

Simulation numérique pour le développement d'un ensemble aérodynamique d'une Formule SAE

Hugues PERRIN

RÉSUMÉ

Le club d'ingénierie de la Formule ETS à l'École de technologie supérieure (ÉTS) se distingue par son expertise dans la conception de voitures monoplaces, ayant réussi à passer à la propulsion électrique. Les compétitions, comme la Formule SAE, évaluent divers aspects de la performance des prototypes, notamment l'accélération, la maniabilité et l'endurance. Une approche utilisant la simulation CFD sur STAR-CCM+ est adoptée pour analyser et optimiser les performances aérodynamiques des véhicules de course, même dans des conditions où l'appui aérodynamique est moins crucial, ce qui contribue à maximiser l'efficacité et la compétitivité sur la piste.

Mots-clés: Formule SAE, Simulation CFD en ligne droite, Simulation CFD en virage, Modélisation aérodynamique, Performance, STAR-CCM+, Soufflerie

TABLE DES MATIÈRES

	Page
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Contexte	1
1.2 Domaine du problème	2
1.3 Approche générale	3
CHAPITRE 2 AÉRODYNAMIQUE D'UN VÉHICULE DE FORMULE SAE	4
2.1 Forces aérodynamiques	4
2.1.1 Appui aérodynamique	5
2.1.2 Traînée aérodynamique	5
2.1.3 Coefficients aérodynamiques	6
2.1.4 Finesse	7
2.2 Equation de Bernoulli	7
2.3 Effet Venturi et effet de Sol	8
2.4 Approche statistique de la turbulence	9
2.4.1 Equations de Navier-Stokes	9
2.4.2 Décomposition de Reynolds	9
2.4.3 Approximation de Boussinesq	13
2.4.4 Modèles à une et deux équations	14
2.4.4.1 Modèle de fermeture de Spalart et Allmaras	15
2.4.4.2 Modèle de fermeture $k-\epsilon$	15
2.4.4.3 Modèle de fermeture $k-\omega$	17
2.4.4.4 Modèle de fermeture $k-\omega$ SST	18
2.4.5 Ecoulement turbulent de paroi	19
CHAPITRE 3 DYNAMIQUE D'UN VÉHICULE DE COURSE FORMULE SAE	22
3.1 Comportement dynamique d'un véhicule	22
3.2 Distribution et balance des forces aérodynamiques	24
3.3 Ensemble aérodynamique véhicule de course : MANIC24	26
CHAPITRE 4 BASE DE DONNÉES EXPÉRIMENTALE EN LIGNE DROITE	30
4.1 Session de test effectués	30
4.1.1 Essais sur piste	30
4.1.2 Tufting	31
4.1.3 Soufflerie	33
4.2 Observations Aérodynamiques	34
CHAPITRE 5 MÉTHODOLOGIE DE SIMULATION EN LIGNE DROITE	39
5.1 Caractéristiques Géométriques	39
5.2 Choix des équations	41
5.3 Spécification des Conditions aux Limites	43

5.4	Description des Paramètres Physiques	45
5.5	Maillage	48
5.5.1	Enveloppe de Surface (Surface Wrapper)	48
5.5.2	Stratégie de maillage	49
5.5.3	Épaisseur de la première maille	52
5.5.4	Raffinement du maillage	54
5.5.5	Étude de la sensibilité du maillage	55
CHAPITRE 6	ANALYSE DES RÉSULTATS (LIGNE DROITE)	58
6.1	Interprétation des données	58
6.1.1	Analyse des résidus	58
6.1.2	Représentation du Y+	59
6.1.3	Profil de Vitesse	60
6.1.4	Coefficient de pression	62
6.1.5	Contrainte pariétale	63
6.1.6	Q-Criterion	65
6.1.7	Valeurs aérodynamiques finales	66
6.2	Validation par comparaison du modèle numérique	67
6.2.1	Validation expérimentale : Aeromaps	68
6.2.2	Validation visuelle	70
6.3	Application des résultats à des problèmes d'ingénierie réels	72
6.4	Améliorations potentielles	72
CHAPITRE 7	MÉTHODOLOGIE DE LA SIMULATION EN VIRAGE	74
7.1	Rappel des modes d'un objet	74
7.2	Domaine du problème	75
7.3	Simulation avec mouvement de lacet	75
7.4	Caractéristiques géométriques	77
7.5	Choix des équations	78
7.6	Description des paramètres physiques	79
7.6.1	Création de Paramètres Globaux	79
7.6.2	Vitesse angulaire des roues	79
7.6.3	Référentiels spécifiques	81
7.6.4	Rotating Reference Frames	82
7.7	Spécification des conditions aux limites	83
7.8	Maillage	85
CHAPITRE 8	ANALYSE DES RÉSULTATS (VIRAGE)	86
8.1	Introduction de nouveaux coefficients	86
8.1.1	CSA - Coefficient de tangage	86
8.1.2	AB-Y - Balance Aérodynamique Transversale	87
8.2	Asymétrie du modèle	88
8.2.1	Spécificités et validation de la simulation en virage	88
8.3	Tableau Général - Récapitulatif des simulations	89

8.4	Analyses et comparaisons	90
8.4.1	Comparaison à la ligne droite	91
8.4.2	Visualisation des différences intérieur-extérieur	93
8.4.3	Comparaisons des valeurs droite-gauche	95
8.5	Interprétation des résultats	97
CHAPITRE 9 PISTES D'AMÉLIORATION		100
9.1	Modèle de simulation	100
9.2	Modèle géométrique de la voiture	101
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		103
ANNEXE I ANNEXE		104
BIBLIOGRAPHY		105

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Formule ETS victoire seconde place générale en Croatie 2
Figure 2.1	Bilan des forces agissant sur une voiture 4
Figure 2.2	Différents modèles de turbulence 13
Figure 2.3	Différentes zones de la couche limite turbulente 20
Figure 3.1	Convention utilisée pour décrire les modes du véhicule 22
Figure 3.2	Paramètres géométriques de MANIC23 23
Figure 3.3	Distribution et balance des forces aérodynamiques 24
Figure 3.4	Distribution équilibrée de l'aérodynamique 25
Figure 3.5	Représentation de l'équilibre aérodynamique 26
Figure 3.6	Ensemble aérodynamique de MANIC24 27
Figure 3.7	Ailerons avant de MANIC24 27
Figure 3.8	Ailerons arrières de MANIC24 28
Figure 3.9	Systèmes de réduction de traînée de MANIC24 28
Figure 3.10	Ailerons latéraux de MANIC24 29
Figure 4.1	Aeromap effectuée en essais sur piste 31
Figure 4.2	Application de tuft sur MANIC24 32
Figure 4.3	MANIC24 en soufflerie 33
Figure 4.4	Vue arrière de MANIC23 lors des essais en soufflerie 34
Figure 4.5	Photographie des tufts du fond plat 35
Figure 4.6	Visualisation par fumée de la recirculation sur le fond plat 36
Figure 4.7	Echanges entre la partie supérieure et inférieure de la jupe 36
Figure 4.8	Visualisation d'un décrochage par la méthode du tufting 37

Figure 4.9	Visualisation du fluide au voisinage de l'aile arrière	38
Figure 5.1	Simplification de la géométrie	39
Figure 5.2	Dimensions du Domaine	40
Figure 5.3	Validation de l'indépendance du domaine	41
Figure 5.4	Graphique du CLA pour différents modèles de turbulence	42
Figure 5.5	Détail des conditions aux limites du domaine	44
Figure 5.6	Détail des vitesses propres en Conditions Limites	45
Figure 5.7	Étude du Nombre de Courant	46
Figure 5.8	Étude du facteur de relaxation	47
Figure 5.9	Couche limite turbulente	48
Figure 5.10	Maillage à couches prismatiques	49
Figure 5.11	Maillage volumique de MANIC24	50
Figure 5.12	Paramétrage du Y+ sur MANIC24	51
Figure 5.13	Maillage à couches prismatiques	52
Figure 5.14	Zones de raffinement de maillage	54
Figure 5.15	Étude de la durée de maillage en fonction de la taille d'élément	56
Figure 5.16	Étude de la sensibilité au maillage du CLA	57
Figure 6.1	Graphique des résidus de la simulation	59
Figure 6.2	Comparaison des surfaces à hauts et faibles Y+	60
Figure 6.3	Vue en coupe du profil des vitesses	61
Figure 6.4	Répartition des forces aérodynamiques par élément	62
Figure 6.5	Coefficient de pression	63
Figure 6.6	Visualisation de la contrainte pariétale	64
Figure 6.7	Visualisation du critère Q	65

Figure 6.8	Graphique du coefficient de portance CLA	66
Figure 6.9	Graphique du coefficient de trainée CDA	66
Figure 6.10	Graphique de la balance aérodynamique	67
Figure 6.11	Aeromap effectuée en simulation	68
Figure 6.12	Erreurs entre la simulation et les essais en piste	69
Figure 6.13	Flux incident sur l'aileron arrière	70
Figure 6.14	Circulation des flux autour des ailerons latéraux	70
Figure 6.15	Visualisation du décrochage sur le montant de l'aileron	71
Figure 6.16	Visualisation de la recirculation sur la jupe	71
Figure 7.1	Convention décrivant les modes d'un objet	74
Figure 7.2	Comparaison du temps passé en virage et en ligne droite sur différents circuits	75
Figure 7.3	Étude de la sensibilité aérodynamique avec un mouvement de lacet	76
Figure 7.4	Étude de la sensibilité aérodynamique avec un mouvement de lacet	77
Figure 7.5	Modèle complet de la voiture de course MANIC24	78
Figure 7.6	Définition des grandeurs utiles au calcul des vitesses angulaires des roues	80
Figure 7.7	Systèmes de coordonnées propres aux roues	82
Figure 7.8	Détail des conditions aux limites du domaine en virage	84
Figure 7.9	Espace de raffinement en virage	85
Figure 8.1	Longueurs utiles au calcul de l'AB-Y	88
Figure 8.2	Visualisation de l'effet de sillage	89
Figure 8.3	Tableau Récapitulatif des valeurs obtenues	90
Figure 8.4	Influence de la simulation sur le CLA	91
Figure 8.5	Influence de la simulation sur le CDA	92

Figure 8.6	Influence de la simulation sur le CDA	92
Figure 8.7	Différences dans les profils des vitesses en virage - latéral	93
Figure 8.8	Différences dans les profils des vitesses en virage - frontal	94
Figure 8.9	Répartition du CLA par élément	95
Figure 8.10	Répartition du CDA par élément	96
Figure 8.11	Pondérance des côtés par coefficient	97
Figure 8.12	Coordonnées du centre des pressions	98

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ÉTS	École de Technologie Supérieure
SAE	Society of Automotive Engineers
FSAE	Formula SAE
CFD	Computational Fluid Dynamics
MFN	Mécanique des Fluides Numériques
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
DES	Detached Eddy Simulation
LES	Large Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
CG	Centre de Gravité
WB	WheelBase - Empattement
S.A.	Spalart-Allmaras
SST	ShearStress Transport
EVM	Eddy Viscosity Model
RSM	Reynolds Stress Model
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy
AMG	Algebraic Multi-Grid
RRF	Rotating Reference Frame

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

F_z	Appui aérodynamique
ρ	Masse volumique du fluide
V	Vitesse relative du fluide
u	Vitesse absolue du fluide
A	Surface de référence de l'objet étudié
C_z	Coefficient de portance
D	Trainée aérodynamique
C_D	Coefficient de trainée totale
$C_{D_{parasite}}$	Coefficient de trainée parasite
$C_{D_{induite}}$	Coefficient de trainée induite
F_y	Force de dérive
C_γ	Coefficient de tangage
C_{LA}	Coefficient de portance par unité d'aire
C_{DA}	Coefficient de trainée par unité d'aire
C_{SA}	Coefficient de tangage par unité d'aire
F_A	Finesse aérodynamique
g	Accélération liée à la pesanteur
z	Altitude
τ, τ_{ij}	Contrainte visqueuse
p	Pression
τ_p, τ_w	Contrainte ou Cisaillement pariétal
∇	Opérateur Nabla
S	Tenseur des taux/vitesses de déformation
μ	Viscosité dynamique
μ_t	Diffusivité turbulente (Eddy Viscosity)

R_e	Nombre de Reynolds
$\bar{\sigma}^t$	Tenseur des contraintes turbulentes moyennes
δ_{ij}	Symbole de Kronecker
\bar{k}	Énergie cinétique moyenne du champ turbulent
l	Longueur caractéristique
P_v	Production de viscosité turbulente
D_v	Destruction de viscosité turbulente
P_k	Génération d'énergie cinétique turbulente
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$	Constantes de Prandtl
Γ_k	Diffusivité effective de k
Γ_ω	Diffusivité effective de ω
Y_k	Dissipation effective de k par turbulence
Y_ω	Dissipation effective de ω par turbulence
G_k, G_ω	Génération / Dissipation d'énergie turbulente
u_τ	Vitesse de friction à la paroi
δ_τ	Distance de friction à la paroi
C_f	Coefficient de frottement à la paroi
U^+	Vitesse adimensionnelle
y^+	Paramètre d'épaisseur de la paroi adimensionnelle
$\%F_z$	Balance aérodynamique
CFL	Nombre de Courant
α	Facteur de relaxation
δ	Épaisseur de la couche limite
Δy	Hauteur de la première cellule à la paroi
r	Facteur d'étirement
C_p	Coefficient de Pression
p_∞	Pression atmosphérique

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Contexte

Le club d'ingénierie de la Formule ETS basé à l'École de technologie supérieure (ÉTS) se distingue par sa longue tradition dans la conception et la construction de véhicules, avec une transition réussie vers la propulsion électrique au cours des quatre dernières années. La saison 2023 a été couronnée de succès avec plusieurs compétitions à l'international, aux États-Unis, au Canada et en Europe, remportant même la première place à la compétition majeure du Michigan l'année dernière parmi 69 équipes. L'engagement envers l'excellence s'est également illustré lors de compétitions en Hongrie, en Allemagne et en Croatie, où nous avons décroché la deuxième place face à 36 équipes. Le club de la Formule ETS réunit des étudiants en ingénierie qui mettent en pratique leurs connaissances universitaires en concevant et en optimisant une voiture de course monoplace pour les compétitions de la Formule SAE et de la Formula Student.

