture qui vaut 0.493m^2 .

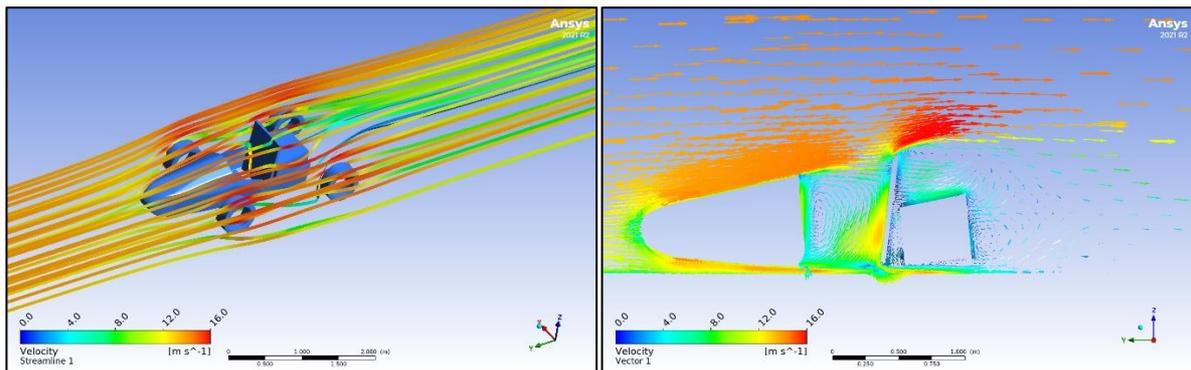


Figure 27 : Simulation 3D de la voiture complète sans kit aérodynamique

Les résultats montrent que la majorité de la traînée est engendrée par le pilote, la carrosserie avant ainsi que les deux roues avant. Ils montrent également un coefficient de portance global positif qui signifie que la force générée tend à déléster la voiture. Le véhicule affiche un coefficient global de portance de 0.477 et un coefficient de traînée de -1.167. Ces coefficients sont cohérents avec les ordres de grandeur que l’on trouve pour des véhicule de cette catégorie.

Tableau 1 : Données obtenues par simulation de la voiture complète

Surface	Trainee [N]	Portance [N]	Cd [-]	Cl [-]	Cl/Cd [-]
Aile Droite	0.3	0.13	0.005	0.002	0.424
Aile Gauche	0.25	0.1	0.004	0.002	0.404
Carrosserie Avant	-11.06	6.38	-0.192	0.111	-0.577
Batterie	6.99	7.84	0.121	0.136	1.121
Pilote	-33.04	-3.36	-0.574	-0.058	0.102
PlancherArriere	0.05	-4.48	0.001	-0.078	-98.766
PneuArD	-5.31	4.13	-0.092	0.072	-0.777
PneuArG	-5.41	3.87	-0.094	0.067	-0.715
PneuAvD	-10.04	6.41	-0.174	0.111	-0.639
PneuAvG	-9.99	6.46	-0.173	0.112	-0.647
Total	-67.25	-14.7	-1.167	0.477	-100.07

Cette simulation permet de nous donner plusieurs pistes pour optimiser les performances actuelles. Il faudra notamment chercher à diminuer la traînée des roues et du pilote qui sont les plus conséquentes. On voit également la hauteur approximative à laquelle l’aileron arrière doit être placé en fonction des lignes de courant (image de droite en Figure 27).

4.2.2. Modèle de simulation

La première étude consiste à établir un modèle de simulation qui sera utilisé pour construire les simulations suivantes. Afin d'évaluer la justesse du modèle, les 3 profils sont simulés indépendamment afin de comparer les valeurs de coefficient de traînée et portance obtenus avec deux sources à disposition. Ces sources sont JavaFoil[11] et Airfoil Tools[12].

La configuration du maillage est détaillée ci-dessous. Certains paramètres de maillage comme le dimensionnement des arrêtes peuvent être légèrement adapté en fonction des profils et des situations. Les paramètres généraux, eux restent identiques.

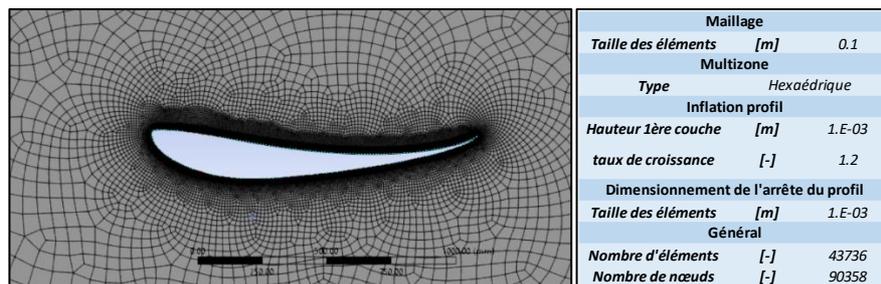


Figure 28 : Représentation du maillage appliqué pour les 3 profils avec ces paramètres principaux

La configuration de la simulation est basée sur les tutoriels à disposition sur le site d'ANSYS[17]. Le modèle de turbulence utilisé est le modèle Shear Stress Transport (SST) qui est le modèle standard utilisé en industrie. L'écoulement est de type stationnaire avec une turbulence du fluide faible de 1%. L'environnement est configuré comme suit :

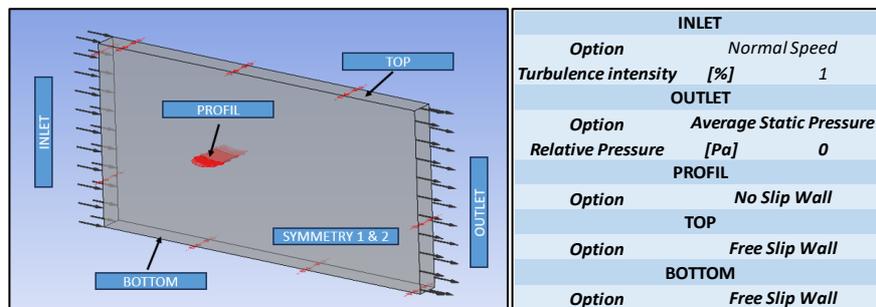


Figure 29 : Configuration de l'environnement de simulation établis dans le modèle

La convergence du solveur est configurée avec un modèle RMS dont la « Residual Target » est définie à 10^{-12} pour un nombre maximum d'itération de 500. Cela permet à la simulation de tendre vers des résultats stables comme on le voit en Figure 30.

Ces courbes sont un bon premier moyen de contrôle de notre simulation. Dans le cas où elles sont stables et non perturbées comme pour ce cas elle permette une première validation de la simulation. A l'inverse si une des deux courbes présentes des perturbations et que les résultats ne convergent pas vers une valeur stable il faut vérifier/adapter la configuration de la simulation.

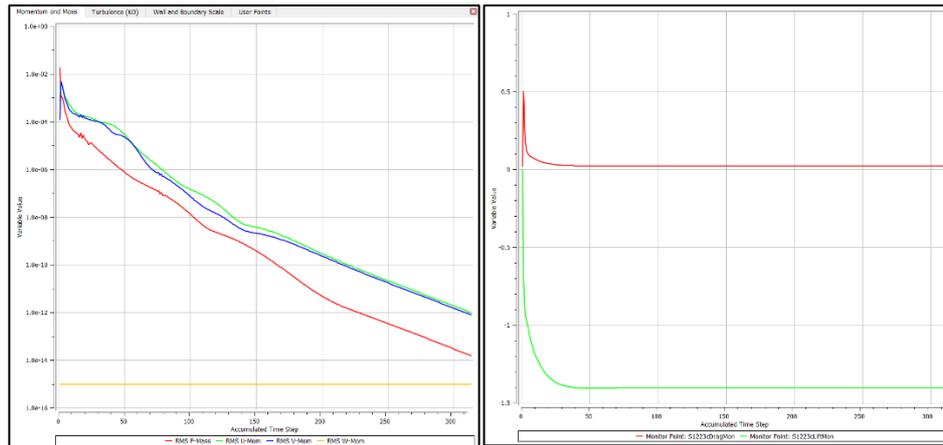


Figure 30 : A gauche : Courbe de monitoring de la valeur RMS en fonction du nombre d'itération / A droite : Courbe de monitoring des coefficients de portance et de traînée en fonction du nombre d'itération

En analysant les résultats avec ce modèle, deux observations sont faites. La première est la différence existante entre les deux sources (*JavaFoil & Airfoil Tools*). Il y a pour certains point un écart d'un facteur 1.5 entre les valeurs. Cette différence est difficilement explicable car il n'y a pas d'informations sur les modèles numériques utilisés par l'une ou l'autre des sources.

Il serait alors logique de vouloir comparer les résultats avec une des sources qui correspond à la majorité des courbes. Cependant cette approche n'est pas possible car la correspondance varie en fonction des trois profils et du nombre de Reynolds. Par exemple, pour un $Re=500'000$, les valeurs des coefficients du CH10 sont inférieures aux deux sources alors que le FX74 à l'air de correspondre à *Airfoil Tools* et le S1223 se situe plutôt entre les deux. Ces tendances changent encore pour un $Re=100'000$ et ne sont même pas constante pour un même profil (cf. Excel en annexe).

Il a été essayé d'affiner les maillages pour obtenir une valeur Y_{plus} d'environ 10 (*Simulation $Y_{\pm}=10$*) dans le but d'augmenter la précision de la simulation. Cet essai est soit sans résultat probant soit cela dégrade la situation comme pour le profil CH10.

La deuxième observation est la difficulté à simuler le décrochage des profils. En regardant les courbes on voit que les profils décrochent très tard ou pas nettement. D'après le support ANSYS il faut appliquer le paramètre « High Lift Coefficient » défini à 0.9. Dans ce cas précis cela n'apporte pas non plus d'amélioration.

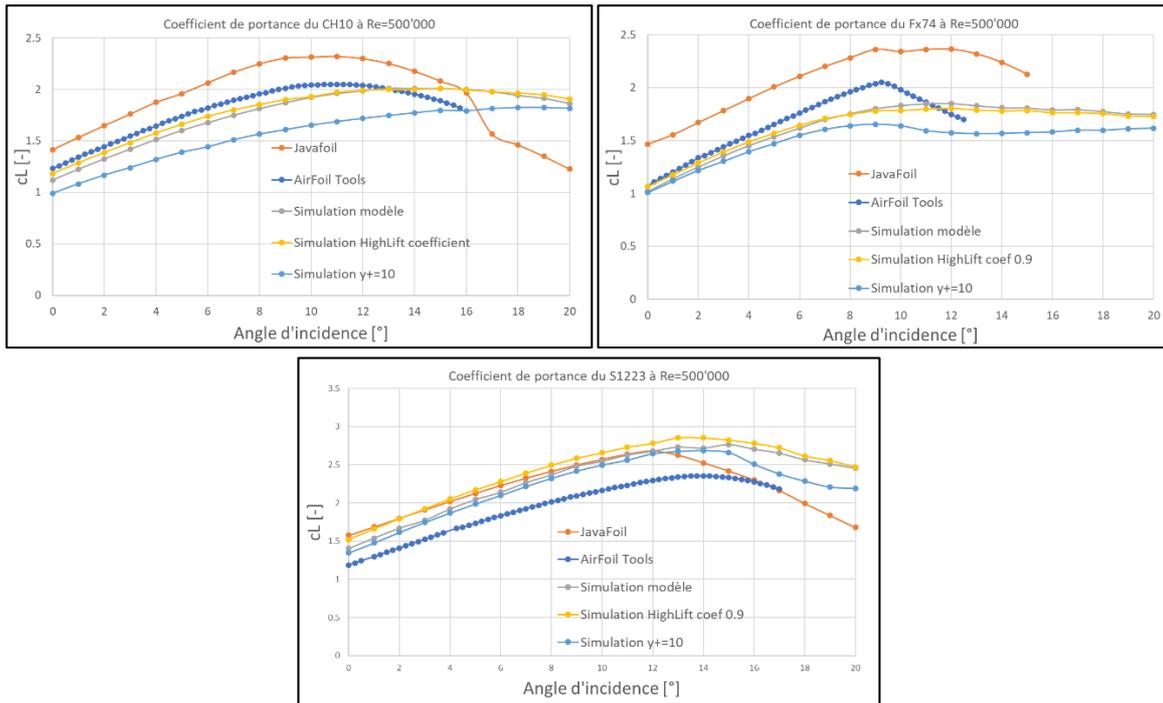


Figure 31 : Graphique des coefficients de portance des trois profils pour un $Re=500'000$ obtenus avec les différentes simulations réalisées

Les deux problèmes semblent être liés à la géométrie complexe des profils et à la modélisation des transitions au sein de la couche limite. La résolution de ces problèmes nécessite des connaissances en simulation et mécanique des fluides avancés qui demande du temps supplémentaire et sort du cadre de ce travail. C'est pourquoi il a été décidé de comparer les tendances générales pour chaque profil et chaque source pour contourner ce problème.

Il est néanmoins important de prévoir comme perspective d'avenir du projet de réaliser deux études afin de palier à ces incohérences et obtenir des résultats précis. La première doit permettre de comprendre les différences existantes entre JavaFoil et Airfoil Tools. Et la seconde doit étudier plus en détail la couche limite des profils complexes pour permettre d'adapter les paramètres de simulation.

On voit que les tendances générales correspondent entre les différentes sources. Le profil S1223 est toujours celui générant le plus de portance, tandis que le CH10 et le FX74 sont proches avec une tendance plus élevée pour le CH10.

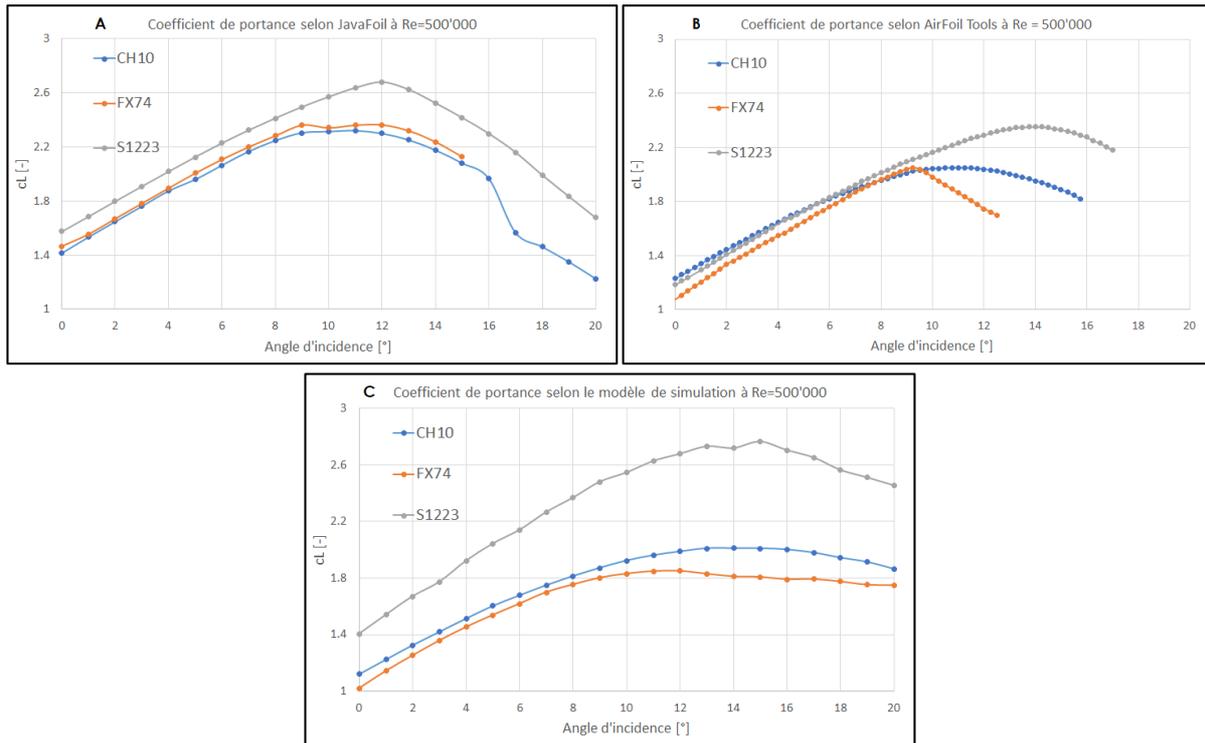


Figure 32 : Graphique de comparaison des coefficients de portance pour chaque profil regroupé par source et simulation. Javafoil (A) / Airfoil Tools (B) / modèle de simulation (C)

En conclusion les tendances générales des profils nous permettent de valider le modèle de simulation pour les besoins de ce travail. Les valeurs des coefficients ne seront pas exacte mais les résultats seront tout de même exploitables et fiables.

Par la suite il est nécessaire de comprendre la provenance des différences entre JavaFoil et Airfoil Tools pour être capable de prédire les valeurs des coefficients de façon précise.

4.2.3. Influence de la proximité du sol

Cette étude doit permettre d'étudier l'impact de la proximité avec le sol sur les propriétés aérodynamiques des profils (c_{Drag} & c_{Lift}). Elle a été réalisée pour les 3 profils de la manière suivante.

La proximité avec le sol est exprimée en fonction du rapport de la distance au sol du profil (H) et de la longueur de corde (L). Ce rapport permet par la suite de pouvoir transposer les résultats pour différentes tailles de profils.

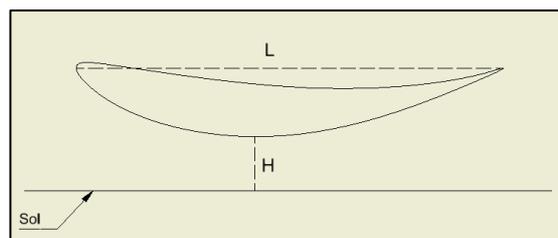


Figure 33 : Schéma de principe pour l'étude de l'influence du sol, profil CH10

L'étude est construite sur 3 paramètres. Le premier est le nombre de Reynolds qui varie entre 100'000 et 500'000 comme défini précédemment (cf. Figure 22). Le deuxième paramètre est le rapport H/L qui varie de 0 à 1.5[-]. Finalement pour tous les cas deux angle d'incidence sont étudiés, 0° et 10°.

La configuration utilisée est identique au modèle établis précédemment. (cf. Chapitre 4.2.2). Les données principales sont illustrées en Figure 34.

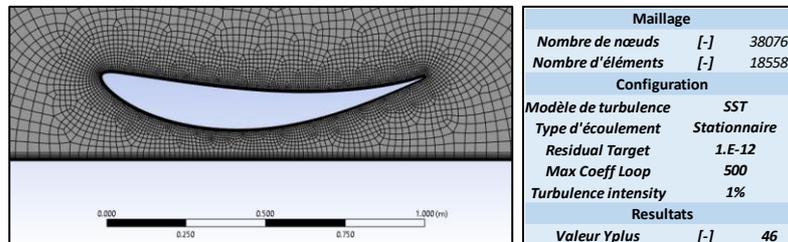


Figure 34 : Représentation de la configuration appliquée pour toutes les simulations à proximité du sol

On distingue une tendance générale du coefficient de portance pour un $Re=500'000$ pour les 3 profils (graphiques A et C). La valeur absolue du coefficient augmente progressivement à mesure que le rapport H/L diminue jusqu'à atteindre un maximum à partir duquel elle décroît. Cette tendance est plus prononcée pour une incidence nulle(A) que pour 10°(C). Pour ce qui est du $Re=100'000$ on remarque que seul le profil S1223 (courbe grise) maintient cette tendance (E et G).

Le coefficient de traînée a sensiblement le même comportement dans toutes les configurations (B, D, F et H). Il augmente à mesure que le rapport H/L diminue et cela pour les deux nombres de Reynolds et angle d'incidence. On remarque tout de même qu'il est plus important à 10° qu'à incidence nulle.

Il est donc possible de conclure de cette étude que la proximité du sol est bénéfique pour le coefficient de portance tant que le rapport H/L est supérieur à environ 0.2[-] selon les profils. Le rapport H/L optimal varie en fonction de chaque profil. D'autres études menées[18],[19] affichent des résultats d'ordre similaire à ceux obtenus dans cette étude ce qui permet d'appuyer leur crédibilité.

On note que le profil S1223 est un bon candidat pour l'appendice frontal car il a un comportement plus régulier entre les deux nombres de Reynolds à proximité du sol. Il permet donc d'être efficace sur une plus large plage de vitesse.

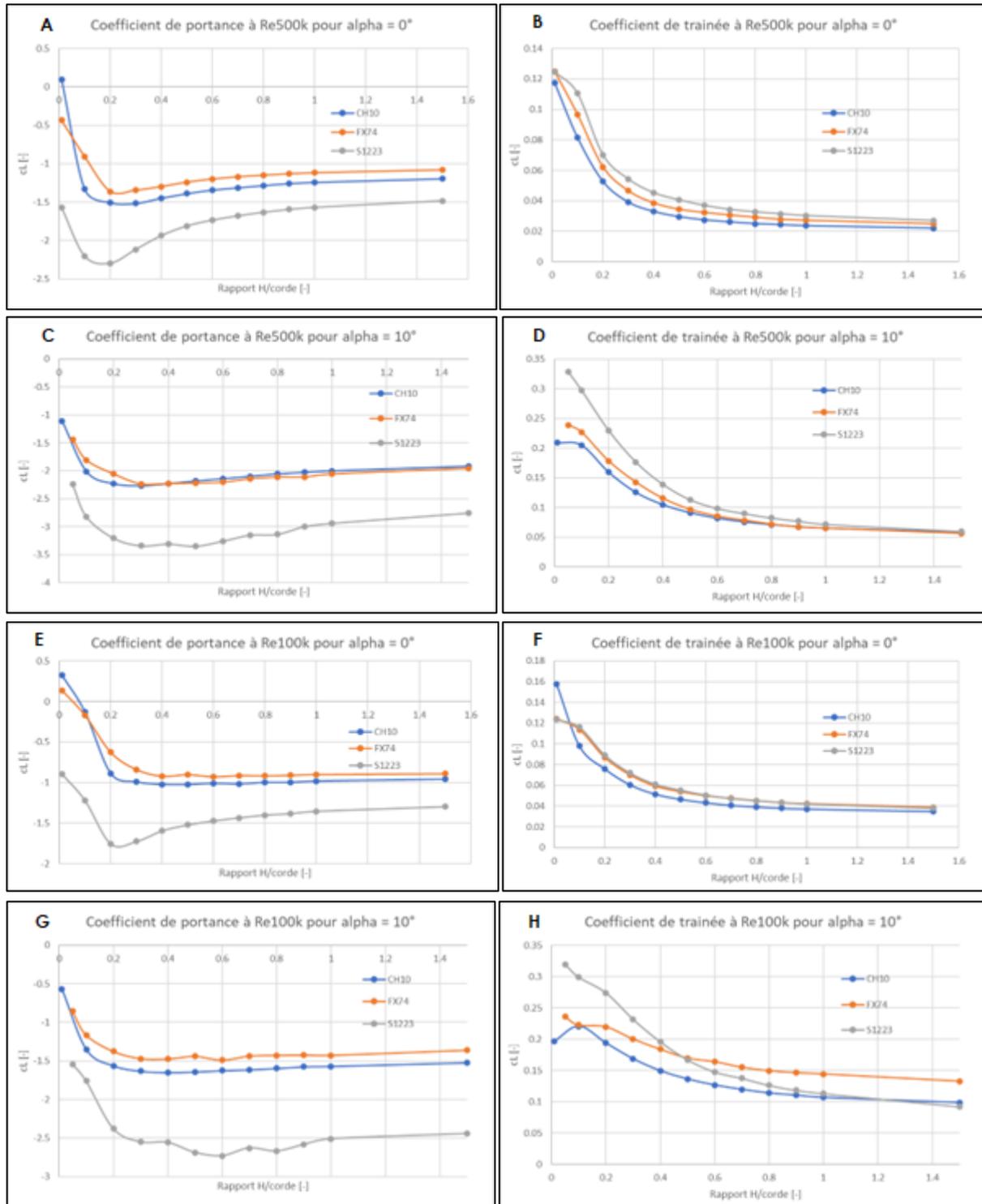


Figure 35 : Graphique des coefficients de portance et de traînée en fonction du rapport H/C. Les 3 profils sont représentés pour les nombres de Reynolds 500'000 et 100'000 ainsi que pour deux angles d'incidence de 0° et 10°

4.2.4. Influence d'un saut de vent

Lors de la simulation 3D de la voiture complète réalisée en début de travail il est apparu que le pilote participait à une grande partie de la traînée totale. La possibilité de mettre un saut de vent en amont

du pilote semble donc légitime, de plus que la réglementation de la FS ne l'interdit pas. Le but de cette étude est donc d'évaluer la capacité d'un saut de vent à diminuer la traînée engendrée par le pilote.

Le pilote est représenté par une plaque plane de largeur égale à celle du cockpit et dont la hauteur est définie par l'appui tête. Le saut de vent est placé sur la carrosserie devant le casque du pilote avec un angle d'inclinaison. La carrosserie a été simplifiée pour cette étude 2D, elle est simplement extrudée depuis la courbe ci-dessous. Cela implique que sa surface frontale est plus grande que la réelle.

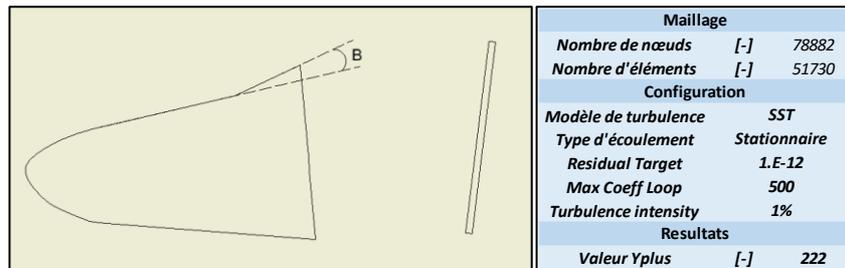


Figure 36 : Schéma de principe pour l'étude du saut de vent et résumé de la configuration appliquée

Les résultats montrent clairement qu'il n'y a pas grand intérêt à mettre en place un saut de vent. On voit que la traînée du pilote diminue à mesure qu'on augmente l'angle B mais la traînée de la coque augmente en même temps. En additionnant les deux courbes on voit que le gain réel n'est pas significatif.

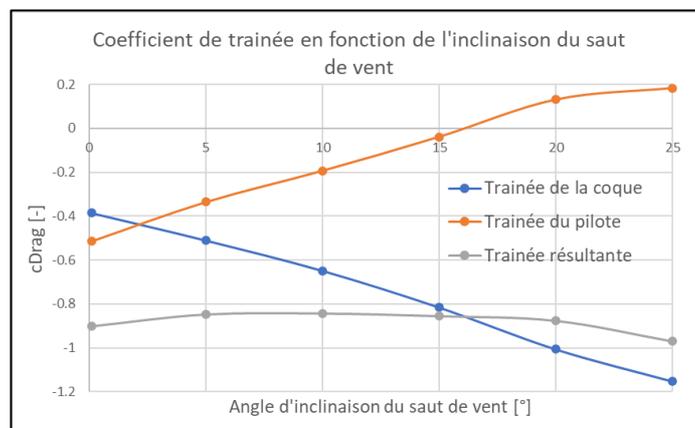


Figure 37 : Graphique des coefficients de traînée de la coque et du pilote en fonction de l'angle d'inclinaison du saut de vent

En observant les forces de traînées en jeu cela permet de quantifier la variation des forces de traînées. Le gain représente de combien la traînée a été diminuée ou augmentée respectivement s'il est positif ou négatif. Le bilan représente la différence entre les gains. Ici il est positif ce qui signifie que la traînée globale a été diminuée de 3.87N. Comme calculée au chapitre 6.2 on voit que 3.87N induit un supplémentaire de 0.1s pour effectuer une accélération de 0 à 100km/h.

Tableau 2 : Gain réel obtenu grâce à l'ajout d'un saut de vent

Sans saut de vent	Avec saut de vent à 15°		
Force de traînée pilote [N]	Force de traînée pilote [N]	Gain sur le pilote [N]	
-26.52	-9.2	17.32	
Force de traînée coque [N]	Force de traînée coque [N]	Gain sur la coque [N]	Bilan [N]
-19.65	-33.1	-13.45	3.87

En conclusion le saut de vent ne démontre pas un réel gain de traînée dans cette étude. Cependant comme la géométrie de la coque a dû être simplifiée pour la simulation 2D, une version de la coque avec saut de vent sera quand même faite pour la simulation 3D final. La modification est rapide et cela permet de s'assurer que la simplification de géométrie effectuée ne fausse pas les résultats.

4.2.5. Influence de l'aileron avant sur les roues

Le but de cette simulation est d'étudier l'influence de l'aileron avant sur la traînée des pneus. En variant la distance entre le bord de fuite et le diamètre extérieur de la roue ainsi que l'inclinaison du profil on veut voir si la traînée des pneus peut être diminuée. Cette étude est réalisée avec le profil S1223 uniquement car il a démontré les meilleures performances pour les deux nombres de Reynolds étudiés à proximité du sol (cf. chapitre 4.2.3).

La distance à la roue (D) est évaluée pour trois valeurs, 0.075 [m] qui est la distance minimale autorisée, 0.1% et 0.2% de la longueur de corde (L). La distance au sol (H) est fixe, elle correspond à la valeur optimale de 20% de longueur de corde trouvée précédemment (cf. chapitre 4.2.3). L'angle d'incidence est évalué pour trois valeurs, 0, 5 et 10 degrés.

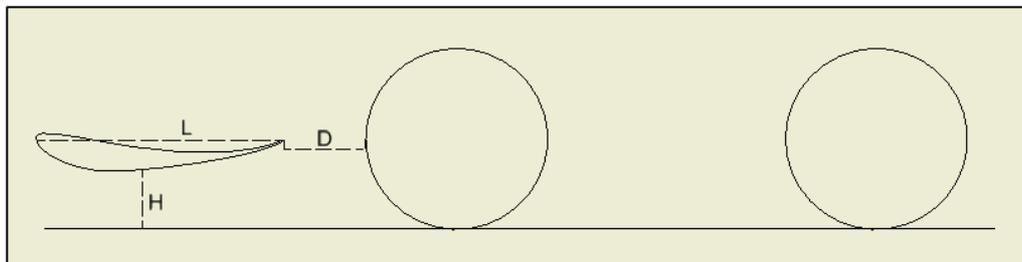


Figure 38 : Schéma de principe pour l'étude de l'influence de l'aileron avant sur les roues

Cette simulation a dû être réalisée en 3D car l'écoulement reste bloqué à l'avant des pneus et entraîne une surpression si elle est réalisée en 2D. Le paramètre « multizone » a donc été supprimé pour permettre d'avoir plusieurs mailles dans la largeur de l'environnement. Les parois latérales de l'environnement sont modifiées en « Opening » avec la même pression de référence que l'OUTLET.

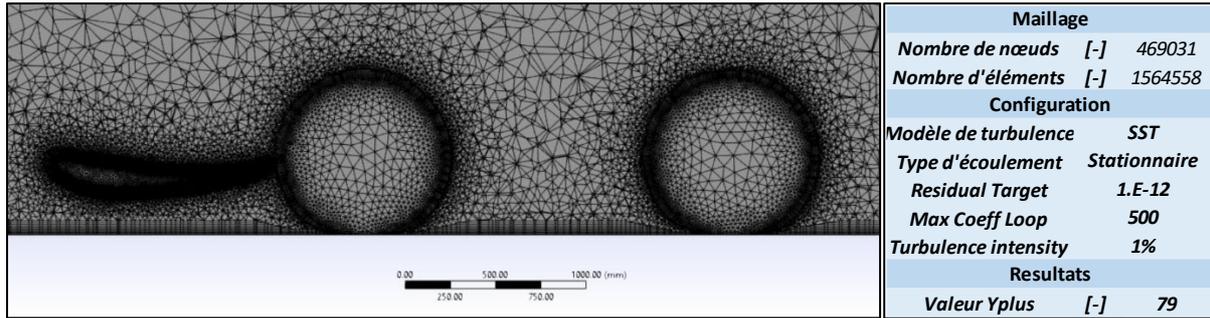


Figure 39 . Représentation de la configuration appliquée pour la simulation de l'influence de l'aileron avant sur les roues

La variation des deux paramètres décrit précédemment donnent 9 points de simulation pour chaque nombre de Reynolds. Pour des raisons de temps de simulation élevé, un schéma en croix permettant de réduire à 5 le nombre de simulation a été choisi.

Tableau 3 : Schémas en croix choisis pour la simulation

Schéma en croix appliqué				
Incidence	0°	x		x
	5°		x	
	10°	x		x
		0.075m	0.1%	0.2%
		Distance D		

Des valeurs de références pour les coefficients de traînée ont été obtenues en simulant uniquement les roues sans l'influence de l'aileron. Des références pour l'aileron seul aux 3 angle d'incidence ont également été définie. Cela permet d'avoir un point de comparaison et d'évaluer le gain obtenu.

On remarque tout d'abord une diminution nette de la traînée du profil lorsqu'il est proche de la roue avant. On voit ensuite que le cas de configuration (alpha = 0° et D = 20%) permet de réduire davantage la traînée totale. Le gain observé est d'environ 21%. Le gain représente le pourcentage de diminution ou d'augmentation de la traînée respectivement s'il est positif ou négatif. Le gain tient compte des 3 traînée et il est calculé par rapport aux références qui sont issus de cette simulation.

Tableau 4 : A gauche : Référence des coefficients de traînée pour le profil / A droite : Tableau des valeurs de coefficient de traînée des roues en fonction des paramètres variés et des nombres de Reynolds considérés.