Dans le cadre des essais dynamiques imposés aux véhicules de Formule SAE en compétition, plusieurs épreuves sont prévues, chacune visant à évaluer différents aspects de la performance des prototypes. Ces épreuves comprennent :

- **Une Accélération** en ligne droite d'une distance de 75 mètres pour mesurer l'accélération longitudinale maximale de la voiture.
- **Un "Skidpad"**, où le véhicule doit réaliser 2 tours à droite puis 2 tours à gauche. Le but de cet épreuve est de mesurer l'accélération latérale maximale de la voiture ainsi que sa vitesse de passage en virage.
- **Un "Autocross"**, qui consiste en un tour de circuit comprenant des virages serrés, des chicane et des sections droites, mettant ainsi en avant la manœuvrabilité et l'agilité du véhicule dans des conditions de conduite variées.
- **Une Endurance**, où le prototype doit parcourir une distance de 22 kilomètres sur un circuit adapté, testant ainsi sa fiabilité, sa durabilité et sa capacité à maintenir des performances constantes sur une longue distance.

Ces épreuves diverses et exigeantes permettent aux équipes de Formule SAE de mettre à l'épreuve leurs véhicules dans des conditions variées et réalistes, évaluant ainsi leur performance globale et leur conformité aux exigences de la compétition.



Figure 1.1 Formule ETS victoire seconde place générale en Croatie

1.2 Domaine du problème

La simulation CFD en condition de ligne droite pour une Formule SAE telle que MANIC24 revêt une importance capitale dans l'amélioration de ses performances aérodynamiques.

En analysant les interactions entre le véhicule et l'écoulement d'air, y compris des aspects tels que la résistance à l'air, la portance et la turbulence, elle permet d'identifier les faiblesses et les opportunités d'optimisation et de conception.

Grâce à une meilleure compréhension de ces phénomènes, il devient possible d'affiner la conception pour maximiser l'efficacité aérodynamique de la voiture FSAE, renforçant ainsi sa compétitivité sur la piste.

1.3 Approche générale

Ce rapport se concentre sur l'exploration et l'amélioration de la performance des voitures de course Formule SAE, en mettant en lumière leur comportement spécifique en ligne droite. La première section examine en détail l'aérodynamique d'un véhicules de course, analysant les forces aérodynamiques telles que l'appui, la traînée et la force de dérive, ainsi que les concepts fondamentaux de la mécanique des fluides, tels que l'équation de Bernoulli, l'effet Venturi, et les approches statistiques de la turbulence.

Le chapitre suivant aborde la dynamique d'un véhicule de course SAE, en détaillant leur comportement dynamique et en analysant la distribution et la balance des forces aérodynamiques sur ce type de véhicule.

Par la suite, une base de données expérimentale en ligne droite sera fournie, détaillant les tests effectués, les observations aérodynamiques et les résultats obtenus. La méthodologie de simulation est ensuite exposée, incluant les caractéristiques géométriques du modèle, le choix des équations, la spécification des conditions aux limites, les paramètres physiques, et la stratégie de maillage.

S'en suivra une analyse détaillée des résultats de ces simulations en ligne droite, avec une interprétation des données et des comparaisons avec les essais physiques effectués pour garantir la fiabilité de notre modèle.

Finalement, et l'objectif principal de ces travaux, l'aérodynamique externe de ce prototype de FSAE sera analysée dans un cadre différent de la ligne droite précédente, à savoir un contexte de virage. Pour ceci seront détaillées les étapes et les spécificités de la création d'un modèle tournant adapté à cette étude avant d'étudier et de conclure sur les résultats fournis par ces calculs numériques.

CHAPITRE 2

AÉRODYNAMIQUE D'UN VÉHICULE DE FORMULE SAE

Dans ce chapitre, les notions fondamentales de la mécanique des fluides agissant sur le véhicule, telles que l'appui, la traînée et la force de dérive, ainsi que les bases essentielles de la dynamique des fluides seront présentées.

2.1 Forces aérodynamiques

Dans le domaine de l'ingénierie automobile, la mécanique des fluides joue un rôle crucial, en particulier en ce qui concerne trois phénomènes essentiels : l'appui aérodynamique, la traînée et la force de dérive. Ces concepts sont intimement liés au comportement des véhicules en mouvement à travers l'air et sont des éléments clés dans la conception et l'optimisation des voitures modernes. Ces forces agissent au niveau du point de pression, déterminant ainsi le comportement global de la voiture.

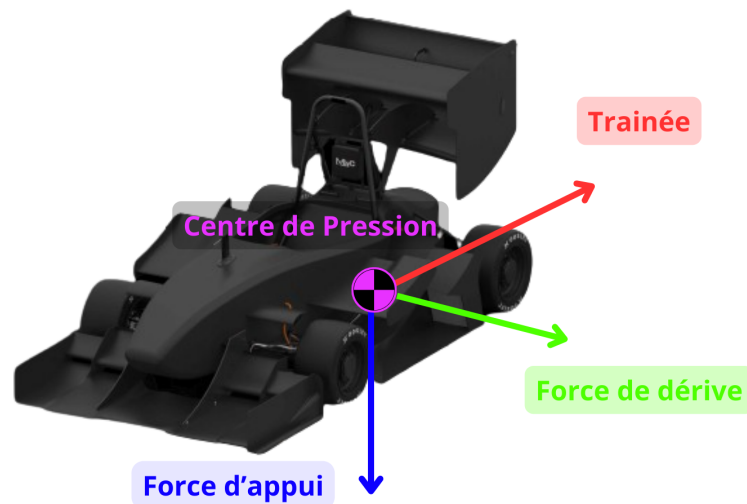


Figure 2.1 Bilan des forces agissant sur une voiture

2.1.1 Appui aérodynamique

L'**appui aérodynamique**, parfois désigné sous le terme de "force d'appui" ou "downforce", est la force verticale opposée à la portance. Cette force est cruciale pour améliorer l'adhérence des pneus au sol, en particulier à des vitesses élevées, ce qui permet une meilleure tenue de route et une maniabilité accrue. Pour générer de l'appui aérodynamique, les concepteurs automobiles manipulent l'écoulement d'air autour du véhicule en utilisant diverses techniques telles que la forme de la carrosserie, les ailerons, les becs et les diffuseurs. Ces dispositifs modifient la pression de l'air pour créer une force descendante qui appuie le véhicule sur la route grâce aux différences de pression entre le dessus et le dessous de la voiture. La formule de l'appui aérodynamique F_z en newtons (N), s'écrit :

$$F_z = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_z \quad (2.1)$$

avec :

- ρ : masse volumique du fluide en kg/m^3
- V : vitesse en m/s
- A : surface de référence en m^2
- C_z : coefficient de portance (nombre sans dimension) qui dépend de la forme de l'aile

Notons, C_z peut être :

- **positif** : dans le cas de la force de portance
- **négatif** : dans le cas de la force d'appui

2.1.2 Traînée aérodynamique

D'un autre côté, la **traînée aérodynamique** représente la résistance à l'air rencontrée par un véhicule en mouvement. La trainée est la somme de deux types de trainée :

1. **La traînée parasite** : elle comprend la traînée de frottement due au contact de l'air avec la surface de l'objet en mouvement, ainsi que la traînée de forme, résultant de la résistance de l'air à contourner la forme de l'objet.

2. **La traînée induite** : elle se produit lorsque des ailes produisent de la portance, créant ainsi une différence de pression entre le dessus et le dessous de l'aile. Cette différence de pression entraîne la création de tourbillons d'air à l'extrémité des ailes, générant une traînée supplémentaire.

Dans tous les cas, réduire la traînée aérodynamique est cruciale pour améliorer l'efficacité énergétique des véhicules et réduire la consommation de carburant tout en augmentant sa vitesse terminale. Pour y parvenir, les ingénieurs utilisent des techniques visant à minimiser la résistance à l'air, telles que des générateurs de vortexes ou encore des systèmes de réduction de traînée (DRS).

La formule de la traînée aérodynamique F_z en newtons (N), s'écrit :

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D \quad (2.2)$$

avec :

- $C_D = C_{D_{parasite}} + C_{D_{induite}}$: coefficient de traînée totale

2.1.3 Coefficients aérodynamiques

Les coefficients aérodynamiques sont des mesures clés utilisées pour comprendre comment les véhicules se comportent dans l'air en mouvement. Ils aident à évaluer la performance aérodynamique dans différentes situations et guident la conception des véhicules pour optimiser leur efficacité. Cela simplifie la comparaison des différentes conceptions et clarifie les forces en jeu pour les utiliser dans d'autres analyses de performance.

Parmi ceux-ci, nous retrouvons les coefficients de portance et de traînée précédemment cités, auxquels on multiplie la surface du véhicule :

- $C_{LA} = C_L * A$
- $C_{DA} = C_D * A$

2.1.4 Finesse

Une compréhension approfondie de l'appui aérodynamique et de la traînée est donc essentielle pour les ingénieurs automobiles, car elle leur permet de concevoir des véhicules qui répondent aux exigences spécifiques en matière de performances, de sécurité et d'efficacité énergétique. La combinaison de ces deux forces crée un rapport, que l'on appelle la **Finesse Aerodynamique** :

$$f_A = \frac{C_{LA}}{C_{DA}} \quad (2.3)$$

2.2 Equation de Bernoulli

L'équation de Bernoulli, due aux travaux du physicien suisse Daniel Bernoulli, est une formule clé en mécanique des fluides. Elle exprime la conservation de l'énergie le long d'un écoulement de fluide sans viscosité et en écoulement laminaire. Cette équation est cruciale dans de nombreux domaines de l'ingénierie, notamment en compétition automobile, car elle permet de donner une idée qualitative des phénomènes réels. Elle s'applique particulièrement à des fluides incompressibles et fournit :

$$\frac{V^2}{2} + g z + \frac{p}{\rho} = \text{constante} \quad (2.4)$$

où :

- V : la vitesse relative du fluide (en m/s)
- g : l'accélération gravitationnelle (en m/s²)
- z : l'altitude de la particule étudiée (en m)
- p : la pression (en Pa)
- ρ : la masse volumique du fluide (en kg/m³)

L'équation de Bernoulli énonce que la somme de la pression statique, de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle d'un fluide reste constante le long d'une ligne de courant.

En compétition automobile, cette équation revêt une importance fondamentale. Elle est utilisée pour comprendre les flux d'air autour et à travers les voitures de course, ce qui permet aux ingénieurs de concevoir des profils aérodynamiques et des systèmes de refroidissement plus efficaces. En analysant les variations de pression et de vitesse de l'air, l'optimisation de l'appui aérodynamique et la minimisation de la traînée sont réalisées, tout en maintenant les températures du moteur à des niveaux optimaux pour garantir des performances fiables.

2.3 Effet Venturi et effet de Sol

L'effet Venturi, ou effet de sol en sports mécaniques, un principe fondamental en aérodynamique, est crucial dans la conception des fonds plats en Formule SAE, permettant d'optimiser l'appui aérodynamique et la stabilité des voitures de course. Ce phénomène, nommé d'après le physicien italien Giovanni Battista Venturi, repose sur les principes de la mécanique des fluides, en particulier sur l'équation de Bernoulli. Dans le contexte de la course automobile, les fonds plats sont des surfaces plates situées sous le châssis des voitures, conçues pour canaliser l'air et générer de l'appui aérodynamique. L'effet Venturi se produit lorsque l'air est dirigé à travers la section rétrécie des fonds plats, accélérant ainsi son écoulement conformément à l'équation de Bernoulli. Cette accélération de l'air induit une baisse de la pression statique, créant une zone de basse pression sous la voiture. Cette diminution de pression, combinée à l'augmentation de pression naturelle sur la partie supérieure de la voiture, génère une force d'aspiration qui maintient, ainsi, la voiture au sol.