Référence profil			Re	Incidence	D	cDragProfil	cDragRoueAv	cDragRoueAr	Gain profil	Gain Av	Gain Ar	Gain Tot	
Re [-]	Incidence [°]	cDrag [-]	[-]	[°]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	
			500000	-	-	-	0.72	0.54	-	-	-	-	
			100000	-	-	-	0.69	0.51	-	-	-	-	
500000	0	0.062	500000	0	0.075	0.0201	0.70	0.52	67.5	3.4	4.0	4.7	
	5	0.091	500000	10	0.075	0.0571	0.61	0.55	52.2	15.6	-1.4	9.7	
	10	0.1195	500000	5	0.1	0.045	0.57	0.49	50.0	20.7	9.8	17.1	
				500000	0	0.2	0.0458	0.58	0.42	25.9	19.9	22.1	21.1
				500000	10	0.2	0.09	0.64	0.57	24.7	11.6	-5.7	4.9
100000	0	0.063	100000	0	0.075	0.025	0.68	0.50	60.4	1.1	1.0	1.1	
	5	0.092	100000	10	0.075	0.0606	0.55	0.51	49.7	20.3	-1.0	10.0	
	10	0.1205	100000	5	0.1	0.0459	0.55	0.41	50.0	20.4	18.9	19.7	
				100000	0	0.2	0.0463	0.56	0.39	26.7	18.6	23.3	20.5
				100000	10	0.2	0.0929	0.59	0.56	22.9	14.8	-9.5	3.0

Il est donc possible de conclure que l'aileron avant doit être placé à une distance D, égale à 20% de sa corde avec un angle d'incidence de 0 degrés pour minimiser la traînée totale. A noter que l'étude peut être développée encore plus car le schéma en croix ne considère que quelques cas pour donner une piste principale.

4.2.6. Multi-Element Airfoil

Les appendices composés de plusieurs éléments génèrent plus de portance qu'un seul élément à surface équivalente. Ils génèrent également plus de traînée car les profils sont positionnés avec des incidences importantes. Le profil CH10 est donc choisis pour cette étude car il a de base la traînée la plus faible des trois.

Pour réaliser cette étude il a été décidé de placer deux profils dans la géométrie d'un seul grand profil à un angle d'incidence de 20 degrés comme illustré en Figure 40. La longueur de corde du premier est de 0.55m pour qu'il évolue à $Re=500'000$ à la vitesse moyenne de 50km/h. La taille du second profil est de 60% de la corde du premier profil. Cette valeur à été définie de manière empirique en fonction de l'encombrement maximal autorisé.

Pour cette première itération seulement deux paramètres seront variés, la distance horizontale (X), et vertical (Y) entre le bord de fuit du premier et le bord d'attaque du second. La valeur X est évaluée pour trois valeur, -5, 0 et 5% de la corde du premier profil. La valeur verticale est évaluée également pour 3 valeurs, 3, 5 et 10% de la corde du premier profil.

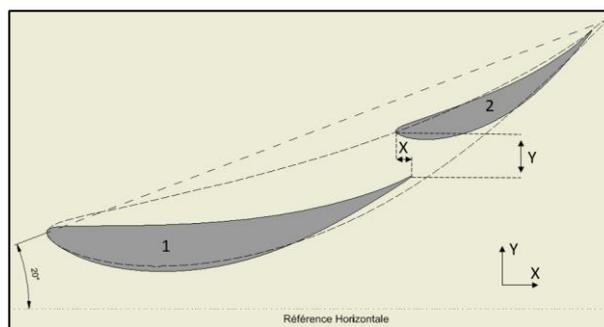


Figure 40 : A gauche : Schéma de principe pour l'étude Multi-Element

La référence définie est un grand profil de taille maximale. Cette taille est définie par l'encombrement défini dans le règlement. Ce profil est placé à l'angle maximal avant décrochage offrant un coefficient de portance de 1.98 (cf. chapitre 4.2.2). Cela permet d'évaluer la nécessité d'avoir une configuration multi-élément.

Les résultats montrent une configuration optimale pour les valeurs $X = 5\%$ et $Y = 3\%$. On constate une augmentation de la valeur absolue du coefficient de portance et de traînée. Cela signifie que l'on crée une force de portance plus grande mais qu'en même temps on génère plus de portance. Le but de cette configuration est d'augmenter l'appuis, la traînée ne nous importe donc pas beaucoup.

Tableau 5 : A gauche : Schéma en croix choisis pour l'étude / A droite : Tableau des valeurs de coefficients de portance et de traînée pour chaque élément

Schéma en croix appliqué					X	Y	cLift 1	cLift 2	cLiftTot	cDrag 1	cDrag 2	cDragTot
					[%L]	[%L]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
X	-5%	x		x	-	-	-	-	-1.98	-	-	0.06
	0%		x		-5	3	-3.58	-0.98	-4.57	-0.17	-0.48	0.31
	5%	x		x	5	3	-3.51	-1.60	-5.11	-0.21	-0.53	0.33
					0	5	-3.70	-1.41	-5.11	-0.22	-0.57	0.34
		3%	5%	10%	-5	10	-3.69	-1.41	-5.10	-0.23	-0.58	0.35
		Y			5	10	-3.38	-1.60	-4.98	-0.19	-0.52	0.33

On voit un gain sur la portance de 51% par rapport à l'élément seul. Cela signifie que l'on génère 51% de portance en plus que l'élément seul. Comme l'encombrement maximal est limité, on voit l'importance d'utiliser des ailerons à éléments multiple.

Tableau 6 : Comparaison des forces engendrée par un aileron en une partie avec un aileron composé de deux éléments

Un seul élément	Surface [m2]	Portance [N]	Trainee [N]		
	1.035	-211.38	-3.97		
Deux éléments	Surface totale [m2]	Portance [N]	Trainee [N]	Gain portance [%]	Gain Trainée [%]
	1.01	-319.31	-37.60	51.06	-846.93

Il est important de conclure sur le fait que cette étude peut être largement développée. En effet ici la position initiale des deux profils a été fixée et uniquement la distance horizontale et verticale ont été variées. Il reste encore une multitude de paramètres à optimiser.

5. CONCEPTION – MÉCANIQUE

La conception des appendices a été construite sur la base des critères suivants :

- La réglementation de la FS doit être respectée
- Les appendices doivent être en accord avec les résultats obtenus dans les études
- La réalisation des appendices doit pouvoir être effectuée par l'équipe VRT
- Les ailerons s'intègrent à la voiture actuelle en nécessitant le minimum de modifications
- Les appendices doivent pouvoir être réglé sur deux positions différentes, soit « High Lift » soit « Low Drag »

Cette conception à aboutie à une première itération composée d'un aileron avant et arrière réglable sur deux positions prédéfinies.

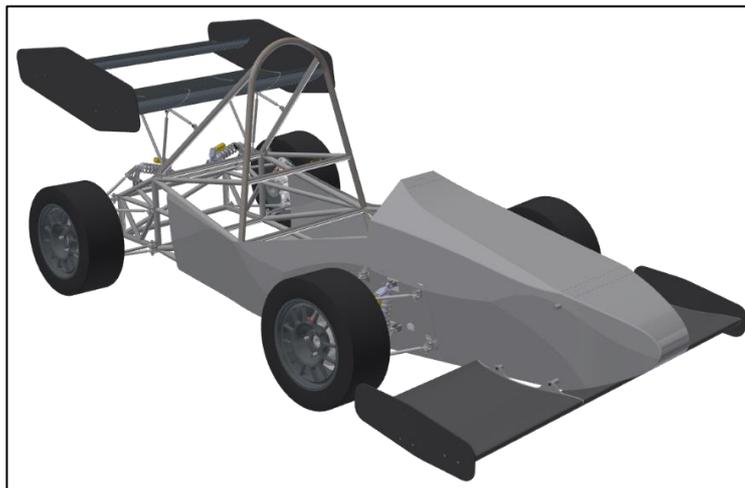


Figure 41 : Vue d'ensemble du kit aérodynamique

5.1. CHOIX DE CONCEPTION

5.1.1. Appendices

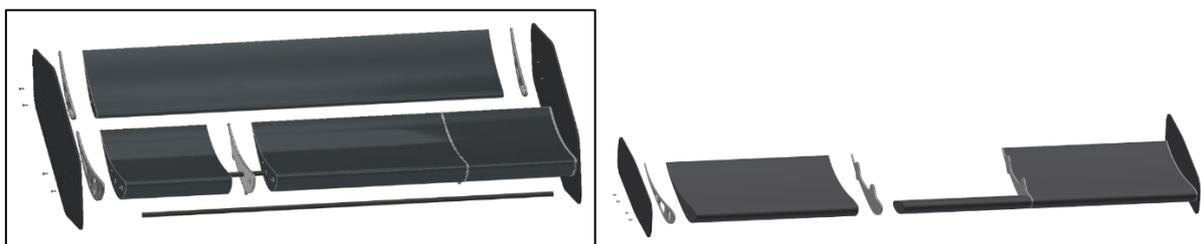


Figure 42 : Illustration semi-éclaté des appendices, à gauche : l'arrière / à droite : l'avant

La structure interne des appendices est réalisée à l'aide de plusieurs éléments qui sont assemblé entre eux par collage. Les premiers éléments sont les préformes en polystyrène expansé qui sont découpées

au fil chaud selon les fichiers CAO. Cette technique à l'avantage d'être légères et d'afficher directement la bonne géométrie pour déposer la fibre par-dessus.

Au centre et à l'extrémité des préforme, il y a des plaques d'aluminium découpées au jet d'eau selon les fichiers CAO. Les deux du centre servent d'interface pour la fixation des appendices au châssis. Celles aux extrémités permettent de visser les plaques verticales se trouvant en chaque extrémité des appendices.

Ces plaques sont achetées au mètre carré puis découpée au jet d'eau ou au fraisage traditionnel. Elles sont disponibles en plusieurs fibre différentes le choix devra être fait lors de la fabrication. Leur but principal est de canaliser l'écoulement, cependant pour l'appendice arrière elles permettent le maintien du deuxième élément.

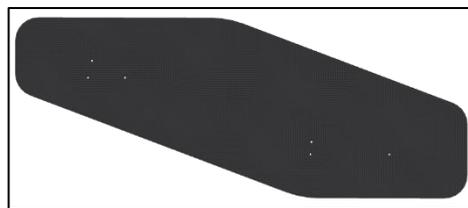


Figure 43 : Plaque vertical vissée aux extrémités de l'appendice arrière

Des tubes de renfort sont insérés dans toute la longueur de la base inférieure de l'aileron arrière uniquement (Figure 42). Ces tubes ont été intégrés pour ajouter une sécurité. En effet les propriétés mécanique des pièces en composites et des assemblages collés ne sont pas bien maîtrisé. Les tubes sont eux basés sur un modèle de poutre en flexion dont le dimensionnement est connu. C'est pourquoi il a été décidé d'en ajouter de manière qu'ils puissent résister aux contraintes en cas d'erreur de dimensionnement des ces éléments. Ils permettent également de reprendre les efforts de cisaillement causé par la force d'appuis du profil supérieur. Il s'agit très certainement d'un surdimensionnement mais pour une première itération il est préférable de le faire ainsi que de risquer une casse.

Par la suite il serait préférable de caractériser les pièces en composite fabriquées à la main. Un test de flambage et de flexion 3 points permet respectivement d'obtenir le module élastique et la limite à la rupture (traction) du matériau. Cela permettra ensuite d'effectuer un dimensionnement précis des appendices et d'enlever les éléments inutiles.

La base des appendices peut ensuite être recouverte de fibre imprégnée de résine. Le choix de la fibre reste à déterminer en fonction des besoins de la VRT. Le prédimensionnement des profils est décrit au chapitre 5.2.

Finalement l'angle d'incidence des profils peut être changé sur deux position. Cela permet d'avoir une configuration « High Lift » et une « Low Drag ». Le changement de configuration est rapidement effectué à l'aide de perçage prévu. En Figure 44 on voit le réglage pour l'appendice arrière.

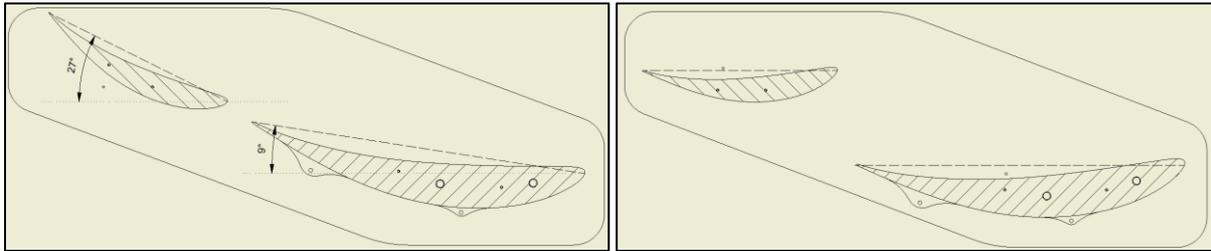


Figure 44 : Exemple du réglage de l'incidence des profils de l'appendice arrière. A gauche High Lift et à droite Low Drag

5.1.2. Interfaçage

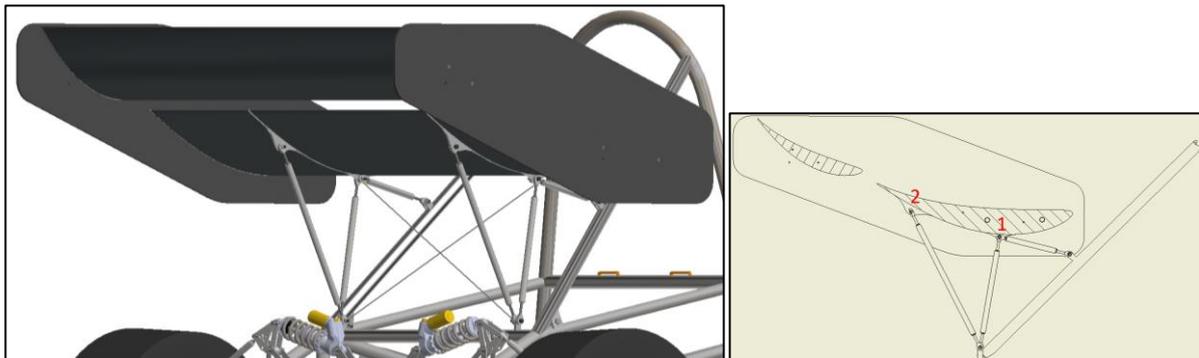


Figure 45 : Système d'interfaçage au châssis de l'aileron arrière

Le système d'interfaçage pour l'appendice arrière s'apparente à une structure treillis triangulaire. L'avantage d'utiliser une structure treillis réside dans le fait que les barres travaillent dans leur direction forte. Elles sont sollicitées soit en traction soit en compression. La jonction des deux barres au nœud 1 permet de bloquer les déplacements horizontaux et verticaux. La 3^{ème} barre fixée au nœud 2 permet de bloquer la rotation de l'ensemble. Les barres sont ensuite simplement prés dimensionnées en traction et en flambage pour s'assurer qu'elles résistent aux contraintes qui leur sont imposées. Toutes les barres sont réglables en longueur ce qui permet un ajustement et évite l'hyperstatisme.

Deux câbles disposés en croix sont utilisés pour reprendre les efforts latéraux et éviter que la structure se déforme.

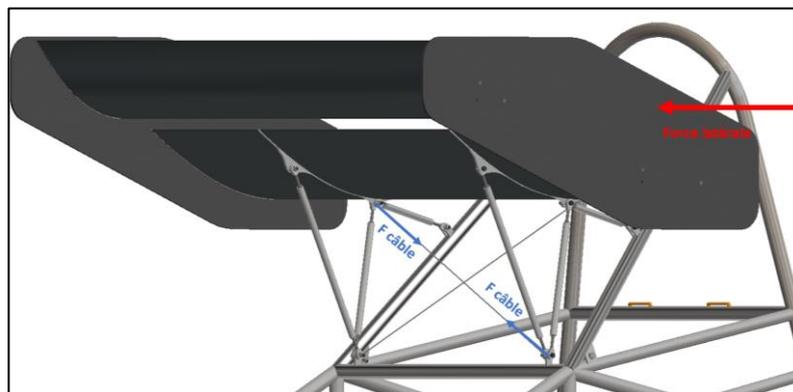


Figure 46 : Illustration des câbles de maintien pour la structure treillis d'interfaçage de l'appendice arrière

Au point de fixation des barres, des vis à épaulement sont utilisées pour reprendre les efforts de cisaillement.



Figure 47 : Illustration de vis à épaulement

Le système d'interfaçage avant est composé de 2 douilles soudées directement sur le châssis ainsi que de câble de traction. L'aileron avant est ensuite vissé sur ces douilles par l'intermédiaire des plaques en aluminium évoquée précédemment. Cette technique permet un interfaçage simple nécessitant peu de modification. Les câbles permettent de reprendre les déplacements verticaux aux extrémité et donc d'éviter que les profils subissent de la flexion.