En Formule SAE, les équipes de conception exploitent cet effet en ajustant soigneusement la géométrie des fonds plats pour maximiser la génération d'appui aérodynamique tout en réduisant la traînée.

2.4 Approche statistique de la turbulence

2.4.1 Equations de Navier-Stokes

L'application de la seconde loi de Newton à un volume élémentaire de fluide permet d'obtenir l'équation de Navier-Stokes :

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = \underbrace{-\widetilde{\nabla p}}_{\text{forces de pression}} + \underbrace{-\widetilde{\rho \mathbf{g}}}_{\text{forces de pesanteur}} + \underbrace{-\widetilde{\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}}}_{\text{forces de viscosité}} \quad (2.5)$$

où $\boldsymbol{\tau}$ est le tenseur des contraintes visqueuses. Pour un fluide newtonien, le tenseur des contraintes visqueuses est donné par :

$$\boldsymbol{\tau} = 2\mu \mathbf{S} - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \quad (2.6)$$

où μ est la viscosité dynamique du fluide ($\text{Pa.s} \equiv \text{kg/ms}$) et $\mathbf{S} = \frac{1}{2}(\nabla \mathbf{u}^t + \nabla \mathbf{u})$ est le tenseur des taux de déformation, ou des vitesses de déformation. En incompressible, $\boldsymbol{\tau} = 2\mu \mathbf{S}$ (et $\nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = \mu \nabla^2 \mathbf{u}$ dans l'équation de Navier-Stokes), soit :

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.7)$$

Dans le cadre de ce projet μ est considéré constant. Les propriétés du fluide (ρ, μ) étant constantes, les phénomènes dynamiques et thermiques sont alors découplés. Il n'est donc pas nécessaire d'utiliser la loi de conservation de l'énergie pour étudier ces écoulements.

2.4.2 Décomposition de Reynolds

La turbulence est la forme d'écoulement prédominante dans la nature et en ingénierie. Elle se caractérise par sa forme chaotique et irrégulière. Sa nature imprévisible rend impossible la

prédiction déterministe de ses caractéristiques, nécessitant ainsi des prédictions statistiques. Il existe plusieurs approches pour modéliser la turbulence. Les principales sont : les équations de Navier-Stokes moyennées (RANS), l'approche des tourbillons détachés (DES), la simulation des grandes échelles (LES), et la simulation numérique directe (DNS). Dans ce projet, l'approche moyennée de Reynolds sera adoptée pour son efficacité, sa documentation et sa simplicité de mise en pratique.

Afin d'obtenir les équations de bilan des grandeurs moyennes, on décompose d'abord les grandeurs instantanées de l'écoulement selon la règle de Reynolds :

$$u_i = \bar{U}_i + u'_i \quad p = \bar{P} + p' \quad \tau_{ij} = \bar{\tau}_{ij} + \tau'_{ij}$$

- En introduisant ces décompositions dans les équations de bilan dont on prend ensuite la moyenne. Pour la conservation de la masse :

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{U}_i + u'_i) = 0 \quad (2.8)$$

- En appliquant l'opérateur moyenne et en soustrayant à l'équation précédente :

$$\boxed{\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0} \quad \boxed{\frac{\partial u'_i}{\partial x_i} = 0} \quad (2.9)$$

Les champs de vitesse moyens et fluctuants sont incompressibles.

Équation de Navier-Stokes moyennée

La forme conservative de l'équation de Navier-Stokes s'écrit, pour la composante i , en utilisant la relation d'incompressibilité $\partial u_j / \partial x_j = 0$:

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.10)$$

En introduisant les décompositions des composantes de vitesse et de la pression, l'équation devient :

$$\rho \left(\frac{\partial (\bar{U}_i + u'_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{U}_i + u'_i) (\bar{U}_j + u'_j)}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial (\bar{P} + p')}{\partial x_i} + \frac{\partial (\bar{\tau}_{ij} + \tau'_{ij})}{\partial x_j} \quad (2.11)$$

L'opérateur moyenne est appliqué et finalement :

$$\left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.12)$$

Cette forme porte le nom d'équation de Reynolds ($i = 1, 2$ ou 3). L'équation 2.12 peut s'écrire sous cette forme :

$$\boxed{\rho \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\tau}_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right)} \quad (2.13)$$

où $\overline{\rho u'_i u'_j}$ est analogue à une contrainte supplémentaire issue de l'agitation turbulente. Ce terme est appelé contrainte (ou tenseur) de Reynolds.

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = \rho \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

Le tenseur de Reynolds peut encore s'écrire :

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) = \rho \frac{D \bar{U}_i}{Dt} = \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}^t}{\partial x_j} \quad \text{ou} \quad \rho \frac{D \bar{\mathbf{U}}}{Dt} = \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\sigma}}^t \quad (2.15)$$

$\bar{\sigma}^t$ est le tenseur des contraintes turbulentes moyennes :

$$\bar{\sigma}_{ij}^t = \underbrace{-\bar{P}\delta_{ij} + \bar{\tau}_{ij}}_{\text{contrainte pour un écoulement moyen newtonien}} - \underbrace{\rho \overline{u'_i u'_j}}_{\text{contrainte de turbulence}} \quad (2.16)$$

Les composantes diagonales $\rho \overline{u_i'^2}$ sont parfois appelées «contraintes normales» et les composantes extra-diagonales $\rho \overline{u'_i u'_j}$ «contraintes de cisaillement».

En algèbre linéaire, un système d'équations linéaires peut être résolu de manière unique si et seulement si le nombre d'équations est égal au nombre d'inconnues. En régime laminaire, il y a 4 équations (conservation de la masse et de la quantité de mouvement pour $i = 1, 2$ et 3) pour **4 inconnues** ($u_{i=1,2,3}$ et p). Une solution existe.

En revanche, en régime turbulent, il y a 4 équations pour le mouvement moyen pour **10 inconnues**, les 6 termes supplémentaires $\overline{u'_i u'_j}$ venant s'ajouter aux variables habituelles ($\bar{U}_{i=1,2,3}$ et \bar{P}).

Il s'agit ici du **problème de fermeture des équations** (Closure Problem, en anglais) (Wilcox, 1998 ; Pope, 2000)). Il existe deux façons de résoudre ce problème de fermeture :

- Modéliser $\overline{u'_i u'_j}$ en utilisant des hypothèses semi-empiriques (BOUSSINESQ)
- Ajouter des équations de la forme $\overline{u'_i u'_j}$

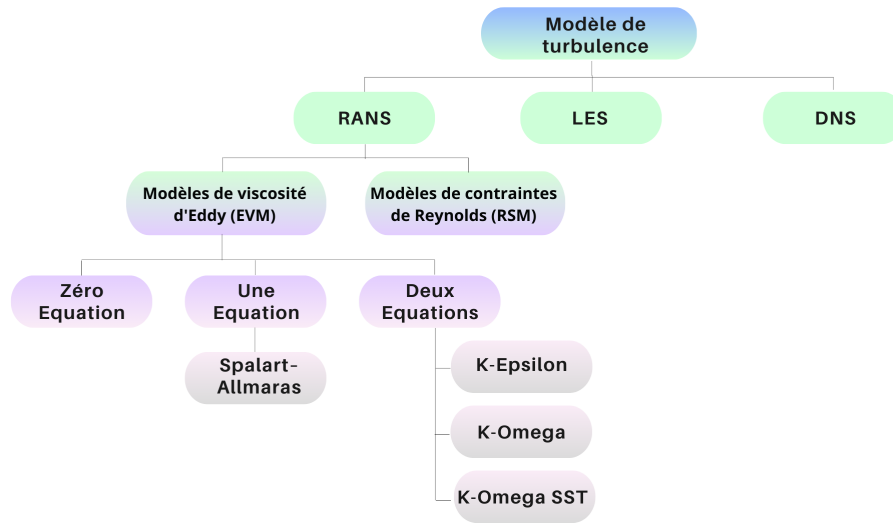


Figure 2.2 Différents modèles de turbulence

2.4.3 Approximation de Boussinesq

La plupart des modèles RANS supposent que la turbulence est un phénomène isotrope qui dépend linéairement du tenseur des contraintes visqueuses (Schmitt, 2007). Cela signifie que les caractéristiques de la turbulence, telles que la vitesse ou la dissipation d'énergie turbulente, sont uniformes dans toutes les directions et que les effets de la turbulence sont supposés être proportionnels aux contraintes visqueuses présentes dans le fluide.

De façon similaire à l'expression des contraintes visqueuses, $\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right)$. Boussinesq a donc proposé d'écrire les tensions de Reynolds sous la forme suivante :

$$\overline{\rho u'v'} = -\mu_t \frac{\partial \bar{U}}{\partial y} \quad (2.17)$$

μ_t est la viscosité dynamique turbulente (ou diffusivité turbulente) appelée «eddy viscosity» en anglais.

En généralisant :

$$\rho \overline{u'_i u'_j} = -\mu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \underbrace{\frac{2}{3} \rho \bar{k} \delta_{ij}}_{(A)} \quad (2.18)$$

où \bar{k} est l'énergie cinétique moyenne du champ turbulent par unité de masse, appelée de façon plus concise l'énergie cinétique turbulente :

$$\bar{k} = \frac{1}{2} \overline{u'_k u'_k} = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (2.19)$$

et δ_{ij} le symbole de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$ si $i = j$ et $\delta_{ij} = 0$ si $i \neq j$). Le terme isotrope (A) est nécessaire, afin de ne pas avoir $\rho \bar{k} = \rho \overline{u'_i u'_i} / 2 \equiv 0$. La viscosité est a priori une fonction locale de l'écoulement $\mu_T \equiv \mu_T(\vec{x}, t)$ contrairement à la viscosité moléculaire qui est une propriété du fluide.

Ce concept peut sembler très contradictoire, la turbulence, en tant que phénomène caractérisé par des tourbillons chaotiques et des mouvements irréguliers, est souvent associée à des mécanismes non-visqueux, tels que l'instabilité hydrodynamique et la cascade d'énergie. Par ailleurs, il n'y a initialement aucune raison de penser que les contraintes du tenseur de Reynolds varient en fonction du gradient de l'écoulement moyen.

2.4.4 Modèles à une et deux équations

Les modèles à une et deux équations sont similaires dans le sens où ils modélisent l'hypothèse de Boussinesq concernant la viscosité turbulente à partir d'une équation pour l'énergie cinétique turbulente. La viscosité turbulente, inconnue de prime abord, doit donc être définie :

$$\mu_T = \rho u_T l \quad (2.20)$$

où u_T et l représentent respectivement une vitesse et une longueur caractéristique de la turbulence locale.

Le but des modèles de turbulence est de calculer ces deux échelles de la turbulence pour mieux estimer la valeur de μ_T . Plus le modèle de turbulence est sophistiqué, plus il cherche à se rapprocher de la réalité en prenant en compte les effets de la convection, de la production et de la dissipation de la turbulence tout au long de l'écoulement.

2.4.4.1 Modèle de fermeture de Spalart et Allmaras

Le modèle de fermeture de Spalart-Allmaras est largement utilisé en mécanique des fluides numérique pour prédire les écoulements turbulents. Il est basé sur une seule équation de transport pour prédire la variable de turbulence $\tilde{\nu}$, qui est une estimation de la viscosité turbulente. Ce modèle a été conçu pour être simple et robuste tout en fournissant des résultats pertinents dans une large gamme d'applications. La viscosité turbulente est donnée par la formulation :

$$\mu_T = \rho f_{v1} \tilde{\nu} \quad (2.21)$$

où $\tilde{\nu}$ est obtenue par résolution de son équation de transport :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{\nu} u_j) = P_v + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - D_v \quad (2.22)$$

où P_v représente la production de viscosité turbulente et D_v sa destruction dans les régions proches des parois liée à l'amortissement visqueux. $\sigma_{\tilde{\nu}}$ et C_{b2} sont des constantes, et μ est la viscosité dynamique.

2.4.4.2 Modèle de fermeture k- ϵ

Le modèle de fermeture $k\epsilon$ est l'un des modèles les plus utilisés dans le monde industriel. La viscosité turbulente est donnée par l'expression :

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{\bar{k}^2}{\bar{\epsilon}} \quad (2.23)$$

et est donc écrite par combinaison de l'énergie cinétique turbulente et du taux de dissipation :

$$\bar{\epsilon} = \nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}} \quad (2.24)$$

Pour estimer l'énergie cinétique turbulente et le taux de dissipation, nous pouvons utiliser leurs équations de transport respectives. L'équation de transport exacte du taux de dissipation est très complexe, ce qui rend son analyse directe difficile, même lorsque certains termes sont négligés pour simplifier le problème.

Une stratégie alternative consiste à utiliser l'équation de transport de l'énergie cinétique turbulente comme guide. En construisant une équation de transport du taux de dissipation basée sur une analogie avec l'équation de l'énergie cinétique turbulente, nous pouvons obtenir une formulation plus accessible du taux de dissipation.

Pour ce faire, nous introduisons des termes de convection, de diffusion, de production, similaires à ceux présents dans l'équation de l'énergie cinétique turbulente. Ces termes représentent les mécanismes physiques qui contribuent au transport et à la modification du taux de dissipation turbulente le long de l'écoulement.