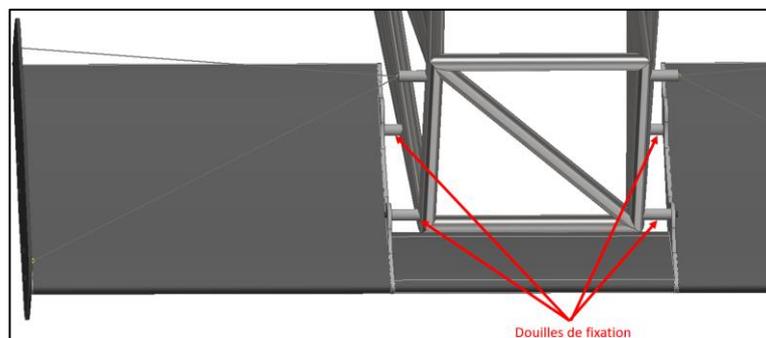


Figure 48 : Système d'interfaçage au châssis de l'aileron avant

La carrosserie a été modifiée pour ajouter un saut de vent. Cette modification à été faite car elle n'est pas longue en réalité.

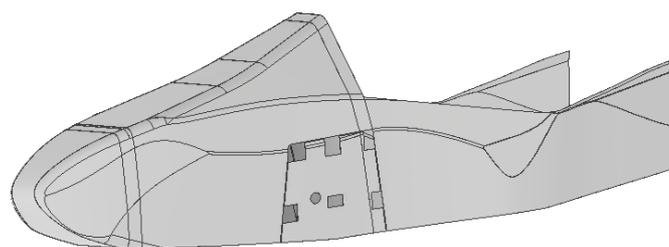


Figure 49 : Carrosserie modifié avec saut de vent

5.2. PRÉDIMENSIONNEMENT DES APPENDICES

Cette section propose un prédimensionnement très conservatif des appendices. Par faute de temps il n'était pas possible de proposer un dimensionnement complet. Il sera nécessaire par la suite de développer le dimensionnement pour s'assurer du bon fonctionnement de tous les éléments.

Pour réaliser les calculs, trois forces sont prise en considération. Les deux première sont la force de portance et de traînée de chaque élément. Elles sont calculées pour la vitesse maximal théorique de la voiture de 150km/h. La troisième force est une accélération des masses instantanée qui est causée par des irrégularité du bitume comme un nid de poule. Selon l'équipe VRT il faut considérer une force de 3G. Un facteur de sécurité supplémentaire de 3 a été pris sur cette valeur car aucune mesure réelle n'a été faite pour s'assurer de sa véracité.

5.2.1. Prédimensionnement des éléments en composites

Le dimensionnement des éléments en composite peut s'avérer complexe car il dépend de la technique de mise en forme et des produits utilisé. Comme première estimation il est possible d'utiliser la loi des mélange pour calculer la limite mécanique en traction du matériaux[20].

$$Rm_c = Rm_F * V_F + Rm_M * V_M$$

Figure 50 : Loi des mélanges[20]

Rm : Limite mécanique en traction [Mpa]
 V : Pourcentage volumique [%]
 Indice « C » : Matériaux composite
 Indice « F » : De la fibre
 Indice « M » : De la matrice

Pour de la stratification à la main, le rapport volumique est de 30% renfort et 70% matrice. La loi des mélanges donne alors une résistance mécanique de 1020 [Mpa] en traction pour un composite en fibre de verre ou carbone.

			Propriétés du renfort (fibre de verre E)			Propriétés du renfort (Fibre de carbone HR)		
			Module de Young	[GPa]	73	Module de Young	[GPa]	235
			Rm longitudinal	[MPa]	3400	Rm longitudinal	[MPa]	3400
			Masse Volumique	[g/cm3]	2.54	Masse Volumique	[g/cm3]	1.75
Propriétés de la matrice			Propriétés du composite (Verre)			Propriétés du composite (carbone)		
			fraction volumique renfort	[%]	30	fraction volumique renfort	[%]	30
Module de Young	[GPa]	4.5	fraction volumique matrice	[%]	70	fraction volumique matrice	[%]	70
Rm longitudinal	[MPa]	67.5	Module de Young longitudinal	[Gpa]	25.05	Module de Young longitudinal	[Gpa]	73.65
Masse Volumique	[g/cm3]	1.25	Rm longitudinal	[Mpa]	1020	Rm longitudinal	[Mpa]	1020

Figure 51 : Propriétés des éléments composite en fonction de la loi des mélanges

Les profils d'aile ont une géométrie compliquée et sont donc difficile à dimensionner. Ils sont alors représentés par des profilés rectangles creux d'un millimètre d'épaisseur. La largeur du profilé vaut 50% de la longueur de corde et la hauteur du profilé vaut 50% de l'épaisseur maximale du profil. Ces paramètres ont été définie de manière à avoir un facteur de sécurité d'environ 2.

Il a été décidé d'effectuer une simulation numérique d'un des éléments pour avoir une deuxième valeur de validation. On obtient une valeur de contrainte en flexion de 33Mpa. Cette contrainte est du même ordre de grandeur que celle que l'on obtient par le calcul manuscrit de la flexion du profil en Figure 53. On peut donc conclure que la géométrie choisie pour dimensionner les profils fait du sens et suffit pour valider ce prédimensionnement.

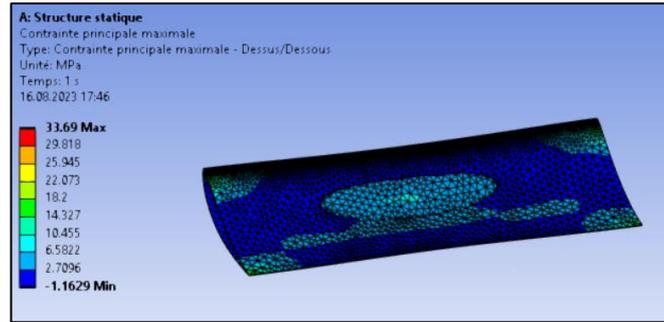


Figure 52 : Simulation de profil arrière supérieur

Le cas de charge qui a été appliqué pour le profil arrière supérieur est celui d'une poutre sur deux appuis. Pour appliquer ce cas l'hypothèse que le profil n'est pas encasté est faite. Dans le cas réel le profil ne peut pas être considéré comme parfaitement encasté non plus. En effet lors de la flexion du profil les plaques latérales fléchiront légèrement vers l'intérieur. Ce cas de charge semble donc cohérent.

Deux cas sont utilisés ici, le premier d'une charge répartie pour la force générée par l'air. Le deuxième est une force au centre pour la force causée par l'environnement comme évoqué précédemment (9*G).

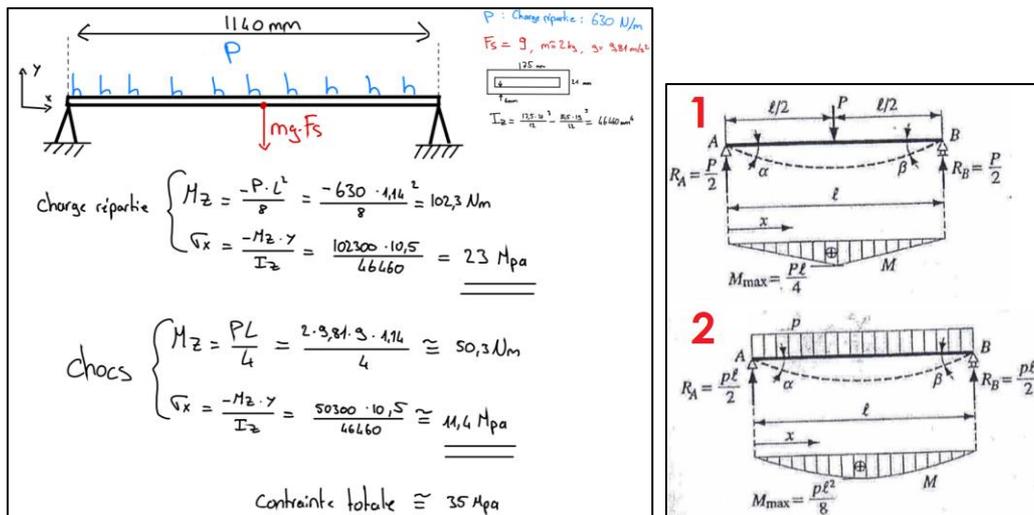


Figure 53 : Calcul de la contrainte de flexion du profil supérieur de l'aileron arrière avec détail des cas de charge

Le cas de charge de l'appendice inférieur de l'aileron arrière est une poutre sur deux appuis. Le cas est décomposé en deux parties pour simplifier la résolution. Chaque partie est résolue en fonction du cas de charge quelle représente

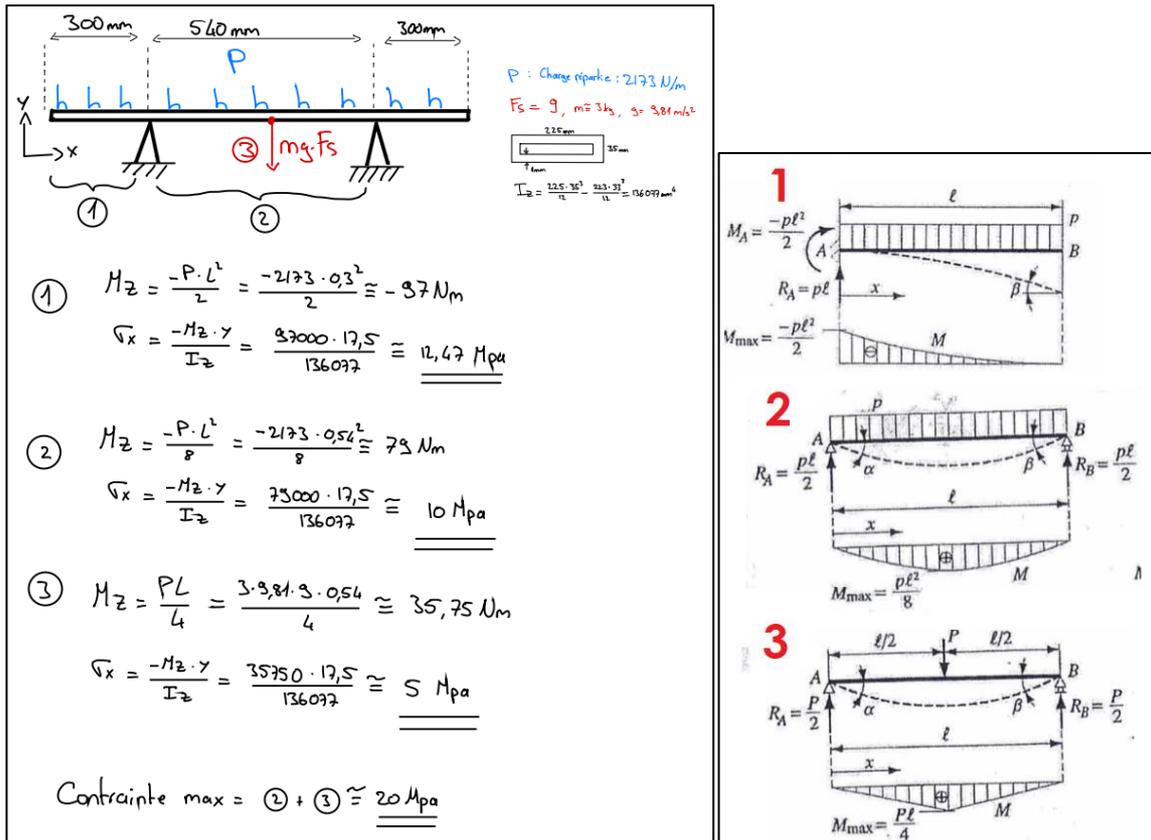


Figure 54 : Calcul de la contrainte de flexion du profil inférieur de l'aileron arrière avec détail du cas de charge

L'aileron avant est globalement similaire au premier cas étudié en Figure 54. Uniquement une moitié a été considérée dans ce cas d'étude car la répartition est symétrique des deux côtés. Cela permet de simplifier la résolution.

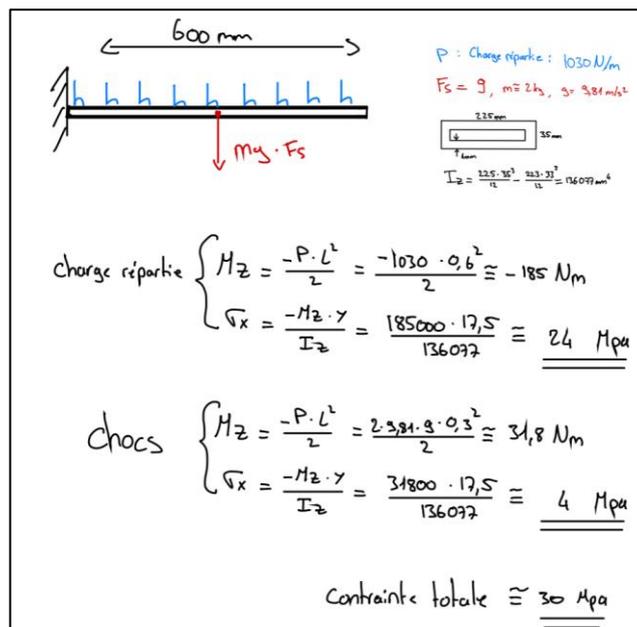


Figure 55 : Cas de charge d'une moitié de l'aileron avant

5.2.2. Prédimensionnement de l'interfaçage arrière

L'aileron est symétrique dans sa longueur, pour simplifier les calculs uniquement une moitié a été considérée dans le calcul. Cette façon de faire est conservative car les forces de réactions obtenues pour deux points d'appuis sont en réalité répartie sur 4 points d'appuis. Cela permet d'introduire un facteur de sécurité de deux dans les calculs.

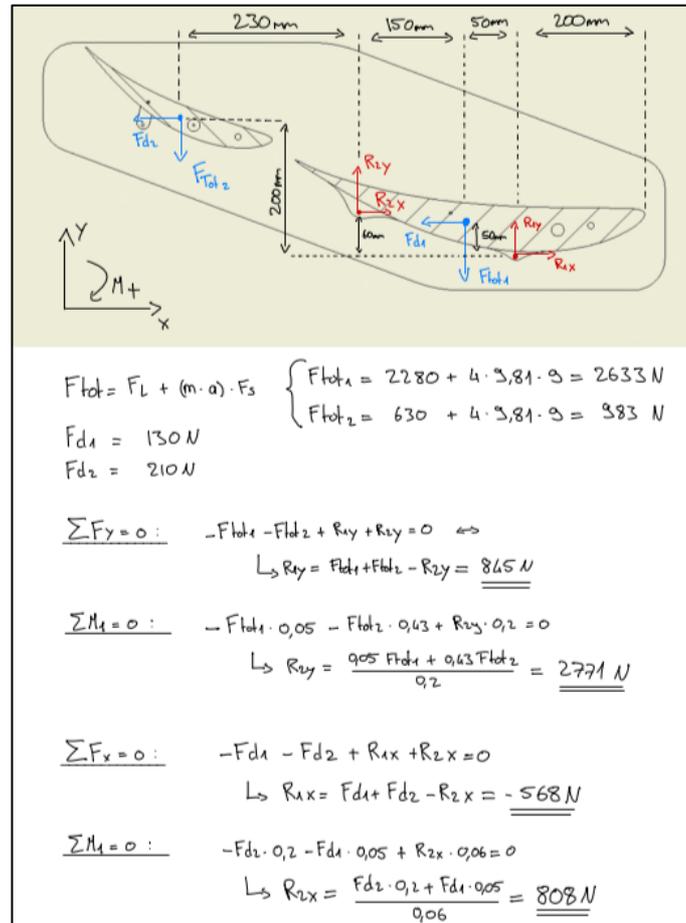


Figure 56 : Calcul des forces de réactions aux points de fixation de l'appendice arrière

On peut ensuite pré dimensionner les barres. Pour ce faire on calcule le diamètre minimal nécessaire pour éviter que les barres flambent. Pour ce calcul, on considère le pire cas, celui ou la force R_{2y} arrondie à 3000N est appliquée en compression dans une barre. Ce cas est doublement conservatif. Dans un premier temps parce que les 3000N sont normalement répartis sur deux appuis. Réellement R_{2y} vaudrait 1500N. La deuxième raison est qu'au vu de la disposition des barres, aucune ne reprend cette force complète en compression car aucune n'est parfaitement verticale.