On obtient finalement les équations suivantes, pour \bar{k} et $\bar{\epsilon}$:

$$\frac{\partial(\rho\bar{k})}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial(\rho\bar{k})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho\bar{\epsilon} \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{\epsilon})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \bar{\epsilon})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_e} \right) \frac{\partial \bar{\epsilon}}{\partial x_j} \right] + \frac{\bar{\epsilon}}{k} (C_{1e} P_k - C_{2e} \rho \bar{\epsilon}) \quad (2.26)$$

avec P_k caractérise la génération d'énergie cinétique turbulente issue de gradient de vitesse moyenne, et des effets de la pesanteur. C_{1e} , C_{2e} sont des constantes. σ_k et σ_e sont appelées nombre de Prandtl, respectivement pour k et ϵ .

Le modèle $k - \varepsilon$ est largement utilisé pour simuler les écoulements turbulents. Cependant, à mesure que l'on se rapproche des parois solides, la dynamique de l'écoulement change. La turbulence est significativement amortie par l'interaction avec la paroi, ce qui signifie que les caractéristiques de l'écoulement deviennent différentes de celles dans les régions où la turbulence est dominante. Dans ces zones, le modèle $k - \varepsilon$ standard perd en précision et peut ne plus être assez efficace pour une application considérée.

Une alternative à l'utilisation directe des lois de paroi consiste à modifier les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente et du taux de dissipation turbulente pour inclure un facteur d'amortissement. Ce facteur d'amortissement est conçu pour représenter l'atténuation de la turbulence due à la proximité des parois solides.

2.4.4.3 Modèle de fermeture $k-\omega$

Ce modèle repose sur deux quantités importantes : l'énergie cinétique turbulente, représentée par k , qui mesure l'énergie contenue dans les mouvements turbulents à différentes échelles spatiales, et le taux de dissipation turbulente, représenté par ϵ , qui mesure la quantité d'énergie dissipée par unité de temps dans les tourbillons turbulents.

Dans ce modèle, on suppose que les grandes échelles de turbulence sont déterminées par le taux de dissipation et l'énergie cinétique turbulente. Ainsi, le rapport $\omega = \epsilon/k$ sert d'échelle caractéristique des grands tourbillons. Il représente la fréquence à laquelle l'énergie cinétique turbulente est dissipée dans le système.

De plus, ce modèle suppose une relation linéaire entre la viscosité turbulente et le cisaillement du champ moyen :

$$\mu_T = \alpha \frac{\rho k}{\omega} \quad (2.27)$$

où α est un coefficient permettant de diminuer l'influence de la viscosité turbulente. Les équations de transport pour k et ω sont respectivement :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k \quad (2.28)$$

et

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega \quad (2.29)$$

Dans ces deux équations de transport, G représente la génération d'énergie cinétique turbulente ou de la dissipation effective, selon l'indice utilisé, due au gradient de vitesse moyenne. Γ_k et Γ_ω représentent la diffusivité effective de k et ω , respectivement. Y_k et Y_ω représentent la dissipation de k et ω par la turbulence.

2.4.4.4 Modèle de fermeture k- ω SST

Afin d'utiliser les avantages du modèle $k - \epsilon$ pour l'écoulement principal et ceux du modèle $k - \omega$ pour les régions de paroi, il existe un modèle hybride : $k - \omega$ SST. L'avantage est de ne pas nécessiter de fonction d'amortissement du modèle $k - \epsilon$. D'un autre côté, l'approche $k - \epsilon$ est également utilisée pour les autres parties de l'écoulement où la viscosité n'a pas autant d'impact. On peut écrire :

$$\epsilon = C_\mu \omega k \quad (2.30)$$

que l'on peut insérer dans l'équation de transport du taux de dissipation du modèle $k - \epsilon$:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + 2 \frac{\rho \sigma \omega^2}{\omega} \nabla k : \nabla \omega \quad (2.31)$$

On note que les équations sont identiques à l'exception du dernier terme :

$$2 \frac{\rho \sigma \omega^2}{\omega} \nabla k : \nabla \omega \quad (2.32)$$

On modifie l'équation en introduisant une fonction F_1 telle que :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma \omega^2}{\omega} \nabla k : \nabla \omega \quad (2.33)$$

Ainsi, cette fonction F_1 agit comme un interrupteur, contrôlant la transition entre les deux modèles en fonction de la distance à la paroi. Lorsque F_1 est égal à 0, le modèle $k - \epsilon$ est utilisé, tandis que lorsque F_1 est égal à 1, le modèle $k - \omega$ est employé. Pour des valeurs de F_1 comprises entre 0 et 1, une combinaison des deux modèles est appliquée. Grâce à cette approche, il n'est plus nécessaire d'utiliser une fonction d'amortissement pour tenir compte de l'influence de la paroi, car la transition entre les modèles se fait de manière naturelle et progressive en fonction de la distance à la paroi.

2.4.5 Ecoulement turbulent de paroi

Près de la paroi, la diffusion visqueuse prédomine, ce qui signifie que les effets visqueux jouent un rôle majeur dans la dynamique de l'écoulement. Les simulations numériques nécessitent souvent des maillages très fins près des parois pour capturer ces interactions de manière précise. Cela peut être très coûteux en termes de ressources informatiques. C'est pour cela que la Loi des Parois propose une solution à ce problème en divisant le domaine de simulation en deux zones distinctes : la zone proche des parois et le reste du domaine. Une question subsiste : comment déterminer la distance de raccordement ?

La "Loi des Parois" identifie trois zones distinctes dans les écoulements près des parois : la sous-couche laminaire, proche de la paroi et où l'écoulement est principalement laminaire ; la couche externe, plus éloignée de la paroi et où la turbulence est dominante, également connue sous le nom de zone de défaut de vitesse ; et enfin, la zone tampon, qui agit comme une transition

entre la sous-couche laminaire et la couche externe turbulente, assurant une liaison entre ces deux régions.

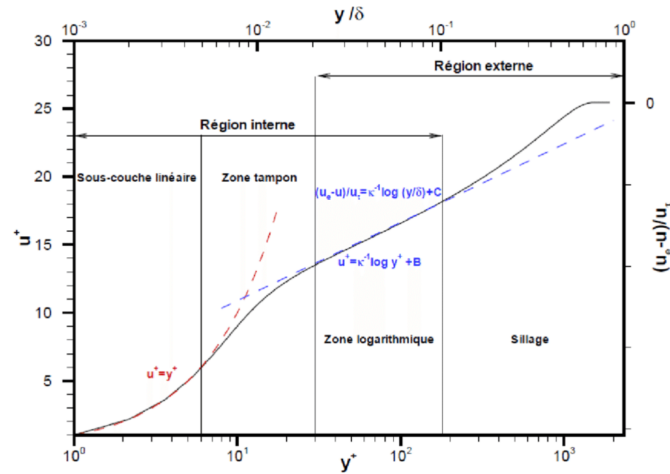


Figure 2.3 Différentes zones de la couche limite turbulente

Dans la première zone interne, il y a deux nouvelles grandeurs caractéristiques. Ces grandeurs serviront à définir des quantités sans dimension : u_τ est la vitesse de friction et δ_τ est une distance.

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad \delta_\tau = \frac{\nu}{u_\tau} \quad (2.34)$$

où τ_w est le cisaillement pariétal :

$$\tau_w = 0.5 C_f \rho U^2 \quad (2.35)$$

Le coefficient de frottement est obtenu grâce à la formule de Prandtl :

$$C_f = 0.074 / Re^{(1/7)} \quad (2.36)$$

On introduit la vitesse adimensionnelle et la distance à la paroi adimensionnelle que l'on note :

$$U^+ = \frac{U}{u_\tau} \quad y^+ = \frac{y}{\delta_\tau} \quad (2.37)$$

Le paramètre de l'épaisseur de paroi adimensionnelle est définie :

$$y^+ = \frac{\Delta y u_\tau}{\nu} \quad (2.38)$$

En supposant que le profil d'un écoulement près d'une paroi solide peut être approximé par celui d'un écoulement turbulent unidimensionnel de Couette, l'équation de conservation de la quantité de mouvement peut être simplifiée comme suit :

$$(\mu + \mu_t) \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_w \quad (2.39)$$

Pour les différentes zones, les équations sont données ci-dessous :

$$\begin{cases} U^+ = y^+ & \text{si } y^+ < 5 \\ U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(E y^+) & \text{si } 30 < y^+ < 200 \end{cases} \quad (2.40)$$

où κ et E sont des coefficients empiriques (0.4187 et 9.793 respectivement).

Ce chapitre a été une plongée approfondie dans les principes fondamentaux de la mécanique des fluides, appliqués au contexte exigeant des véhicules de course Formule SAE. Nous avons exploré en détail les forces aérodynamiques, les concepts clés tels que l'équation de Bernoulli et les effets Venturi et de sol, ainsi que les modèles avancés de turbulence. Après avoir consolidé notre compréhension des bases de l'aérodynamique dans le contexte des véhicules de course Formule SAE, il est nécessaire de porter notre attention sur le comportement dynamique du véhicule pour mieux le modéliser.

CHAPITRE 3

DYNAMIQUE D'UN VÉHICULE DE COURSE FORMULE SAE

Dans ce chapitre, nous plongerons dans les principes fondamentaux de la dynamique des véhicules. Nous explorerons en détail le comportement dynamique d'un véhicule, en analysant la distribution et l'équilibre des forces aérodynamiques.

3.1 Comportement dynamique d'un véhicule

Les différents états de la voiture (accélérations et giration) selon les différents axes peuvent être représentés sur la figure 3.1

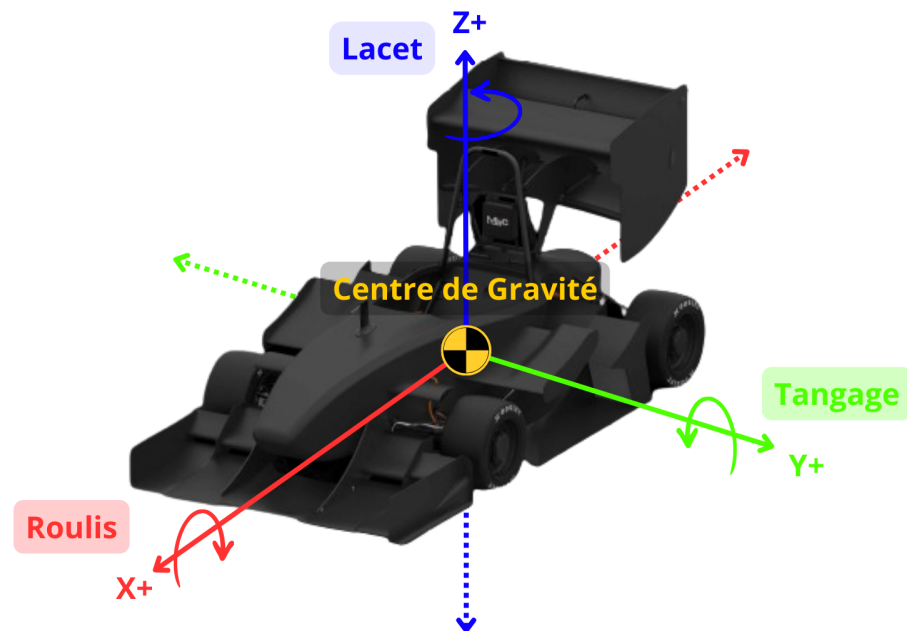


Figure 3.1 Convention utilisée pour décrire les modes du véhicule

La modélisation de la voiture est réalisée à l'aide de diverses équations physiques et selon différentes dimensions critiques.

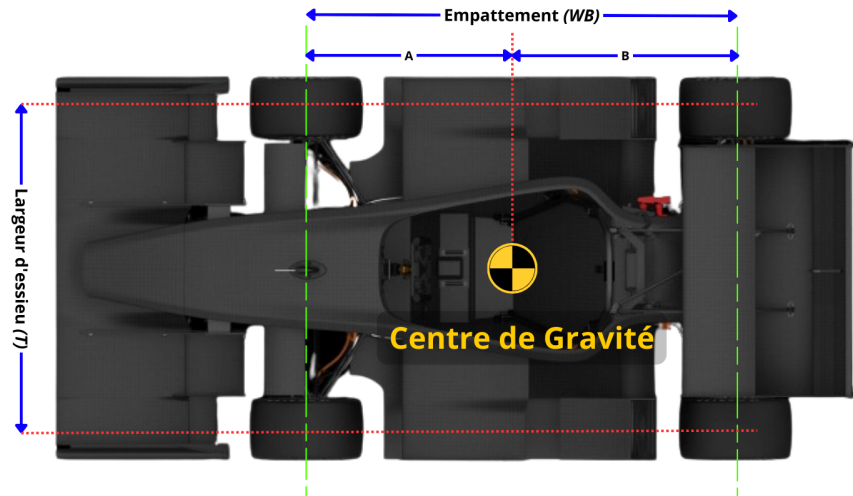


Figure 3.2 Paramètres géométriques de MANIC23

Les principaux paramètres de la voiture sont essentiels pour les différents estimateurs car ils fournissent les données pour modéliser et prédire les performances et le comportement de la voiture dans différentes conditions de conduite.

Paramètres de MANIC23		Valeur	Unité
m	Masse de la voiture avec pilote	241.8	kg
h	Hauteur du centre de gravité (CG Height)	0.2836	m
-	Répartition de masse (Weight Balance)	48.79	% avant
l	Empattement (Wheelbase)	1.530	m
a	Empattement * Répartition de masse (Wheelbase * WeightBalance)	0.7465	m
b	Empattement - A (Wheelbase - A)	0.7835	m
t	Largeur d'essieu (Track)	1.143	m
-	Distribution de la masse latérale (CrossWeight)	50	%Gauche
I_{zz}	Inertie autour de l'axe Z	118	kg* m ²

3.2 Distribution et balance des forces aérodynamiques

La répartition des forces aérodynamiques sur les différentes parties de la voiture, notamment les essieux avant et l'arrière, est cruciale et est connue sous le nom d'aérobalance X. Une répartition équilibrée est importante pour assurer une tenue de route stable et prévisible, en particulier à des vitesses élevées. Cela peut aider à maintenir une adhérence optimale des pneus sur la route, réduire le sous-virage (quand la voiture ne tourne pas suffisamment dans un virage) ou le survirage (quand la voiture tourne trop, en chassant), et améliorer la stabilité directionnelle.

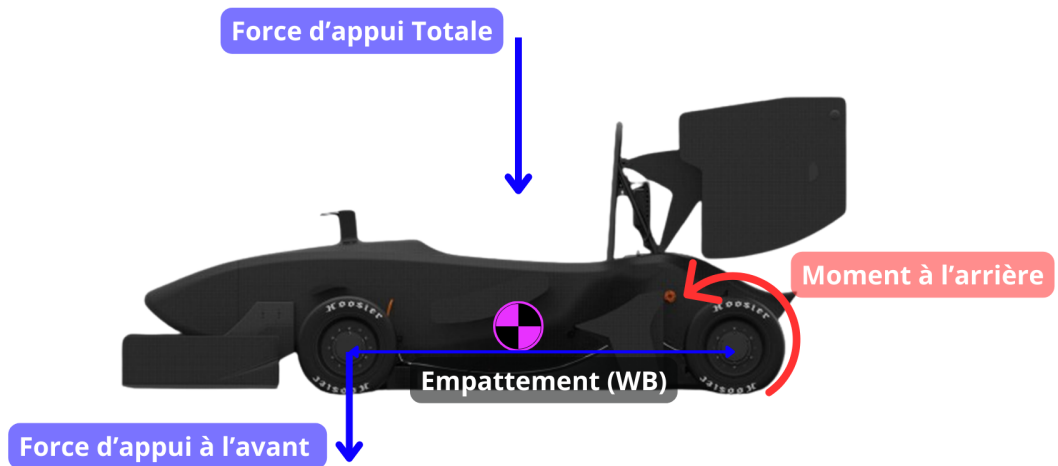


Figure 3.3 Distribution et balance des forces aérodynamiques

Une méthode pour calculer l'équilibre aérodynamique consiste à utiliser un rapport de moment sur l'un des axes de la voiture (dans notre cas, ce sera l'axe de la roue arrière). En utilisant ce rapport et en divisant le moment résultant par l'empattement (WB) de la voiture, on obtient la force exercée sur la roue avant.

$$F_{avant} = \frac{Moment_{arriere}}{Empattement} \quad (3.1)$$

Ainsi, la force résultante sur la roue avant est utilisée pour calculer le pourcentage de la force d'appui exercée sur l'avant de la voiture.

$$\%F_z = \frac{F_{avant}}{F_z} \quad (3.2)$$

L'objectif est d'assurer une distribution équilibrée de l'aérodynamique, avec autant de charge aérodynamique à l'avant qu'à l'arrière.

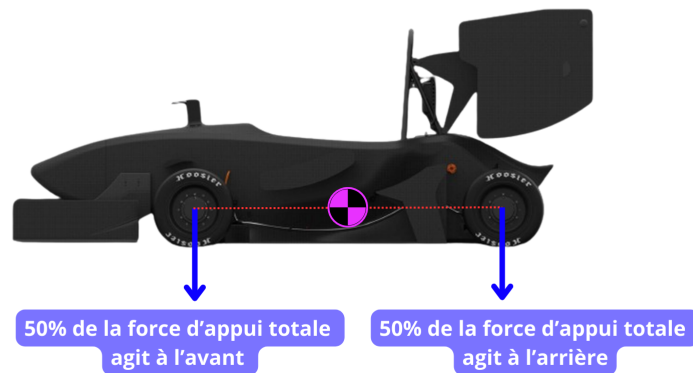


Figure 3.4 Distribution équilibrée de l'aérodynamique

Toutefois, il est fréquent d'observer des répartitions plus orientées vers l'arrière (55%) permettant une plus grande stabilité à haute vitesse

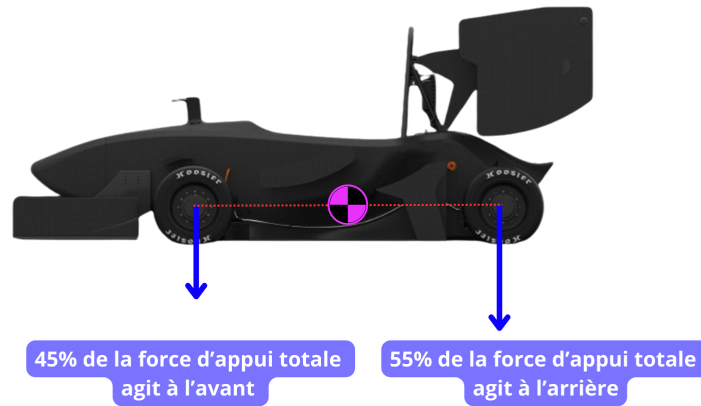


Figure 3.5 Représentation de l'équilibre aérodynamique

3.3 Ensemble aérodynamique véhicule de course : MANIC24

Au sein de l'équipe de la Formule ETS, les améliorations aérodynamiques sont cruciales car celles-ci ont un impact direct sur la vitesse et la stabilité du véhicule. L'objectif est de maximiser l'adhérence tout en maintenant les pneus en contact avec le sol. Cependant, trouver le parfait équilibre entre la portance et la traînée reste un défi permanent.

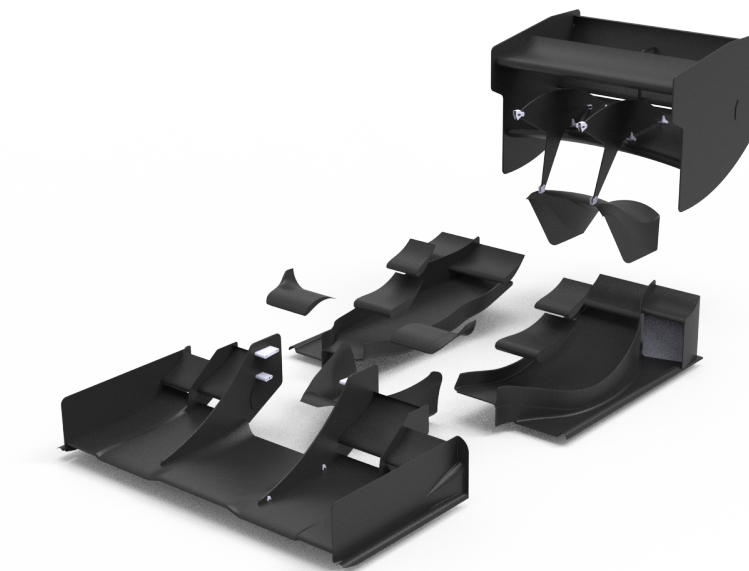


Figure 3.6 Ensemble aérodynamique de MANIC24

L'ensemble aerodynamique de notre véhicule de course MANIC24 se compose des :

- **Ailerons avants**



Figure 3.7 Ailerons avant de MANIC24

- **Ailerons arrières**

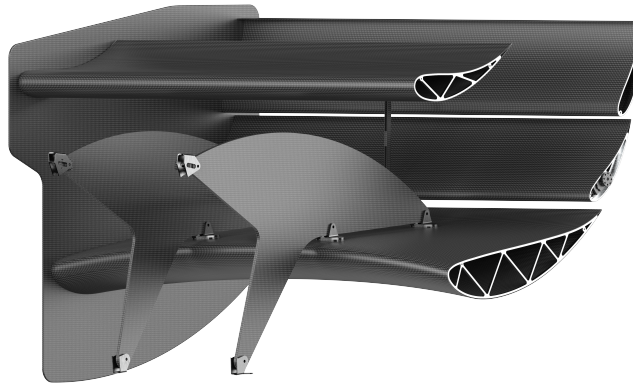


Figure 3.8 Ailerons arrières de MANIC24

- **Systèmes de réduction de traînée**

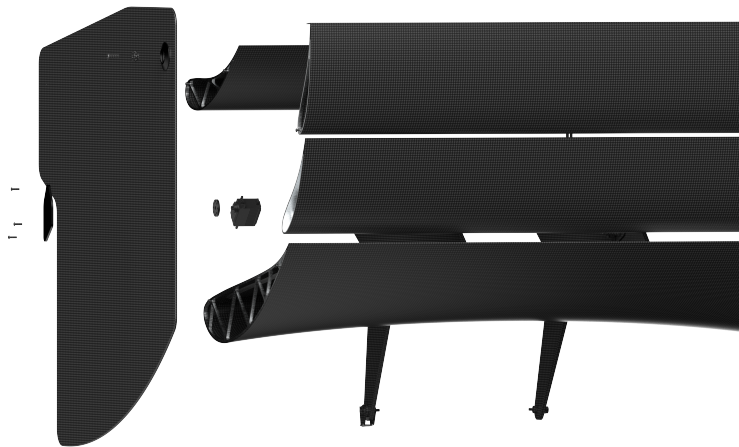


Figure 3.9 Systèmes de réduction de traînée de MANIC24

- **Ailerons latéraux**

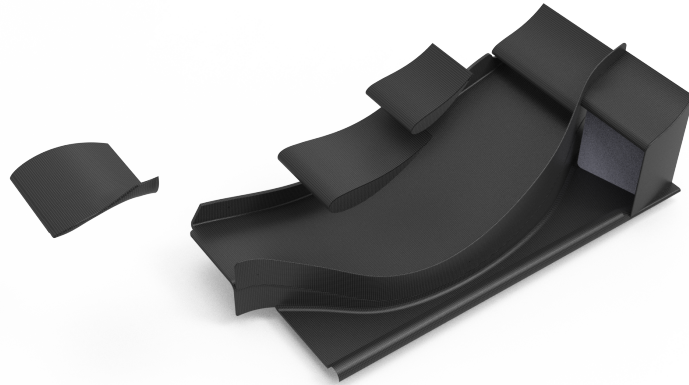


Figure 3.10 Ailerons latéraux de MANIC24

Ce chapitre a été consacré à une analyse approfondie des principes fondamentaux de la dynamique des véhicules, mettant en lumière le comportement dynamique du véhicule par l'analyse de la répartition et de l'équilibre des forces aérodynamiques. Pour faire suite à la présentation en détail l'ensemble aérodynamique du véhicule MANIC24, il est nécessaire d'établir une base de données expérimentale.

CHAPITRE 4

BASE DE DONNÉES EXPÉRIMENTALE EN LIGNE DROITE

Ce prochain chapitre présente la création d'une base de données expérimentale en ligne droite, comprenant des essais de tufting et en soufflerie. Ces essais sont impératifs pour comprendre en profondeur le comportement aérodynamique du véhicule dans des conditions spécifiques de ligne droite. Ces données fournissent une base solide pour la création d'un modèle de simulation numérique, l'analyse et l'optimisation des performances aérodynamiques.

4.1 Session de test effectués

4.1.1 Essais sur piste

Des essais sur piste ont été effectués sur la piste Delta, située au Centre d'essais et de recherche Automobile de PMG Technologie à Blainville. L'objectif de ces essais est la réalisation d'une aéromap.

Les aéromaps sont couramment utilisés dans le domaine de la course automobile pour évaluer la réactivité de la plateforme aérodynamique d'un véhicule aux changements de garde au sol. Ce processus implique la variation des hauteurs de garde au sol de l'essieu avant et arrière en ajustant la hauteur du fond plat par rapport au sol.

Les spécifications de la piste Delta comprennent une ligne droite de 670 mètres avec une inclinaison de 0 % d'est en ouest et de 0.6 % du nord au sud, ce qui est crucial pour garantir la reproductibilité des résultats.

Les tests suivent la procédure suivante :

- Accélération progressive de la voiture jusqu'à atteindre 120 km/h.
- Maintien de la vitesse de la voiture à 120 km/h pendant 1 seconde.
- Relâchement de l'accélérateur pour permettre à la voiture de ralentir naturellement jusqu'à l'arrêt.