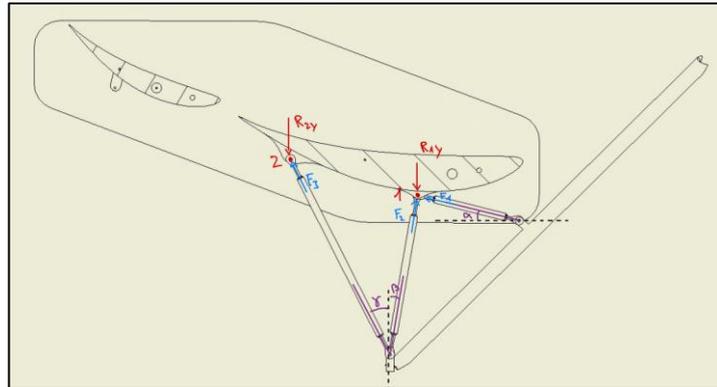


Figure 57 : Illustration de la disposition des barres du système d'interface de l'aileron arrière

Cette hypothèse nous permet également dans le cadre de ce prédimensionnement d'éviter la résolution du treillis complet en assurant une résistance suffisante. On trouve donc que les barres doivent avoir un diamètre minimal de 10.05mm.

$$I_z = \frac{\pi D^4}{64}$$

$k = 1$ (rotule-rotule)

$$F_c = \frac{E \pi^3 D^4}{64 L^2} \Leftrightarrow D = \sqrt[4]{\frac{F_c \cdot 64 L^2}{E \pi^3}}$$

$$10.05 [mm] = \sqrt[4]{\frac{3000 \cdot 64 \cdot 340^2}{70000 \cdot \pi^3}}$$

Figure 58 : Calcul du diamètre minimal en fonction de la force de flambage appliquée

Le cas de charge utilisé pour le dimensionnement de l'interface avant est le suivant. Le câble de traction empêche que le profil travaille en flexion. Il doit donc reprendre une force de 794N. Les câbles de traction ont un tendeur intégré de manière à régler correctement la tension.

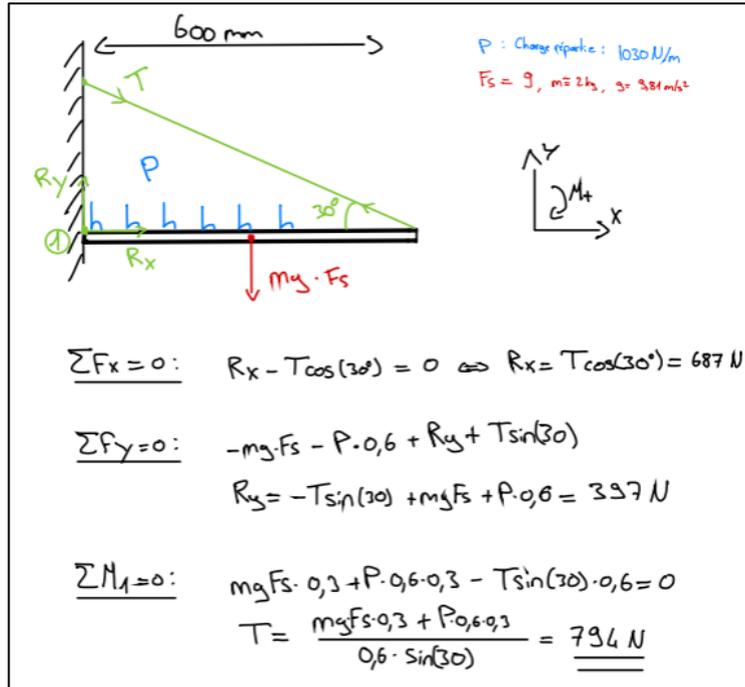


Figure 59 : Cas de charge de l'appendice avant

En conclusion ce prédimensionnement permet d'avoir une idée de la résistance mécanique des différents éléments. Tous les cas sont sûrs dimensionner par rapport aux besoins. La raison en est simplement que le temps à disposition n'était plus suffisant pour proposer un dimensionnement précis. Il apporte donc une base qui doit être terminée avant d'intégrer ces systèmes.

6. ANALYSE DE LA VOITURE COMPLÈTE

6.1. RÉSULTATS

La simulation finale 3D de la voiture complète a été fait pour 3 configurations supplémentaire. Les deux premières sont « High Lift » et « Low Drag » avec la carrosserie d'origine. La troisième est « High Lift » avec la carrosserie qui a été modifiée pour ajouter un saut de vent.

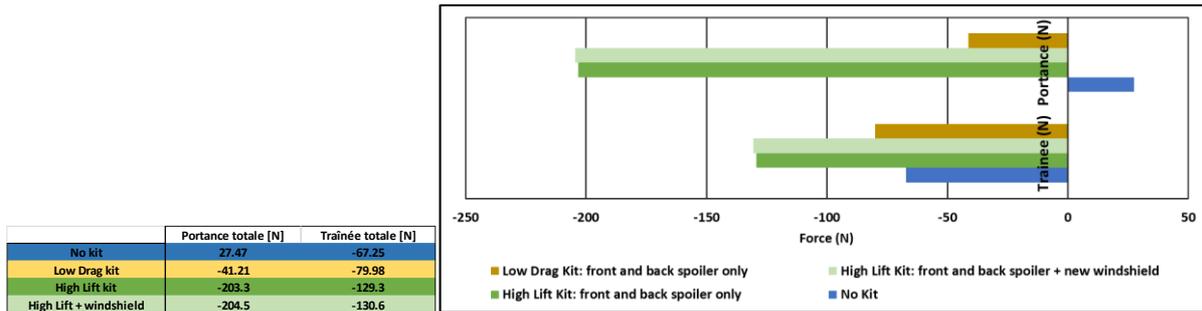


Figure 60 : Comparaison des performances des différentes configurations

Dans un premier temps on peut constater que le saut de vent n’apporte définitivement pas de gain notable sur la traînée. Cela explique probablement le fait que presque aucune équipe n’utilise de saut de vent.

Ensuite on note l’efficacité de la configuration permettant de réduire la traînée des appendices. La diminution entre la configuration High Lift et Low Drag est de 40% ce qui donne une force d’environ 80N. Cette force est 12N plus élevée que la trainée initiale de la voiture sans kit aérodynamique. On voit selon le chapitre 6.2 que ces 12N représentent environ 0.24s supplémentaire sur une accélération de 0 à 100km/h.

La configuration permettant d’augmenter l’appuis fonctionne également. On avait au départ une portance de 27N qui tendais à délester la voiture et on arrive maintenant à une force d’appuis de 200N. En regardant la répartition de vitesse on s’aperçoit que le pilote obstrue le passage de l’air jusqu’à l’aileron. On ne peut pas surélever l’appendice, mais en abaissant le pilote (position couchée) on pourrait permettre à l’air d’arriver directement sur l’aileron sans être perturbé et donc augmenter encore la portance.

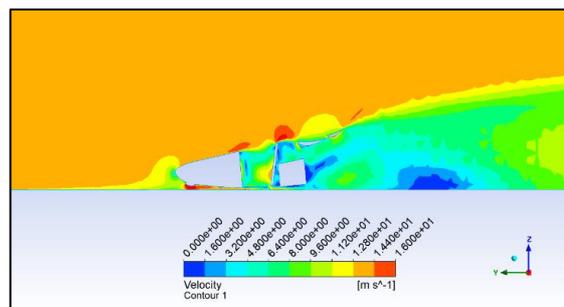


Figure 61 : Visualisation du champ de vitesse sur le plan central de la voiture

La diminution de traînée des roues n'est pas très marquée. On remarque que pour le kit High Lift la traînée diminue de 14% pour seulement 1.4N. Cela ne correspond pas vraiment aux résultats obtenus lors de la simulation au chapitre 4.2.5. Il y a probablement d'autre phénomène 3D qui doivent être pris en considération. Cette étude nécessitera d'être développée par la suite car la traînée de roues est un phénomène complexe.

	Trainée Roue AvD [N]	Trainée Roue ArD [N]
No kit	-10.04	-5.31
Low Drag kit	-9.22	-5.29
High Lift kit	-8.61	-8.44
High Lift + windshield	-8.72	-8.16

Figure 62 : Trainées des roues avant et arrière droite en fonction des configurations

On peut donc conclure sur le bon fonctionnement des appendices. Cependant l'aérodynamique d'une formule de course est très complexe. Cette première étude nécessitera d'être complétée et optimisée par la suite. L'aérodynamique de cette voiture n'aura jamais fins d'être amélioré.

6.2. INFLUENCE DE LA TRAINÉE SUR LE TEMPS D'ACCÉLÉRATION

Il est possible de calculer le temps d'accélération mis par la voiture pour atteindre une vitesse finale en partant de l'arrêt complet sur une route plate. La méthodologie utilisée est directement issue du cours « MEC3 – mécanique avancée ». Elle consiste à rapporter les inertie et masse à une seule masse équivalente. Le temps nécessaire à accélérer cette masse de 0 à la vitesse finale peut ensuite être calculé à l'aide de la formule suivante.

$$t_{(v_{finale}[\frac{km}{h}])} = \int_0^{v_{finale}[\frac{m}{s}]} \frac{Masse\ équivalente[kg]}{Force\ motrice[N] - Force\ résistante[N]} * dv_{finale}$$

Figure 63 : Formule du temps nécessaire pour accélérer une masse équivalente jusqu'à une vitesse finale

On voit ci-dessous l'influence d'une force de traînée de 10[N]. L'accélération de 0 à 100km/h est ~0.2s plus lente que lorsque la traînée est nulle. En effectuant plusieurs essais, on voit qu'une force de traînée égale à 1N augmente d'environ deux centième le temps d'accélération.

Formule : $t(100\text{km/h}) = \int_0^{27,7} \frac{m_{\text{éq}}}{F_{\text{mot}} - F_{\text{fr}}} \cdot dv$

Variables $\left\{ \begin{array}{l} m_{\text{voiture}} = 330\text{ kg} \\ m_{\text{roue}} = 15\text{ kg}, R = 0,545\text{ m} \\ i_{\text{roue}} = \frac{1}{R}, i_{\text{trans}} = 3 \\ M_{\text{moteur}} = 65\text{ Nm} \end{array} \right.$

$m_{\text{éq}} = J_{\text{mot}} \cdot i_{\text{trans}}^2 \cdot i_{\text{roue}}^2 + 4 J_{\text{roue}} \cdot i_{\text{roue}}^2 + m_{\text{voiture}} \approx 350\text{ kg}$

$F_{\text{mot}} = M_{\text{mot}} \cdot i_{\text{trans}} \cdot i_{\text{roue}} = 780\text{ N}$

$F_{\text{fr}} = \text{Force de traînée} = 10\text{ N}$

Sans traînée $\Rightarrow t(100\text{km/h}) = \int_0^{27,7} \frac{m_{\text{éq}}}{F_{\text{mot}}} \cdot dv = \frac{350}{780} (27,7 - 0) = 12,42\text{ [s]}$

avec traînée $\Rightarrow t(100\text{km/h}) = \int_0^{27,7} \frac{m_{\text{éq}}}{F_{\text{mot}} - F_{\text{fr}}} \cdot dv = \frac{350}{770} (27,7 - 0) = 12,53\text{ [s]}$

Figure 64 : Démonstration du calcul pour une force de traînée de 10[N]

Il est important de noter tout de même que ce calcul n'est pas parfaitement en accord avec la réalité. Dans la réalité la force de traînée est proportionnelle au carré de la vitesse. Elle n'est donc pas constante pendant la phase d'accélération comme c'est le cas avec cette formule. En réalité le temps d'accélération sera moins impacté. Ce calcul conservatif permet de se faire une première idée de l'impact d'une traînée supplémentaire.

7. CONCLUSION

7.1. CONCLUSION

Pour conclure ce travail il est important de rappeler brièvement les objectifs initiaux. Le but du projet était de concevoir des appendices aérodynamiques pour la formule électrique de l'équipe VRT. Leur attente principale est de pouvoir créer une force d'appuis supplémentaire afin d'augmenter la vitesse de passage en courbe de leur monoplace. Un deuxième objectif était de fournir à la VRT un document leur permettant par la suite de continuer le développement de ce kit.

Le projet a débuté avec l'acquisition des compétences de base en mécanique des fluides. Les notions théoriques qui sont nécessaire au développement de ce kit ont été répertoriées. Une prise en main du logiciel de simulation numérique Ansys CFX a ensuite été réalisée. Cette prise en main à permis de représenter des phénomènes physiques connus pour compléter les notions théoriques.

Dans un deuxième temps, la conception s'est décomposée en deux partie. La première consiste à simuler numériquement six éléments indépendants qui composent un kit aérodynamique. Les résultats de ses simulations ont permis de concevoir par CAO une première version des appendices. Le kit est composé de l'aileron arrière et avant. Les deux sont réglable sur deux positions qui permettent d'adapter les propriétés en fonction des besoins des différents circuits.

Ensuite, un prédimensionnement des appendices et de leur interfaçage au châssis a été effectué. Le dimensionnement précis n'a pas été effectué car les simulations ont occupé plus temps qu'il était prévu. C'est pour cette raison que la majorité des éléments ont été surdimensionné.

Finalement des simulations 3D de la voiture complète ont été réalisées. Ces études permettent de confirmer les performances obtenues du kit aérodynamique.

7.2. PERSPECTIVES D'AMÉLIORATIONS

Il existe de nombreuses perspectives d'amélioration concernant ce travail. Il faut tout d'abord rappeler qu'il s'agit d'une première étude de l'aérodynamique de cette formule. Cette étude a permis de découvrir les fondamentaux qui composent un kit aérodynamique. Certains éléments ont déjà été étudiés et d'autre reste à découvrir. On peut séparer les perspectives en deux blocs.

Le premier est orienté sur les simulations numériques. Il s'agit ici d'étudier d'autre éléments ou alors de compléter les simulations déjà existantes. Ce domaine est tellement vaste et complexe que l'on pourra toujours améliorer les performances de ces éléments.

Le deuxième bloc concerne le dimensionnement et la conception des appendices. Il serait intéressant d'étudier précisément les techniques de mise en forme de la fibre ainsi que de réaliser des tests sur les éléments fabriqué. Cela permettra de maîtriser les propriétés mécaniques des pièces dans le but réaliser des dimensionnements corrects. Cela peut par exemple permettre un gain de poids sur les pièces.

8. SOURCES

- [1] « Nombre de Mach », *Wikipédia*. 14 avril 2023. Consulté le: 6 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Nombre_de_Mach&oldid=203344352
- [2] « 021_Notion Aerodynamique.pdf ».
- [3] « 024_Hydr_FR_DM5_ER5_2022.pdf ».
- [4] S. Amiroudine et J.-L. Battaglia, *Mécanique des fluides: cours, 70 exercices corrigés*, 3e éd. in Sciences sup. Paris: Dunod, 2017.
- [5] « Nombre de Reynolds », *Wikipédia*. 5 juin 2023. Consulté le: 14 juin 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Nombre_de_Reynolds&oldid=204933820
- [6] P. Gilliéron et A. Kourta, *Aérodynamique automobile pour l'environnement, le design et la sécurité*, 2e éd. Toulouse: Cépaduès-éd, 2014.
- [7] « Théorie de la ligne portante de Prandtl ».
- [8] Techno-Science.net, «  Aérodynamique - Définition et Explications », *Techno-Science.net*. <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Aerodynamique.html> (consulté le 24 mai 2023).
- [9] « Williamson_Cylinder_1996_ARFM.pdf ».
- [10] « 01_FS-Rules_2023_v1.1.pdf ».
- [11] « JavaFoil ». <https://www.mh-aerotoools.de/airfoils/javafoil.htm> (consulté le 10 août 2023).
- [12] « Générateur de profil aérodynamique NACA à 4 chiffres (NACA 2412 AIRFOIL) ». <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit> (consulté le 10 août 2023).
- [13] M. F. U. Rab, M. J. Alam, A. Akhlaque, et M. Mahrukh, « COMPARATIVE ANALYSIS OF HIGH-LIFT AIRFOILS FOR MOTORSPORTS APPLICATIONS », présenté à AFM18, Ljubljana, Slovenia, juill. 2018, p. 173-183. doi: 10.2495/AFM180171.
- [14] « CH10 (smoothed) (ch10sm-il) ». <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=ch10sm-il#polars> (consulté le 13 juillet 2023).
- [15] « FX 74-C15-140 MOD (smoothed) (fx74modsm-il) ». <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=fx74modsm-il> (consulté le 13 juillet 2023).
- [16] « S1223 (s1223-il) ». <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=s1223-il#polars> (consulté le 13 juillet 2023).
- [17] « 025_Ansys_CFX_Tutorials_2022_R2.pdf ».
- [18] W. A. Mokhtar, « A Numerical Study of High-Lift Single Element Airfoils with Ground Effect for Racing Cars », présenté à SAE 2005 World Congress & Exhibition, avr. 2005, p. 2005-01-0607. doi: 10.4271/2005-01-0607.
- [19] « Zaheer_2019_J._Phys._Conf._Ser._1355_012006.pdf ».
- [20] « Carreño-Morelli - Introduction aux matériaux composites.pdf ».
- [21] J. Katz, « AERODYNAMICS OF RACE CARS », *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 38, n° 1, p. 27-63, janv. 2006, doi: 10.1146/annurev.fluid.38.050304.092016.