Ce test est réalisé dans les deux sens afin d'éliminer l'impact du vent sur les mesures.

Pour couvrir toute la plage de valeurs de hauteur de garde au sol, la voiture était équipée de potentiomètres rotatifs sur l'assemblage de suspension, permettant de mesurer la compression des amortisseurs. En connaissant la constante d'amortissement des ressorts installés sur la voiture, la différence de hauteur de caisse à 0 km/h peut être déterminée en temps réel, ainsi que la déformation du pneu.

Le tableau 4.1 présente les résultats obtenus lors des essais effectués :

CLA			Devant [mm]			
			20	25	30	35
	Derrière [mm]	35	-3.587	-3.562	-3.477	-2.310
		30	-3.425	-3.053	-3.364	-3.265
		25	-3.382	-3.039	-3.163	-2.758
20	-3.055	-3.068	-2.187	-2.028		

Balance Aérodynamique [% avant]			Devant [mm]			
			20	25	30	35
	Derrière [mm]	35	51.2%	46.9%	46.8%	43.6%
		30	48.8%	45.7%	44.5%	46.1%
		25	48.9%	42.7%	44.6%	43.4%
20	47.1%	44.7%	45.8%	42.0%		

Figure 4.1 Aeromap effectuée en essais sur piste

Étant donné l'absence de capteurs pour mesurer la force de traînée (composante en -X) sur les montants de suspension, seules les forces normales ont été relevées, permettant ainsi d'obtenir le CDA et l'équilibre aérodynamique.

4.1.2 Tufting

Le "tufting" est une technique utilisée en aérodynamique automobile pour observer et analyser le flux d'air autour d'un véhicule en mouvement. Elle implique l'utilisation de petits fils souples,

appelés "tufts", fixés à différentes parties de la carrosserie ou des éléments aérodynamiques. Les tufts réagissent au flux d'air, offrant ainsi des indications visuelles sur sa direction et sa stabilité.

Cette méthode est principalement utilisée pour étudier le comportement du flux d'air à différentes vitesses et conditions de conduite. En positionnant les tufts de manière stratégique sur la carrosserie, les ingénieurs analysent divers aspects aérodynamiques tels que la formation de tourbillons, la séparation du flux d'air et les variations de pression. Cette analyse permet d'identifier les zones de turbulence et de séparation du flux d'air, pouvant influencer la traînée et l'appui aérodynamique du véhicule. Comprendre ces phénomènes aide les concepteurs à optimiser la conception du véhicule pour améliorer ses performances globales.



Figure 4.2 Application de tuft sur MANIC24

En comparant les observations du tufting avec les résultats des analyses numériques, il est possible d'améliorer la précision des prévisions aérodynamiques en ajustant les modèles. Dans le cadre de l'étude et de la validation, nous avons appliqué la méthode du tufting dans le contexte de FSAE en fixant des "tufts" sur une moitié complète du châssis, ce qui nous a permis d'identifier les zones de décrochage et les perturbations aérodynamiques significatives. Ces informations nous ont guidés dans l'amélioration de la conception de la voiture pour la saison 2023-2024.

4.1.3 Soufflerie

Les essais en soufflerie sont essentiels pour améliorer la stabilité et les performances des véhicules. Ils permettent de régler les éléments aérodynamiques comme les ailerons et les spoilers pour augmenter l'appui tout en réduisant la traînée. Ces tests peuvent également simuler les virages pour ajuster l'adhérence et la maniabilité du véhicule. Ils permettent d'identifier les zones de résistance à l'air pour améliorer la vitesse et l'efficacité globale.



Figure 4.3 MANIC24 en soufflerie

Les essais en soufflerie servent à vérifier la précision des modèles de simulation en confrontant les résultats numériques aux données expérimentales. Cela permet de valider (ou non) la fidélité des simulations utilisées dans la conception des véhicules.

Ces divers essais nous ont révélé les principales lacunes en termes d'aérodynamisme de notre prototype pour la saison 2022-2023 :

- Une sévère recirculation des flux au niveau des ailerons latéraux
- Une inefficacité relative des radiateurs
- Un décrochage sévère de l'air sur le diffuseur des ailerons latéraux
- Des échanges d'air entre l'intrados et l'extrados de certaines ailes et du fond plat

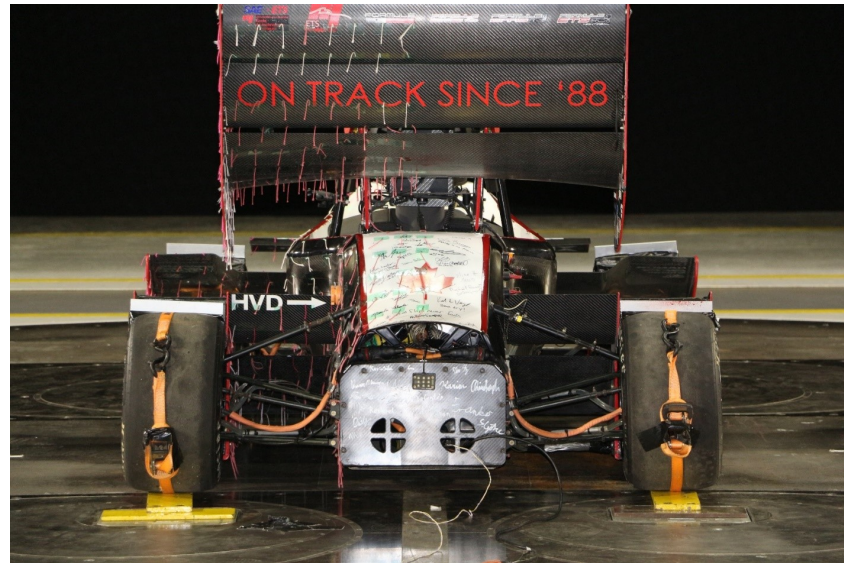


Figure 4.4 Vue arrière de MANIC23 lors des essais en soufflerie

- Un décrochage de l'air sur la plaque verticale de l'aileron arrière

Ces essais ont joué un rôle crucial en nous permettant de reconstruire un tout nouveau modèle de simulation pour notre prototype. En observant les résultats obtenus lors des tests en soufflerie, nous avons identifié des écarts significatifs par rapport aux prédictions de nos modèles précédents. Ces divergences nous ont incités à réviser en profondeur notre approche de modélisation aérodynamique. En reconstruisant le modèle, nous avons pris en compte les données réelles obtenues en soufflerie pour ajuster les paramètres et les hypothèses utilisés dans nos simulations. Ce processus nous a permis de créer un modèle plus précis et plus fidèle à la réalité, offrant ainsi une base solide pour l'amélioration des performances aérodynamiques de notre véhicule.

4.2 Observations Aérodynamiques

En ce qui concerne la partie supérieure du fond plat, une forte recirculation a été observée, avec des flux d'air revenant parfois en arrière sur plusieurs dizaines de centimètres. Cette recirculation semble prendre source au niveau des radiateurs situés en aval, où une partie de l'air est bloquée,

l'empêchant de traverser. Ces phénomènes de recirculation ont été clairement documentés grâce aux méthodes utilisées pour le tufting et les essais en soufflerie.

Il est notable que les tufts montrent des directions différentes de celles attendues pour un écoulement fluide de l'amont vers l'aval. Certains tufts révèlent des zones où le fluide semble immobile, tandis que d'autres montrent des échanges entre les niveaux de la jupe, entraînant un enroulement du flux et une importante zone de recirculation.



Figure 4.5 Photographie des tufts du fond plat

Lors de la session en soufflerie, les théories ont été réexaminées et confirmées. La visualisation par fumigation a été utilisée pour suivre en temps réel les mouvements du flux. Il a été observé que la fumée, bien que pulvérisée devant le radiateur, recirculait en amont de l'écoulement, avant de s'évacuer par le second niveau de la jupe ou par le bord du fond plat.

Les imperfections aérodynamiques, principalement dues à une mauvaise gestion du flux d'air autour des radiateurs, causent une augmentation significative de la traînée induite et perturbent l'entrée d'air dans le système de refroidissement, impactant ainsi l'appui aérodynamique. Par



Figure 4.6 Visualisation par fumée de la recirculation sur le fond plat



Figure 4.7 Echanges entre la partie supérieure et inférieure de la jupe

la suite, les mouvements du fluide près de l'aileron arrière ont été examinés, où selon les simulations, cet élément contribue à plus de 30% de l'appui aérodynamique et près de 50% de la traînée aérodynamique du véhicule. Bien que ces résultats soient prévisibles étant donné les dimensions importantes de l'aileron, des observations supplémentaires ont été relevées lors de nos essais, pouvant expliquer une traînée aérodynamique moins optimale.

Un décrochage significatif est observé sur le bord gauche des plaques verticales maintenant les ailerons arrière (indiqué par les tufts blancs), avec des flux d'air chaotiques dans cette zone. De



Figure 4.8 Visualisation d'un décrochage par la méthode du tufting

plus, les tufts du bord supérieur pointent vers le haut, démontrant les effets des vortex générés par l'ensemble aérodynamique arrière. Ce décrochage semble résulter d'une épaisseur qui entraîne un détachement abrupt sur la partie amont de l'aile, formant ainsi une poche de fluide stagnant et une baisse de la pression du fluide près de l'aileron arrière, avant de se reconnecter plus loin sur la plaque.

Ce phénomène de détachement, ainsi que la formation de vortex, ont été mieux observés en soufflerie grâce à la fumigation.



Figure 4.9 Visualisation du fluide au voisinage de l'aileron arrière

Dans ce chapitre, la présentation de la base de données expérimentale en ligne droite, enrichie par des essais de tufting et en soufflerie, revêt une importance cruciale pour la validation du modèle de simulation discuté dans le prochain chapitre. Ces données expérimentales fournissent une fondation solide pour évaluer l'exactitude et la fiabilité de notre modèle, renforçant ainsi la confiance dans les résultats.

CHAPITRE 5

MÉTHODOLOGIE DE SIMULATION EN LIGNE DROITE

Au cours de ce chapitre, la méthodologie de simulation en ligne droite va être présentée. Les différentes étapes de la méthodologie, allant des caractéristiques géométriques du modèle aux spécifications des conditions aux limites, en passant par le maillage et d'autres paramètres physiques clés seront présentés en revue.

5.1 Caractéristiques Géométriques

Dans le contexte des simulations CFD pour une voiture de course FSAE, la précision des résultats repose en grande partie sur le modèle géométrique adopté. Toutefois, ce modèle doit être une simplification de la géométrie réelle de la voiture.

Pour optimiser les calculs, la géométrie est simplifiée en supprimant les détails superflus tels que les congés ou les petits perçages. Cette simplification réduit la complexité du modèle en diminuant le nombre d'éléments très petits dans le maillage, ce qui diminue les temps de maillage et de calcul.

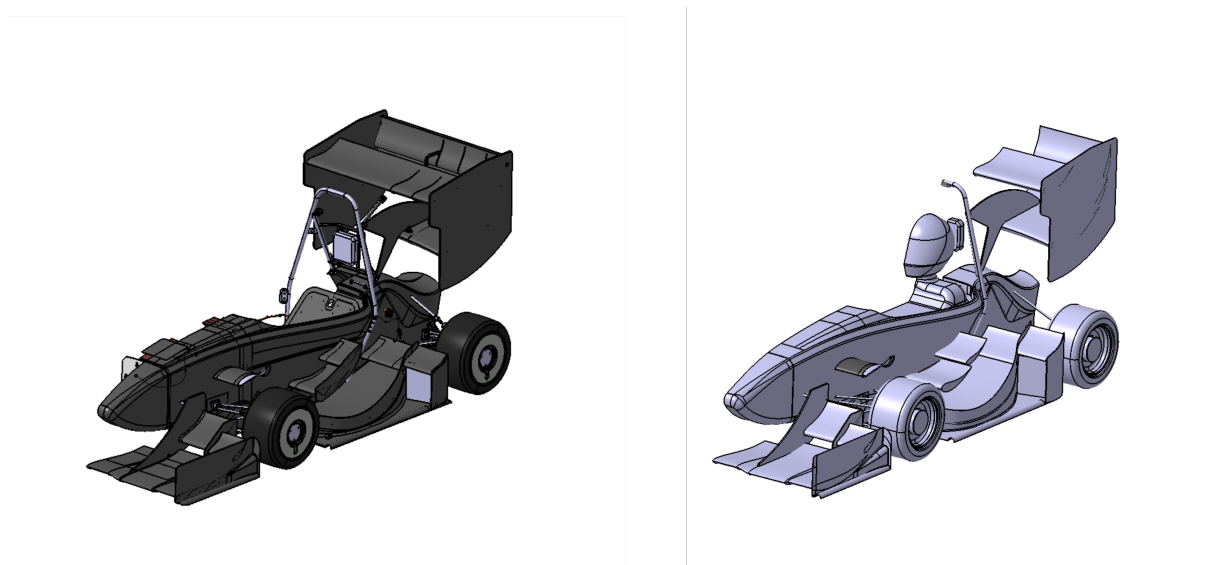


Figure 5.1 Simplification de la géométrie

Un autre aspect important est l'exploitation de la symétrie présente dans la géométrie de la voiture de course. L'exploitation de la symétrie dans la géométrie de la voiture de course joue un rôle essentiel dans la réduction du temps de maillage et de calcul. Celle-ci est exploitée avec les outils numériques qui lui sont liés.