9. TABLE DES FIGURE

Figure 1 : Illustration de la première formule électrique conçue entièrement par l'équipe Valais Racing Team	2
Figure 2 : Démonstration de la variation de la vitesse sur une ligne de courant dans une conduite fermée en fonction du changement de section selon l'équation de la continuité de Bernoulli	7
Figure 3: Démonstration de l'évolution de la pression en fonction de la variation de vitesse sur une ligne de courant selon Bernoulli	7
Figure 4 : Démonstration de la force résultante d'une différence de pression entre les faces inférieur et supérieur d'un corps volumique....	7
Figure 5 : Illustration d'un profil d'aile de type NACA utilisé en aéronautique	8
Figure 6 : Démonstration simplifiée de Bernoulli pour un profil d'aile de type NACA	8
Figure 7 : Illustration de la théorie de la ligne portante de Prandtl sur la répartition elliptique [7].....	11
Figure 8 : Illustration du gradient de vitesse en fonction de la distance à la paroi (Y) avec décollement de la couche limite (point D) sur un profil [4]	12
Figure 9 : A gauche, le maillage réalisé pour le NACA 4310 / A droite, les paramètres principaux de la simulation	13
Figure 10 : Comparaison des coefficients de traînée (cDrag) et de portance (cLift) en fonction de l'angle d'incidence obtenus par simulation avec ceux fournis par JavaFoil.....	14
Figure 11 : Visualisation des lignes de courants (à gauche) et du champ de pression (à droite) pour la portance maximale à l'angle d'incidence de 12°.....	14
Figure 12 : Courbes de références pour un cylindre. A gauche l'évolution du coefficient de traînée en fonction du nombre de Reynolds[4]. A droite l'évolution du coefficient de pression en fonction du nombre de Reynolds[9].....	15
Figure 13 : A gauche, le maillage réalisé pour le cylindre / A droite, les paramètres principaux de la simulation	15
Figure 14 : Courbes finales de l'évolution du coefficient de traînée d'un cylindre en fonction du Reynolds de l'écoulement obtenues par simulation ANSYS Fluent (CFX). La courbe noire représente la référence (Figure 2).....	16
Figure 15 : Comparaison de l'écoulement obtenu par simulation à Re = 1 avec la littérature[4]. L'écoulement est laminaire	16
Figure 16 : Comparaison de l'écoulement obtenu par simulation à Re = 26 avec la littérature[4]. L'écoulement est laminaire stationnaire. 16	16
Figure 17 : Comparaison de l'écoulement obtenu par simulation à Re = 138 avec la littérature[4]. L'écoulement est laminaire instationnaire (T = 0.1[s])	17
Figure 18 : Evolution du coefficient de traînée du corps d'Ahmed en fonction de l'angle d'inclinaison de la lunette arrière. La courbe orange représente la référence littéraire[6].	17
Figure 19: Représentation des lignes de courant au culot du corps d'Ahmed pour différents angles d'inclinaison.....	18
Figure 20 : A gauche l'illustration de l'encombrement maximal admissible des appendices, à droite l'illustration des espaces qui ne doivent pas être obstrués [10].....	19
Figure 21 : Simulation OptimumLap de l'évolution de la vitesse du véhicule en fonction de la distance parcourue sur le circuit d'endurance du Michigan (vitesse moyenne 47km/h).....	20
Figure 22 : Nombres de Reynolds de l'écoulement calculés en fonction de la longueur de corde des profils et de la vitesse moyenne actuelle du véhicule.....	21
Figure 23 : A gauche : Courbes du coefficient de performance (Cl/Cd) en fonction de l'angle d'incidence (α) (Violet Re=500'000, Jaune Re=100'000) / A droite : Géométrie 2D du profil CH10 [14]	22
Figure 24 : A gauche : Courbes du coefficient de performance (Cl/Cd) en fonction de l'angle d'incidence (α) (Violet Re=500'000, Jaune Re=100'000) / A droite : Géométrie 2D du profil FX74 [15].....	22
Figure 25 : A gauche : Courbes du coefficient de performance (Cl/Cd) en fonction de l'angle d'incidence (α) (Violet Re=500'000, Jaune Re=100'000) / A droite : Géométrie 2D du profil S1223 [16]	23
Figure 26 : Schémas décrivant les éléments principaux d'un kit aérodynamique. Les éléments encadrés en vert sont ceux étudiés dans ce travail.....	23
Figure 27 : Simulation 3D de la voiture complète sans kit aérodynamique	24

Figure 28 : Représentation du maillage appliqué pour les 3 profils avec ces paramètres principaux	25
Figure 29 : Configuration de l'environnement de simulation établis dans le modèle	25
Figure 30 : A gauche : Courbe de monitoring de la valeur RMS en fonction du nombre d'itération / A droite : Courbe de monitoring des coefficients de portance et de traînée en fonction du nombre d'itération.....	26
Figure 31 : Graphique des coefficients de portance des trois profils pour un Re=500'000 obtenus avec les différentes simulations réalisées	27
Figure 32 : Graphique de comparaison des coefficients de portance pour chaque profil regroupé par source et simulation. Javafoil (A) / Airfoil Tools (B) / modèle de simulation (C).....	28
Figure 33 : Schéma de principe pour l'étude de l'influence du sol, profil CH10	28
Figure 34 : Représentation de la configuration appliquée pour toutes les simulations à proximité du sol.....	29
Figure 35 : Graphique des coefficients de portance et de traînée en fonction du rapport H/C. Les 3 profils sont représentés pour les nombres de Reynolds 500'000 et 100'000 ainsi que pour deux angles d'incidence de 0° et 10°	30
Figure 36 : Schéma de principe pour l'étude du saut de vent et résumé de la configuration appliquée	31
Figure 37 : Graphique des coefficients de traînée de la coque et du pilote en fonction de l'angle d'inclinaison du saut de vent	31
Figure 38 : Schéma de principe pour l'étude de l'influence de l'aileron avant sur les roues.....	32
Figure 39 . Représentation de la configuration appliquée pour la simulation de l'influence de l'aileron avant sur les roues.....	33
Figure 40 : A gauche : Schéma de principe pour l'étude Multi-Element	34
Figure 41 : Vue d'ensemble du kit aérodynamique.....	36
Figure 42 : Illustration semi-éclaté des appendices, à gauche : l'arrière / à droite : l'avant	36
Figure 43 : Plaque vertical vissée aux extrémités de l'appendice arrière.....	37
Figure 44 : Exemple du réglage de l'incidence des profils de l'appendice arrière. A gauche High Lift et à droite Low Drag	38
Figure 45 : Système d'interfaçage au châssis de l'aileron arrière.....	38
Figure 46 : Illustration des câbles de maintien pour la structure treillis d'interfaçage de l'appendice arrière.....	38
Figure 47 : Illustration de vis à épaulement	39
Figure 48 : Système d'interfaçage au châssis de l'aileron avant.....	39
Figure 49 : Loi des mélanges[20].....	40
Figure 50 : Propriétés des éléments composite en fonction de la loi des mélanges	40
Figure 51 : Simulation de profil arrière supérieur	41
Figure 52 : Calcul de la contrainte de flexion du profil supérieur de l'aileron arrière avec détail des cas de charge	41
Figure 53 : Calcul de la contrainte de flexion du profil inférieur de l'aileron arrière avec détail du cas de charge	42
Figure 54 : Cas de charge d'une moitié de l'aileron avant.....	42
Figure 55 : Calcul des forces de réactions aux points de fixation de l'appendice arrière	43
Figure 56 : Illustration de la disposition des barres du système d'interfaçage de l'aileron arrière	44
Figure 57 : Calcul du diamètre minimal en fonction de la force de flambage appliquée	44
Figure 58 : Cas de charge de l'appendice avant	45
Figure 59 : Comparaison des performances des différentes configurations	46
Figure 60 : Visualisation du champ de vitesse sur le plan central de la voiture	46
Figure 61 : Trainées des roues avant et arrière droite en fonction des configurations.....	47
Figure 62 : Formule du temps nécessaire pour accélérer une masse équivalente jusqu'à une vitesse finale	47
Figure 63 : Démonstration du calcul pour une force de traînée de 10[N].....	48

10. REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les personnes suivantes qui ont apporté leur aide à un moment ou un autre durant ce projet.

- **Mr. Gabriel Paciotti** pour son suivi, sa disponibilité et son expérience transmise lors de ce projet. Je le remercie également pour les conseils de conceptions mécanique apportés.
- **Mr. Jean Decaix** pour son suivi et son assistance pour les problèmes liées à la mécanique des fluides. Je le remercie également pour la réalisation des simulations 3D de la voiture complète.
- **Mes collègues diplômants** pour avoir partagés leurs points de vue lors de problèmes rencontrés.

11. SIGNATURE

Sion, le 18.08.2023

Quentin Torrent

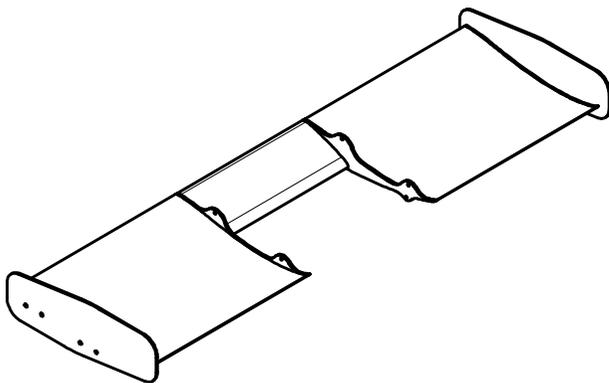
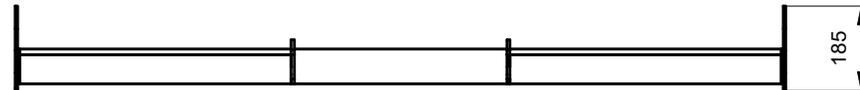
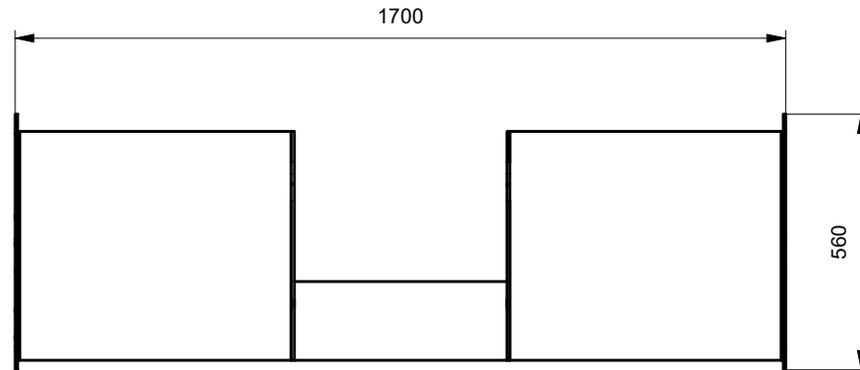
12. ANNEXES

12.1. MISE EN PLANS

12.2. FICHER EXCEL RÉSULTATS FORME SIMPLE

12.3. FICHER EXCEL DE CONCEPTION DES APPENDICES

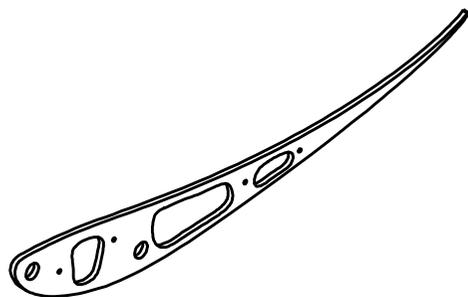
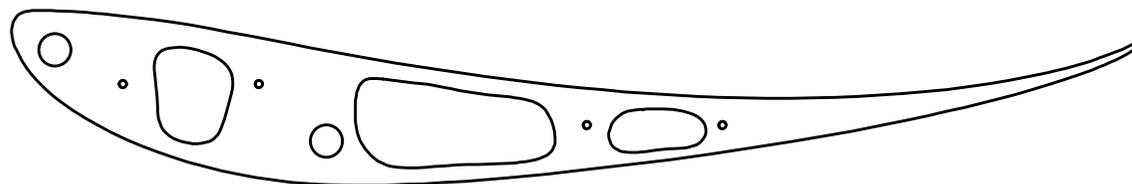
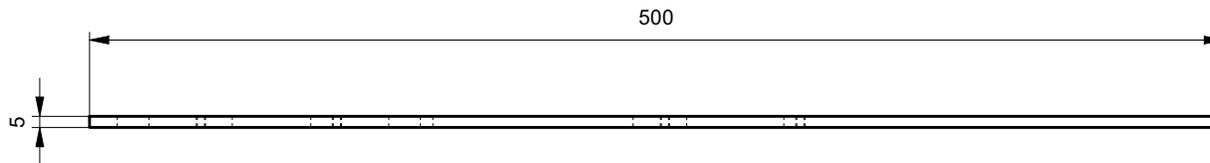
12.4. FICHER EXCEL RÉSULTATS SIMULATION 3D



No./Num.	A100		No. de Projet/Projektnummer:		TB		
Titre/Titel	Mise en plan d'ensemble			Dessiné/ Gezeichnet	Torrent Quentin	17.08.2023	
	Sous-titre/Untertitel			Contrôlé/ Geprüft			
			Révision/ Änderung	v1	17.08.2023		
Hes-so  VALAIS WALLIS			Refer to protection notice ISO-16016		Matière/Rohstoff:		
			Masse Gewicht	3.944 kg		Multiple	
						Echelle/Massstab	0.06 : 1
						Feuille/Blatt	1/1
							A4

Mise en forme: Découpage au jet d'eau selon fichier CAO

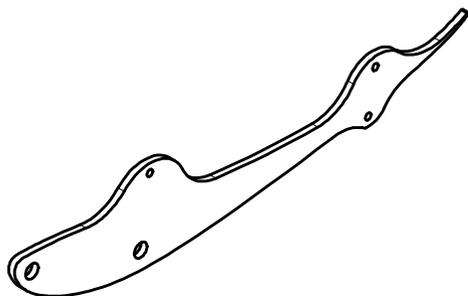
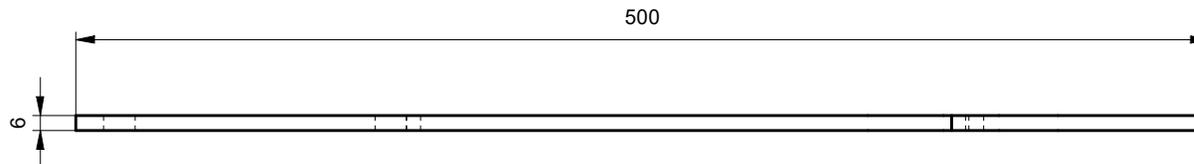
QTY : 2x



No./Num.	P101		No. de Projet/Projektnummer: TB	
Titre/Titel	Mise en plan		Dessiné/ Gezeichnet	Torrent Quentin
	Sous-titre/Untertitel		Contrôlé/ Geprüft	17.08.2023
Insert Extrémité		Révision/ Änderung	v1	17.08.2023
Hes·so VALAIS WALLIS		Refer to protection notice ISO-16016		Matière/Rohstoff: Aluminium
		Masse Gewicht	0.158 kg	
				Echelle/Massstab 0.3
				Feuille/Blatt 1/1
				A4

Mise en forme: Découpage au jet d'eau selon fichier CAO

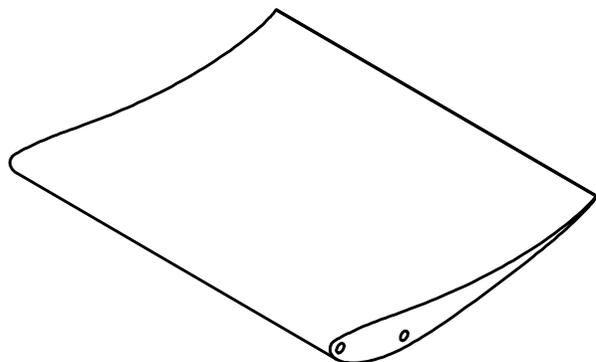
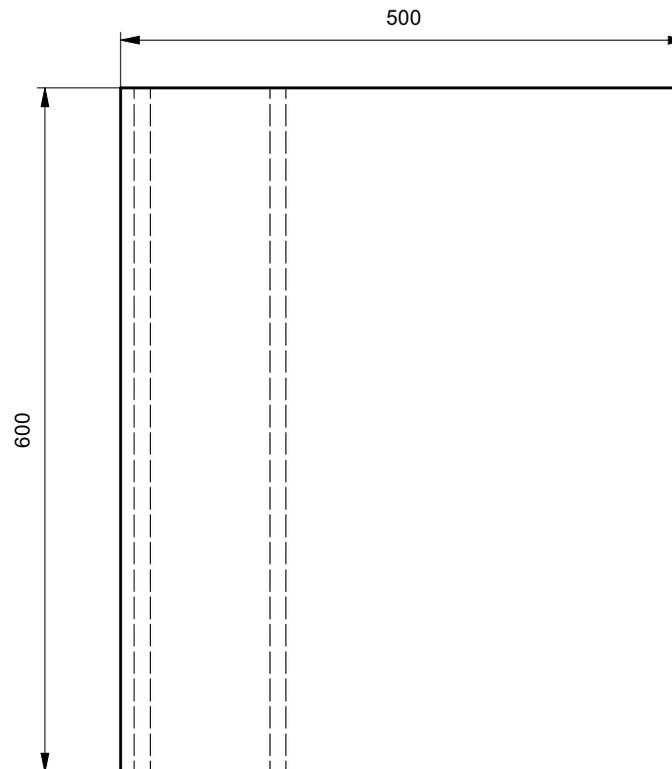
QTY : 2x