En ce qui concerne la détermination de la taille du domaine, une étude d'indépendance a été entreprise dans le but d'évaluer l'influence de la taille du domaine de simulation sur les résultats de la CFD, et de trouver la taille optimale du domaine assurant à la fois précision et efficacité en termes de coûts.

Cette étude s'est focalisée sur la variation de la taille du domaine, tous les autres paramètres et conditions de simulation restant constants. L'analyse portait ensuite sur la convergence des résultats en fonction de cette taille de domaine variable.

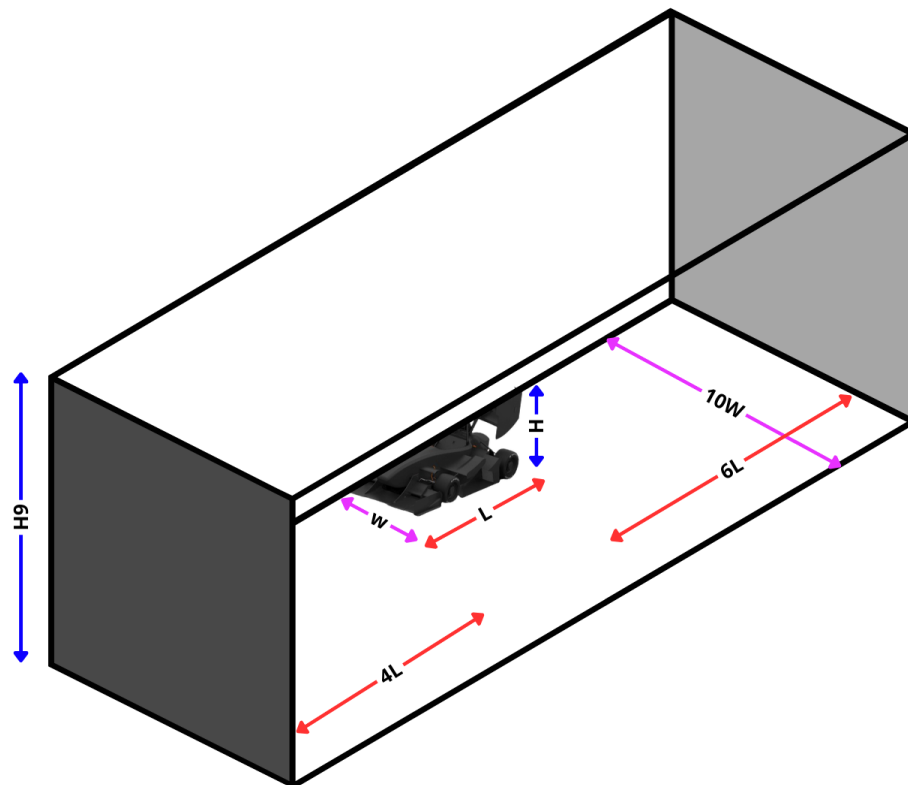


Figure 5.2 Dimensions du Domaine

Sur la figure ci-dessous, on remarque que les résultats convergent vers une valeur stable avec l'augmentation de la taille du domaine, cela indique que la taille actuelle du domaine est suffisante et que des domaines plus grands n'apporteraient pas d'améliorations significatives. A l'inverse, les informations seraient exponentiellement faussées dans des domaines plus petits.

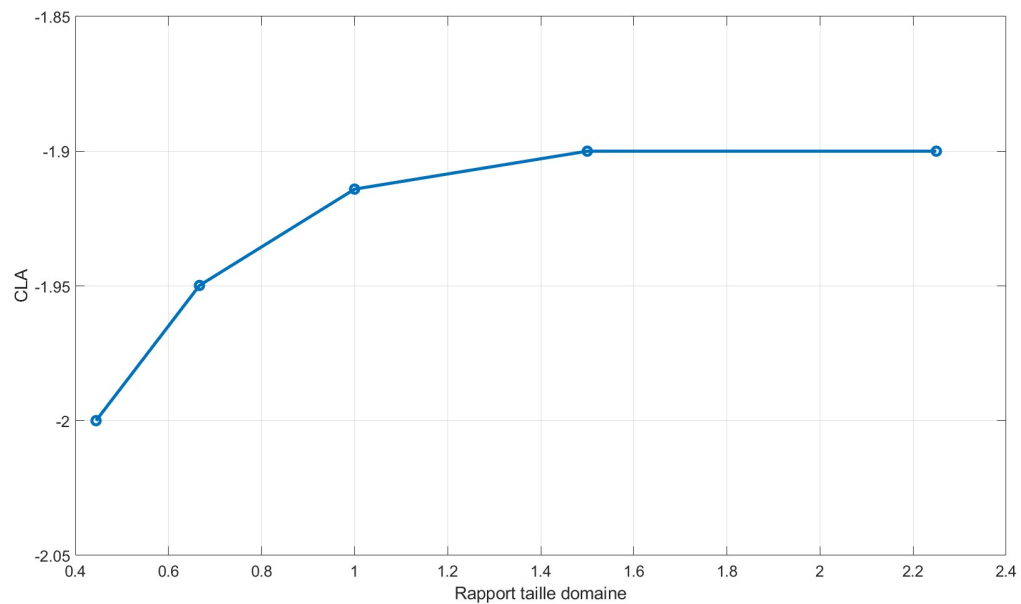


Figure 5.3 Validation de l'indépendance du domaine

5.2 Choix des équations

Le choix du modèle de turbulence en simulations CFD est crucial pour assurer la précision des résultats en capturant efficacement les effets de la turbulence. Un modèle de turbulence approprié est essentiel pour interpréter avec précision les résultats des simulations CFD et prendre des décisions de conception en conséquence. En effet, il influence la précision des résultats, l'impact sur les performances, l'ingénierie et la conception, ainsi que l'interprétation des résultats dans les simulations.

Pour choisir le modèle de turbulence adéquat en simulation CFD, il est primordial de comprendre les caractéristiques spécifiques de l'écoulement à simuler mais aussi de la puissance de calcul et

du temps disponible. En se basant sur la littérature scientifique, il est possible de faire un choix éclairé, adapté aux caractéristiques de l'écoulement, aux ressources disponibles et aux objectifs de simulation. Par ailleurs, une étude comparative entre différents modèles a été réalisée afin de déterminer celui offrant les meilleures performances.

Les modèles de turbulence RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) les plus courants sont :

- **Modèle Spalart-Allmaras (S.A.)**
- **Modèle k-epsilon ($k-\epsilon$)**
- **Modèle k-omega ($k-\omega$)**
- **Modèle k-omega SST ($k-\omega$ + Shear Stress Transport transition)**

Dans le cadre de cette étude, trois modèles de turbulence ont été évalués, notamment le modèle k-epsilon, le modèle Spalart-Allmaras et le modèle k-omega SST.

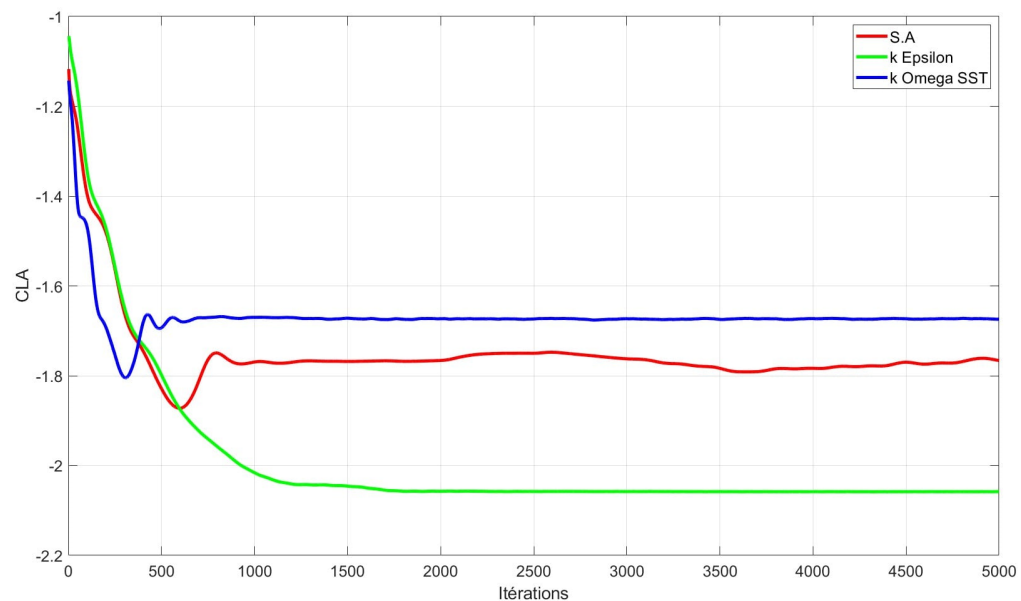


Figure 5.4 Graphe du CLA pour différent modèles de turbulence

La représentation graphique de la figure 5.4 met en évidence que le modèle k-omega SST converge de manière plus rapide que le modèle k-epsilon et offre une stabilité supérieure au modèle Spalart-Allmaras. Cette observation peut être expliquée par le fait que le modèle k-omega SST est spécifiquement conçu pour mieux saisir les effets turbulents, en particulier dans les zones de fort cisaillement et de séparation d'écoulement. Par conséquent, sa capacité à prendre en compte de manière précise ces phénomènes turbulents dominants lui permet de converger plus rapidement vers une solution stable, par rapport au modèle k-epsilon.

Dans le contexte des véhicules de course, qui se caractérisent souvent par des ailes et d'autres éléments aérodynamiques, le modèle k-omega SST se distingue comme un choix optimal.

Par ailleurs, le modèle k-omega SST offre un bon équilibre entre précision et efficacité en termes de temps de calcul, ce qui permet d'obtenir des résultats fiables tout en minimisant les coûts de calcul associés à des modèles plus complexes.

5.3 Spécification des Conditions aux Limites

Le domaine utilisé pour nos calculs CFD doit être paramétré, et l'implémentation de conditions limites précises est de rigueur afin que notre étude soit la plus pertinente et vraisemblable possible. Les conditions aux limites du domaine sont telles que :

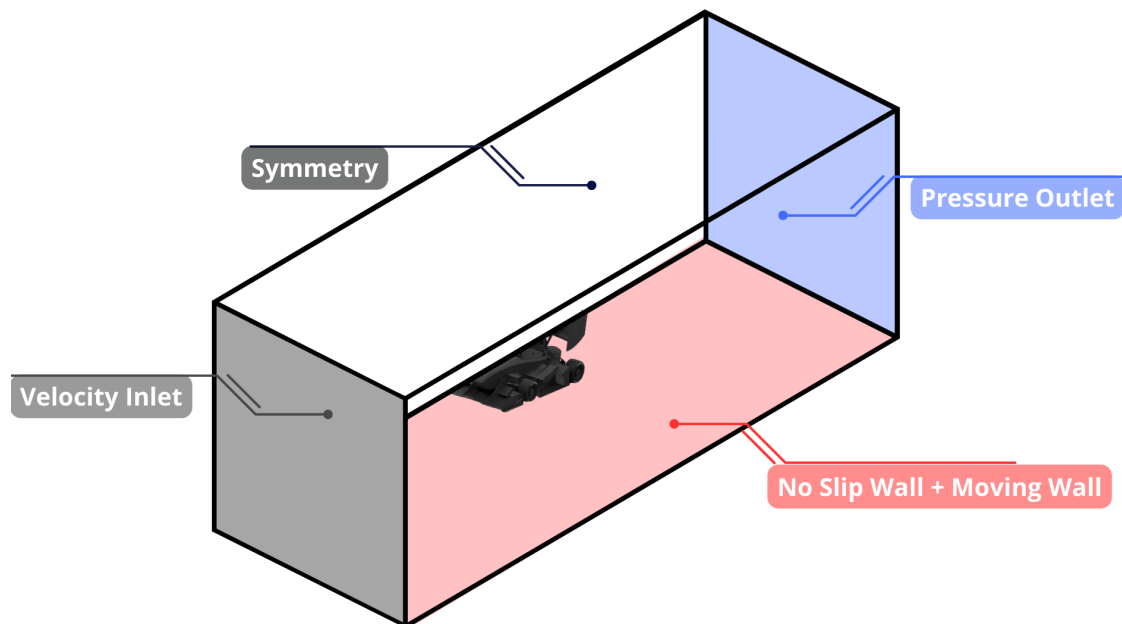


Figure 5.5 Détail des conditions aux limites du domaine

Il existe six conditions limites différentes pour la simulation :

Une "Pressure Outlet" est configurée pour permettre la sortie du fluide du domaine avec une pression égale à la pression atmosphérique.

Un "Velocity Inlet" est utilisé comme point d'entrée du fluide dans le domaine, où la vitesse est fixée à 16 mètres par seconde, correspondant à une vitesse moyenne de 60 kilomètres par heure pour le véhicule étudié.