No./Num.		P107		No. de Projet/Projektnummer:		TB	
Titre/Titel		Mise en plan		Dessiné/ Gezeichnet	Torrent Quentin	17.08.2023	Echelle/Massstab 0.3
Sous-titre/Untertitel		Insert Interfaçage		Contrôlé/ Geprüft			Feuille/Blatt 1/1
				Révision/ Änderung	v1	17.08.2023	
				Matière/Rohstoff:		Aluminium	
		Refer to protection notice ISO-16016					
		Masse Gewicht		0.380 kg		A4	

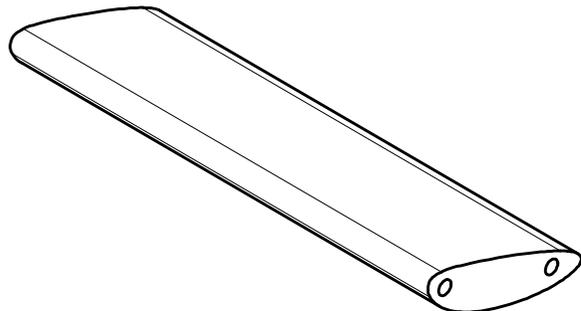
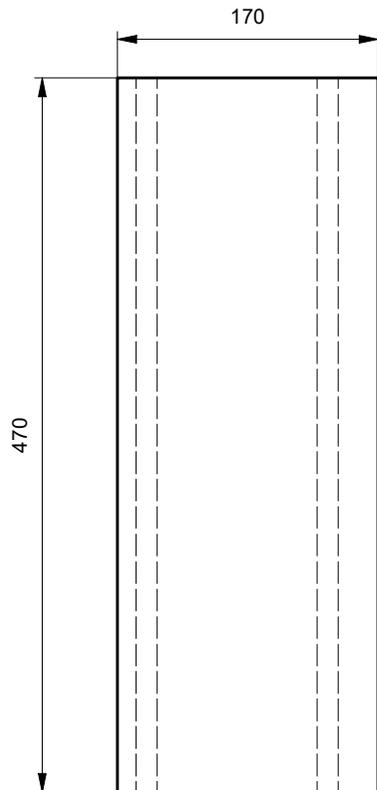
Mise en forme: Découpage au fil chaud selon fichier CAO

QTY : 2x



No./Num.	P103		No. de Projet/Projektnummer:		TB	
Titre/Titel	Mise en plan		Dessiné/ Gezeichnet	Torrent Quentin	17.08.2023	Echelle/Massstab 0.15
			Contrôlé/ Geprüft			Feuille/Blatt 1/1
Sous-titre/Untertitel	Profil Latéral		Révision/ Änderung	v1	17.08.2023	
			Refer to protection notice ISO-16016		Matière/Rohstoff:	
			Masse Gewicht	0.491 kg		Polystyrène expansé
						A4

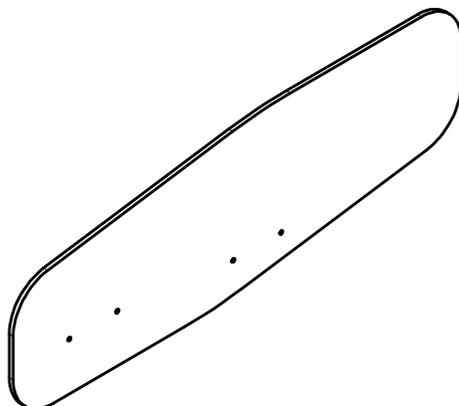
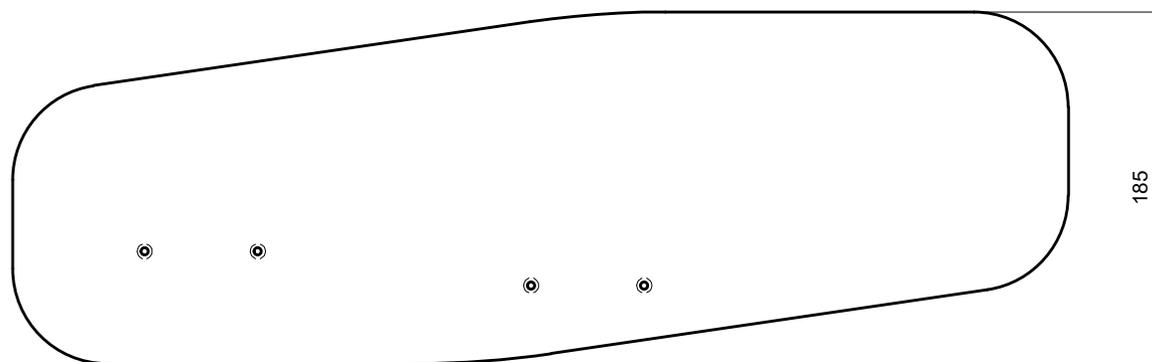
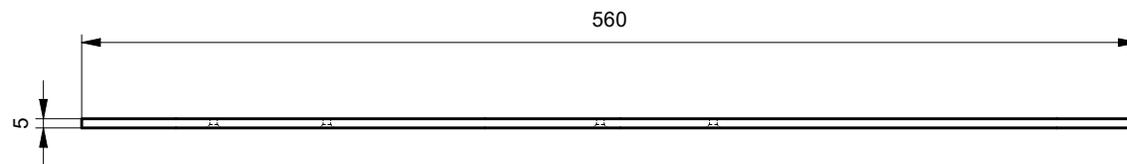
Mise en forme: Découpage fil chaud selon fichier CAO



No./Num.		P108		No. de Projet/Projektnummer:		TB	
Titre/Titel		Mise en plan		Dessiné/ Gezeichnet	Torrent Quentin	17.08.2023	Echelle/Massstab 1:5
Sous-titre/Untertitel		Profil central		Contrôlé/ Geprüft			Feuille/Blatt 1/1
		Refer to protection notice ISO-16016		Révision/ Änderung	v1	17.08.2023	
		Masse Gewicht		0.149 kg		Matière/Rohstoff: Polystyrène expansé	
						A4	

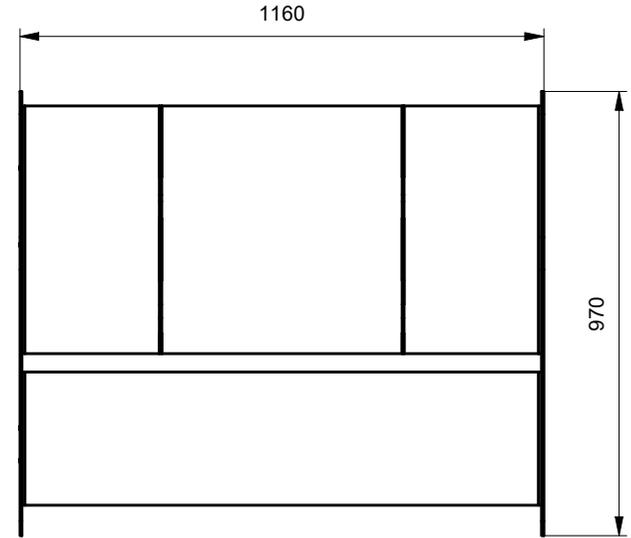
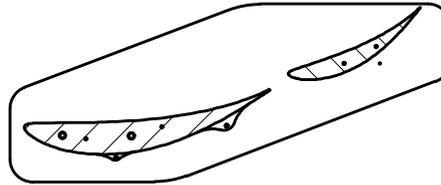
Mise en forme: Découpage au jet d'eau selon fichier CAO

QTY : 2x

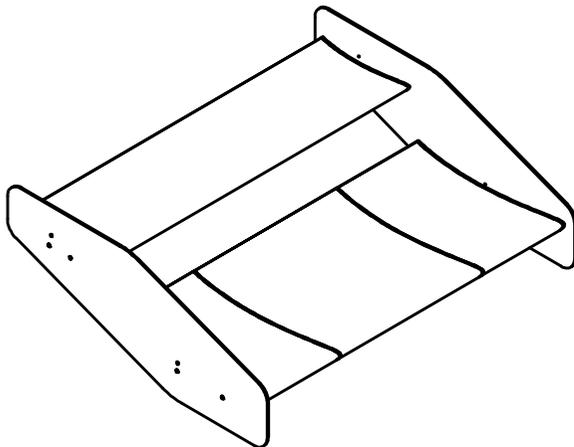
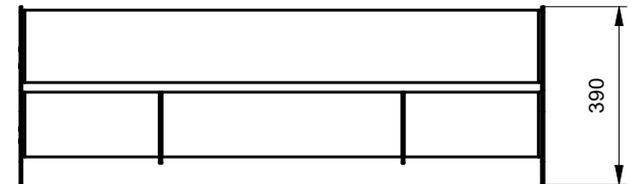
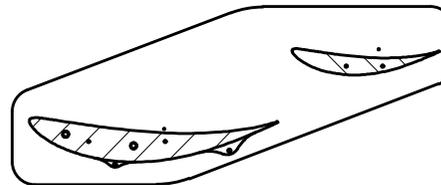


No./Num.	P106		No. de Projet/Projektnummer:		TB	
Titre/Titel	Mise en plan		Dessiné/ Gezeichnet	Torrent Quentin	17.08.2023	Echelle/Massstab 0.25
			Contrôlé/ Geprüft			Feuille/Blatt 1/1
Sous-titre/Untertitel	Winglet		Révision/ Änderung	v1	17.08.2023	
			Refer to protection notice ISO-16016		Matière/Rohstoff:	
			Masse Gewicht	0.745 kg		Fibre De Carbone

High Lift Configuration

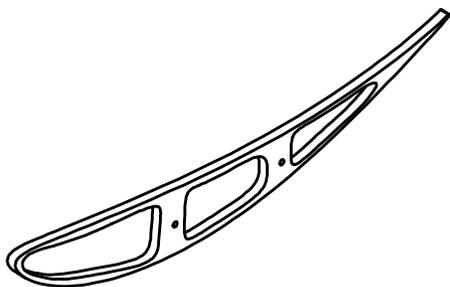
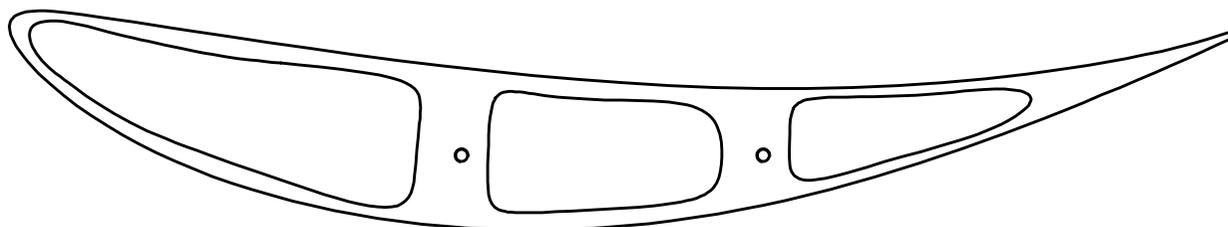
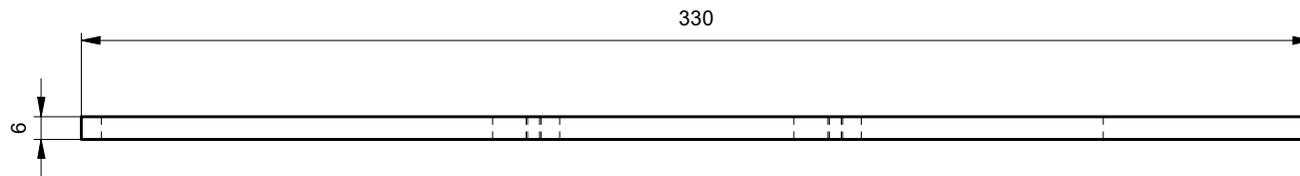


Low Drag Configuration



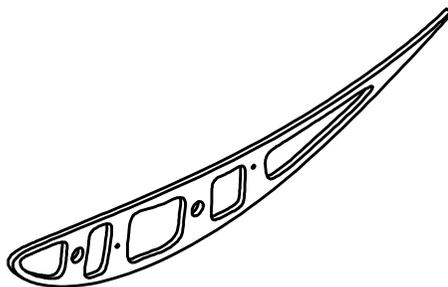
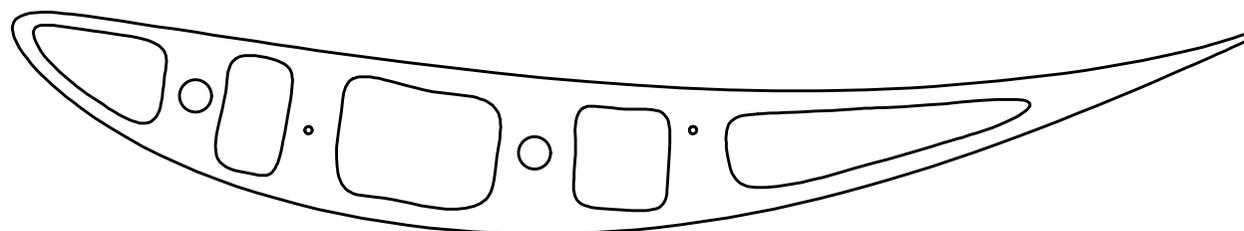
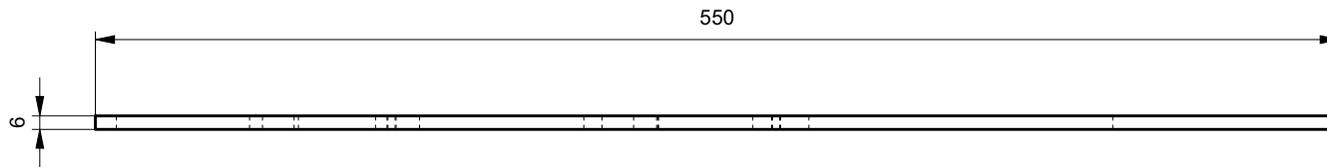
No./Num.	A200		No. de Projet/Projektnummer:		TB	
Titre/Titel	Mise en plan d'ensemble		Dessiné/ Gezeichnet	Torrent Quentin	17.08.2023	Echelle/Massstab 0.06
			Contrôlé/ Geprüft			Feuille/Blatt 1/1
Sous-titre/Untertitel	Appendice arrière		Révision/ Änderung	v1	17.08.2023	
			Refer to protection notice ISO-16016		Matière/Rohstoff:	
			Masse Gewicht	7.714 kg		Multiple
						A4

Mise en forme: Découpage au jet d'eau selon fichier CAO



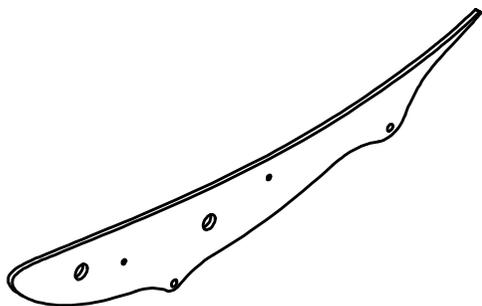
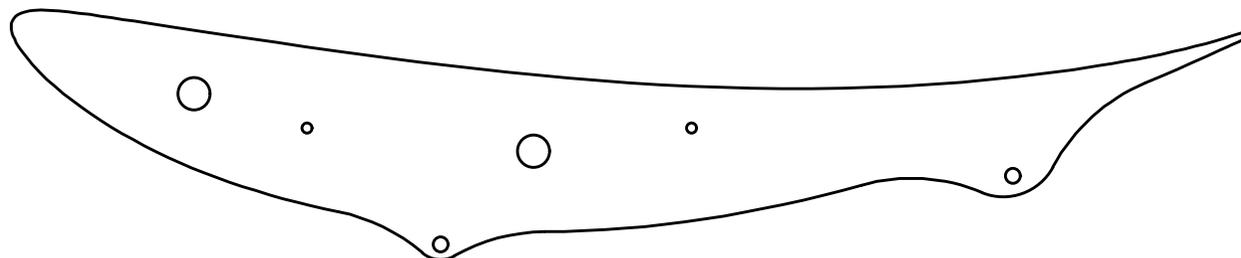
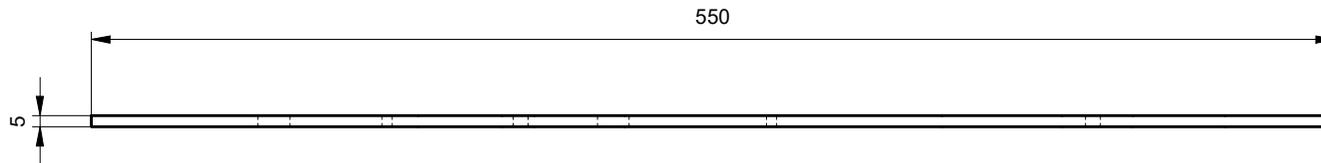
No./Num.	P216		No. de Projet/Projektnummer:		TB	
Titre/Titel	Mise en plan		Dessiné/ Gezeichnet	Torrent Quentin	17.08.2023	Echelle/Massstab 1 : 2
			Contrôlé/ Geprüft			Feuille/Blatt 1/1
Sous-titre/Untertitel	Insert Extrémité Supérieur		Révision/ Änderung	v1	17.08.2023	
			Refer to protection notice ISO-16016		Matière/Rohstoff:	
			Masse Gewicht	0.022 kg	Aluminium	
						A4

Mise en forme: Découpage au jet d'eau selon fichier CAO



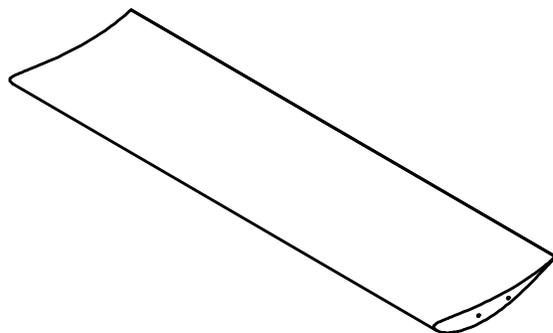
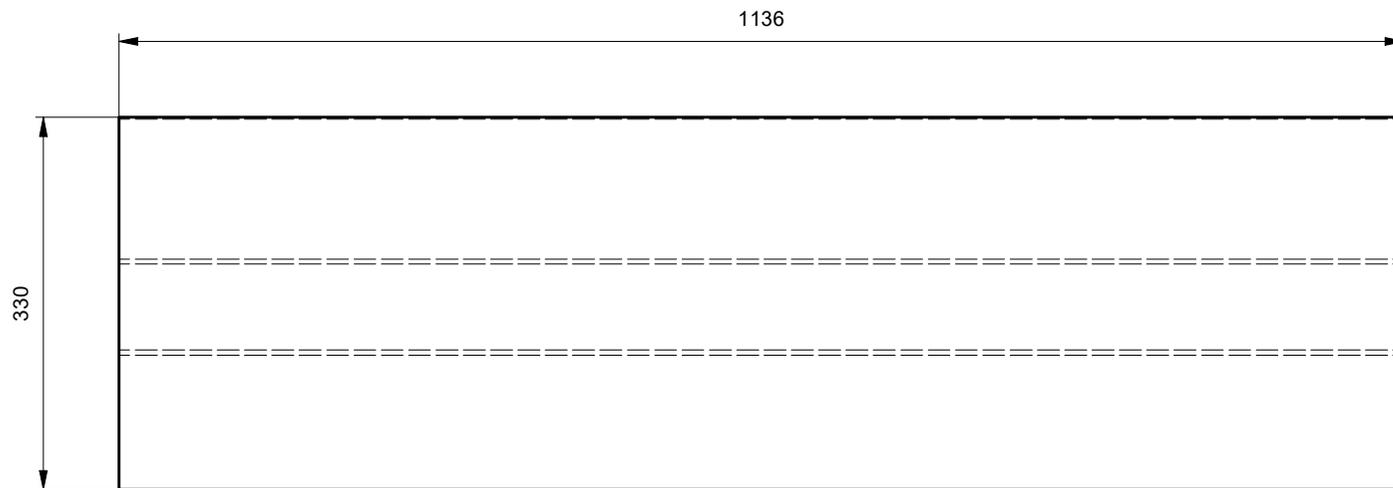
No./Num.		P215		No. de Projet/Projektnummer:		TB	
Titre/Titel		Mise en plan		Dessiné/ Gezeichnet	Torrent Quentin	17.08.2023	Echelle/Massstab 0.3
Sous-titre/Untertitel		Insert Extrémité Inférieur		Contrôlé/ Geprüft			Feuille/Blatt 1/1
				Révision/ Änderung	v1	17.08.2023	
		Refer to protection notice ISO-16016		Matière/Rohstoff:		Aluminium	
		Masse Gewicht 0.232 kg				A4	

Mise en forme: Découpage au jet d'eau selon fichier CAO



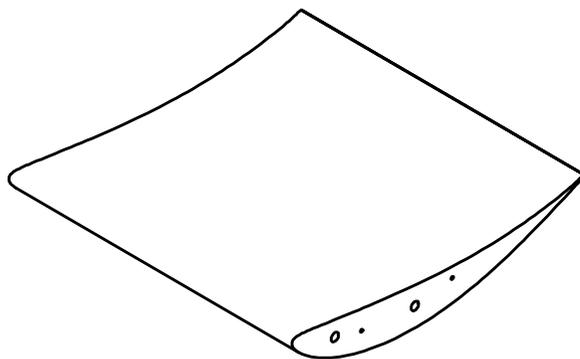
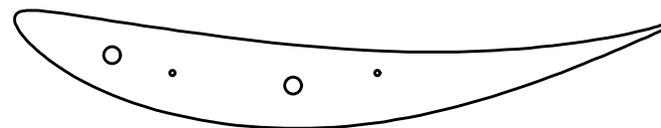
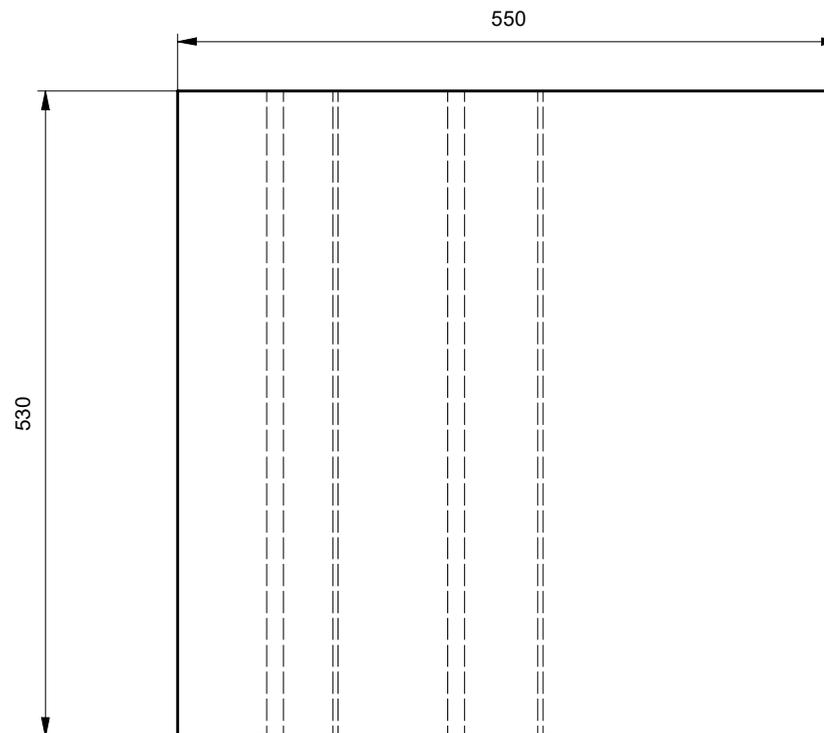
No./Num.		P205		No. de Projet/Projektnummer:		TB	
Titre/Titel		Mise en plan		Dessiné/ Gezeichnet	Torrent Quentin	17.08.2023	Echelle/Massstab 0.3
Sous-titre/Untertitel		Insert Central Fixation		Contrôlé/ Geprüft			Feuille/Blatt 1/1
				Révision/ Änderung	v1	17.08.2023	
		Refer to protection notice ISO-16016		Matière/Rohstoff:		Aluminium	
		Masse Gewicht		0.368 kg		 A4	

Mise en forme: Découpage au fil chaud selon fichier CAO



No./Num.		P209		No. de Projet/Projektnummer:		TB	
Titre/Titel		Mise en plan		Dessiné/ Gezeichnet	Torrent Quentin	17.08.2023	Echelle/Massstab 0.15
Sous-titre/Untertitel		Profil supérieur		Contrôlé/ Geprüft			Feuille/Blatt 1/1
				Révision/ Änderung	v1	17.08.2023	
		Refer to protection notice ISO-16016		Matière/Rohstoff:		Polystyrène expansé	
		Masse Gewicht	0.515 kg				
						A4	

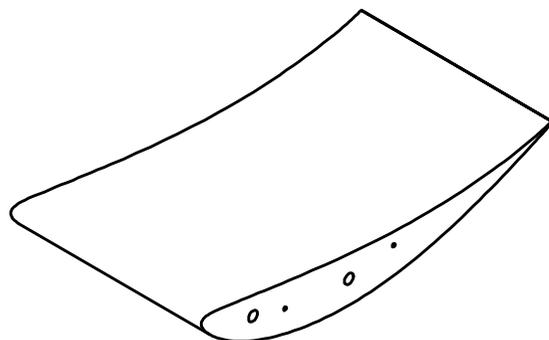
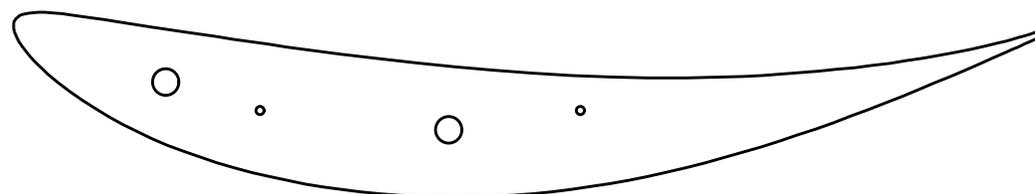
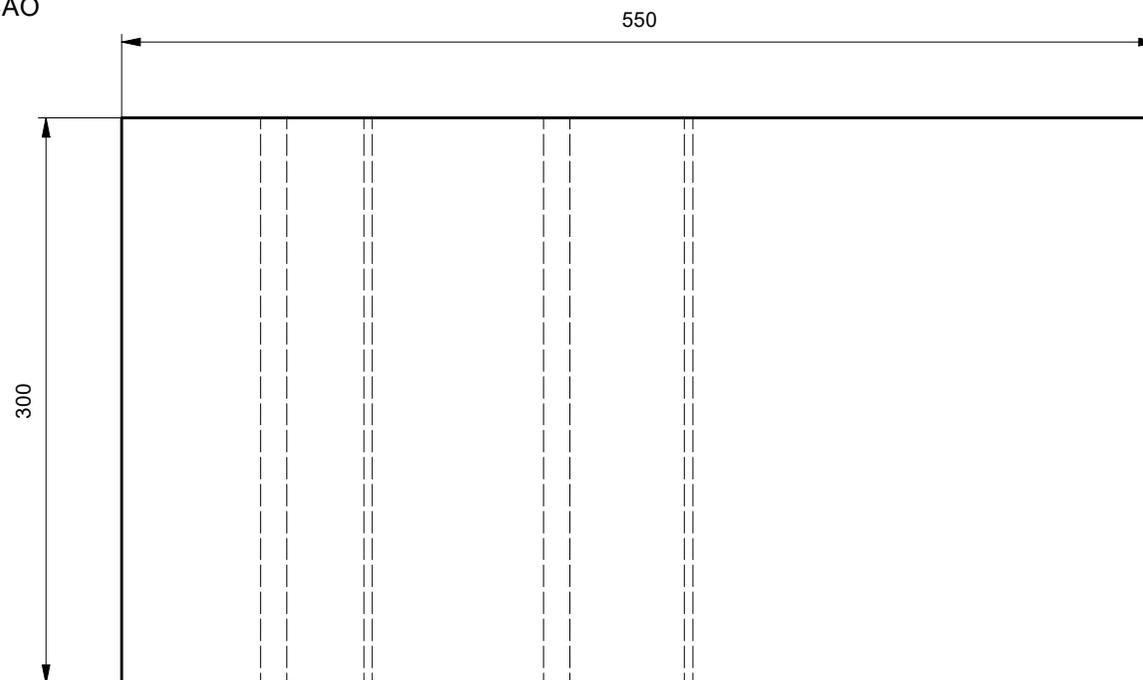
Mise en forme: Découpage au fil chaud selon fichier CAO



No./Num.	P203		No. de Projet/Projektnummer:		TB	
Titre/Titel	Mise en plan		Dessiné/ Gezeichnet	Torrent Quentin	17.08.2023	Echelle/Massstab 0.16 : 1
			Contrôlé/ Geprüft			Feuille/Blatt 1/1
Sous-titre/Untertitel	Profil Inférieur Central		Révision/ Änderung	v1	17.08.2023	
			Refer to protection notice ISO-16016		Matière/Rohstoff:	
			Masse Gewicht	0.677 kg	Polystyrène expansé	

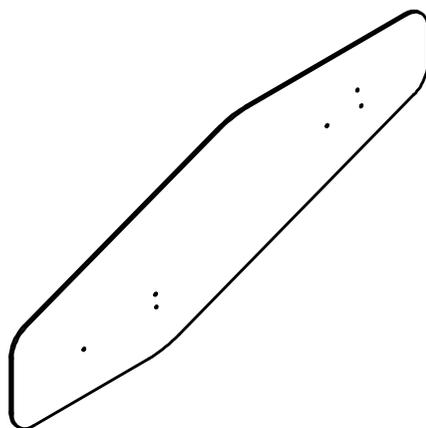
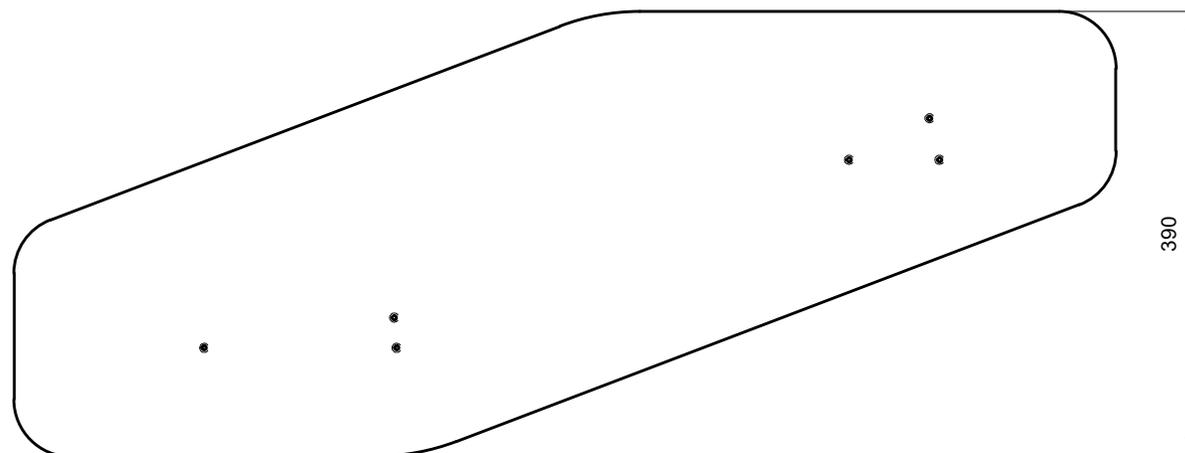
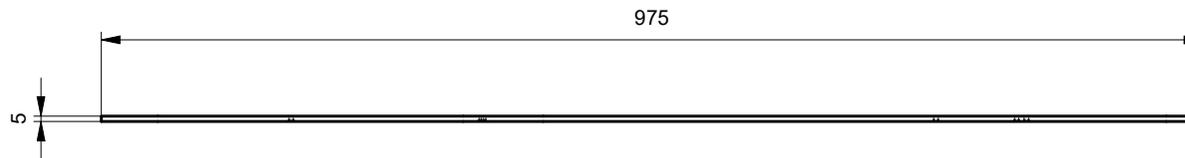
Mise en forme: Découpage au fil chaud selon fichier CAO

QTY : 2x



No./Num.	P204		No. de Projet/Projektnummer:		TB	
Titre/Titel	Mise en plan		Dessiné/ Gezeichnet	Torrent Quentin	17.08.2023	Echelle/Massstab 0.25
			Contrôlé/ Geprüft			Feuille/Blatt 1/1
Sous-titre/Untertitel	Profil Inférieur Latéral		Révision/ Änderung	v1	17.08.2023	
			Refer to protection notice ISO-16016		Matière/Rohstoff:	
			Masse Gewicht	0.379 kg	Polystyrène expansé	

Mise en forme: Découpage au jet d'eau selon fichier CAO



No./Num.		P210		No. de Projet/Projektnummer:		TB	
Titre/Titel		Mise en plan		Dessiné/ Gezeichnet	Torrent Quentin	17.08.2023	Echelle/Massstab 0.15
Sous-titre/Untertitel		Winglet		Contrôlé/ Geprüft			Feuille/Blatt 1/1
		Refer to protection notice ISO-16016		Révision/ Änderung	v1	17.08.2023	
		Masse Gewicht 2.174 kg		Matière/Rohstoff:		Fibre De Carbone	
						A4	