Une condition de "Symmetry" est appliquée pour simuler uniquement une demi-voiture, réduisant ainsi la complexité du calcul.

Les conditions pour la route sont définies comme une condition de "No slip", ce qui signifie que l'air ne peut pas glisser le long de la surface de la route.

Les autres murs sont soumis à une condition de "Slip". Cela signifie que l'air ne peut pas adhérer à la paroi, et que les contraintes à la surface sont nulles.

En ce qui concerne les roues, celles-ci se voient affectées une vitesse de rotation concordante avec la vitesse de mouvement du sol, afin de pouvoir générer le sillage des roues qui représente un gros facteur de perturbations aérodynamiques.

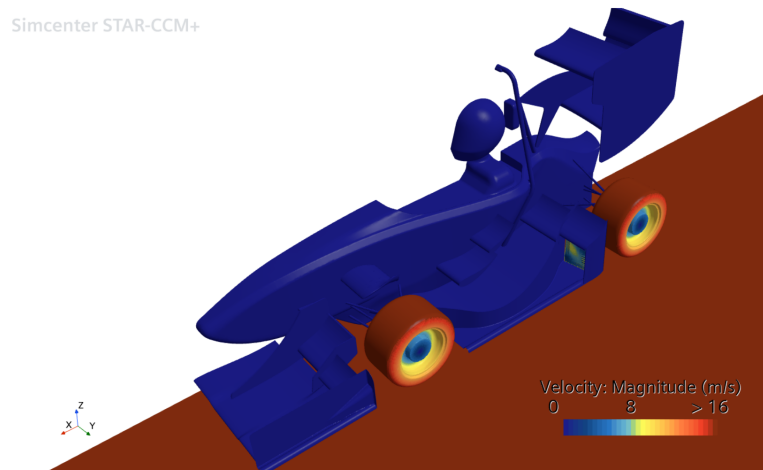


Figure 5.6 Détail des vitesses propres en Conditions Limites

5.4 Description des Paramètres Physiques

Le milieu modélisé a été configuré en tant qu'air sec dans STAR-CCM+. La pression de référence a été fixée à une atmosphère. Ci-dessous sont énumérés les paramètres spécifiques choisis pour le modèle physique de la simulation :

Continua	Stationnaire, Incompressible, 3D
Coupled Flow	Roe FDS - no blending
Modèle Turbulent	k-omega SST, $a_1 = 1$, All Y+ wall treatment
Gradients	1×10^{-20} (pour low y^+ meshes)
Solver	CFL= 200, AMG Pre-Sweeps=1, Post-Sweeps=2
Relaxation	Coefficient = 1.3

Dans le cas de simulations stationnaires, le nombre CFL n'a pas de signification directe car il est lié à la stabilité temporelle des schémas numériques. Un examen des variations de la solution

du CLA en fonction du nombre CFL a été effectué afin de déterminer la plage appropriée pour assurer la stabilité et la précision de la simulation.

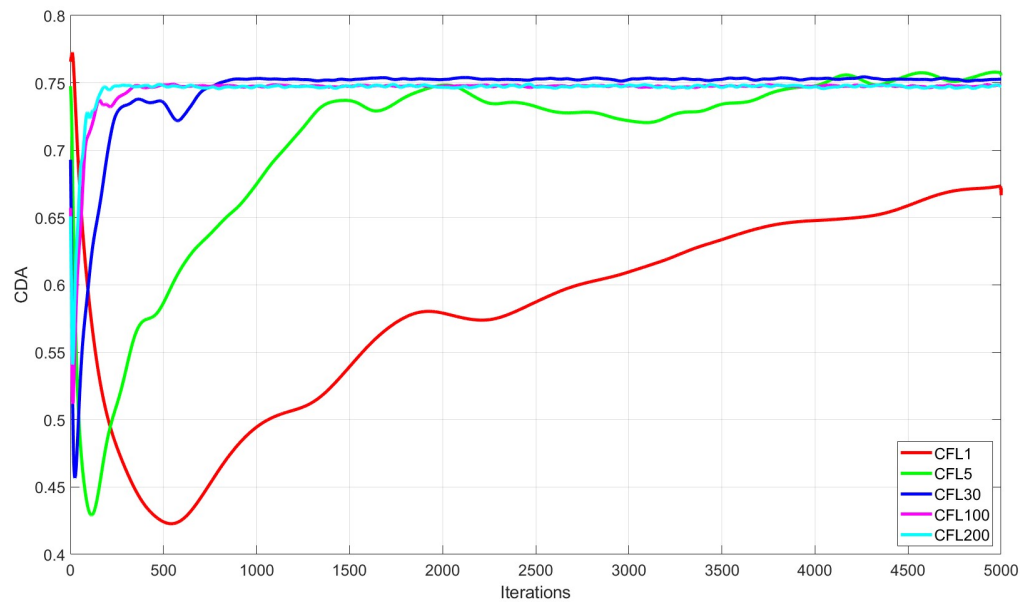


Figure 5.7 Étude du Nombre de Courant

Par ailleurs, une analyse approfondie du coefficient de relaxation α a été entreprise dans le but d'optimiser le processus de convergence, en dépit du risque inhérent de compromettre la fidélité des informations recueillies.

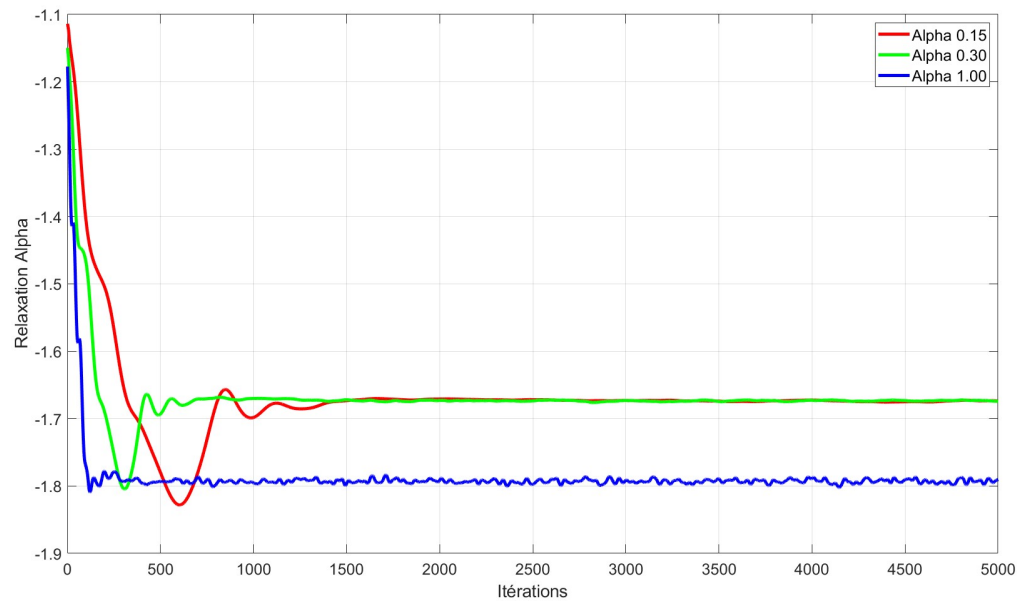


Figure 5.8 Étude du facteur de relaxation

Les facteurs de relaxation sont utilisés pour améliorer la stabilité d'un calcul, notamment lors de l'analyse en régime permanent, où les premières itérations sont cruciales. Le choix optimal du facteur de relaxation est celui qui est suffisamment petit pour assurer la stabilité, mais suffisamment grand pour conduire le processus itératif vers la convergence à une vitesse raisonnable.

- $\alpha < 0.15$ n'est pas conseillé car il ralentira trop la solution.
- $\alpha > 0.7$ peut provoquer une solution instable.
- $\alpha > 0.9$ n'est pas recommandé car il peut entraîner une divergence.

Dans le cas d'une relaxation manuelle, des valeurs comprises entre 0.3 et 0.7 sont recommandées. Ainsi, le facteur de relaxation est égal à 0.3 dans notre étude.

Dans le logiciel de simulation CFD (Dynamique des Fluides Numérique) Simcenter STAR-CCM+, le traitement mural All Y+ (tout Y+) est une méthode utilisée pour la modélisation des couches limites près de la paroi dans les simulations de flux turbulents.

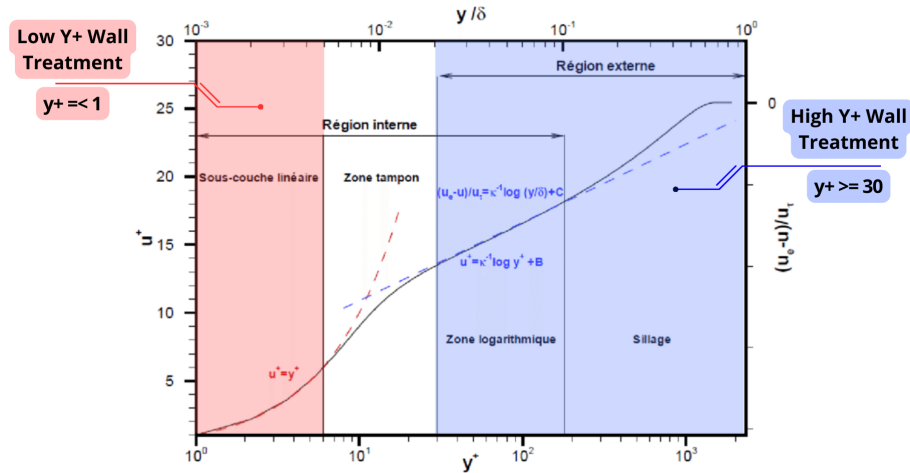


Figure 5.9 Couche limite turbulente

Il assure une résolution précise de la couche limite pour les simulations turbulentes en ajustant automatiquement le maillage près de la paroi afin de maintenir des valeurs Y+ appropriées et ainsi garantir que la couche limite est correctement résolue.

5.5 Maillage

5.5.1 Enveloppe de Surface (Surface Wrapper)

Dans le processus de modélisation et de simulation numérique, la création d'un maillage comprends deux étapes : la création d'un maillage surfacique suivi d'un maillage volumique.

Le maillage surfacique, comme son nom l'indique, représente la géométrie de la surface de l'objet à simuler, tandis que le maillage volumique étend cette représentation à une troisième dimension, capturant ainsi les détails internes de l'objet.

Préalablement à cette phase de maillage, une étape cruciale est entreprise. Il s'agit du "Surface Wrapper", un outil intégré au logiciel de simulation STAR-CCM+. Son rôle est de délimiter la géométrie d'intérêt.

Le "Surface Wrapper" s'avère particulièrement précieux dans le processus de modélisation numérique lorsqu'il y a présence de problèmes géométriques tels que des surfaces dupliquées, des pièces enchevêtrées ou encore des erreurs de conception issues du logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO).

5.5.2 Stratégie de maillage

Le modèle de simulation utilise un maillage taillé (trimmed mesh) ainsi qu'un maillage de couche prismatique (PRISM layer mesh) pour optimiser la précision de la simulation.

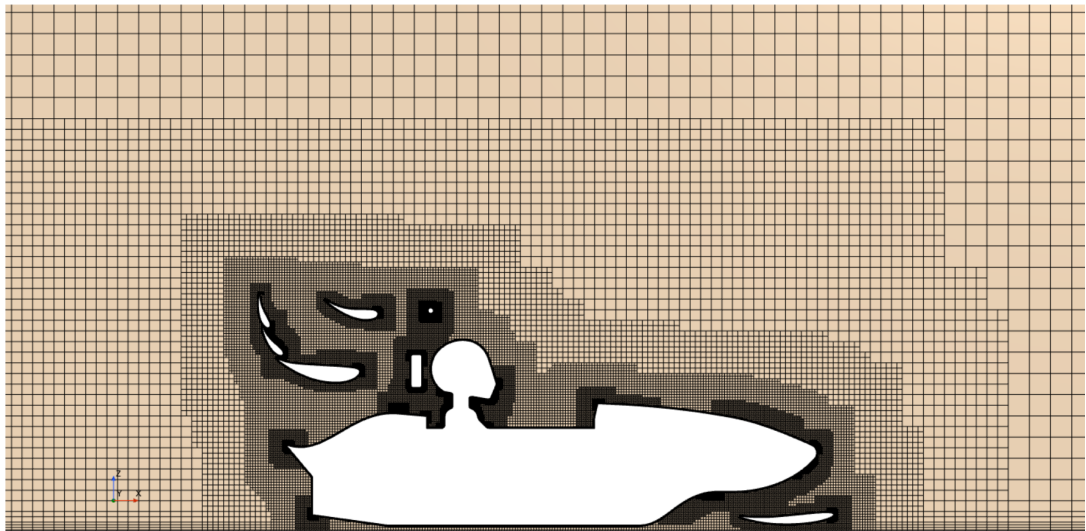


Figure 5.10 Maillage à couches prismatiques

Le maillage taillé génère un maillage volumique en découpant un maillage hexaédrique modèle avec la surface géométrique.

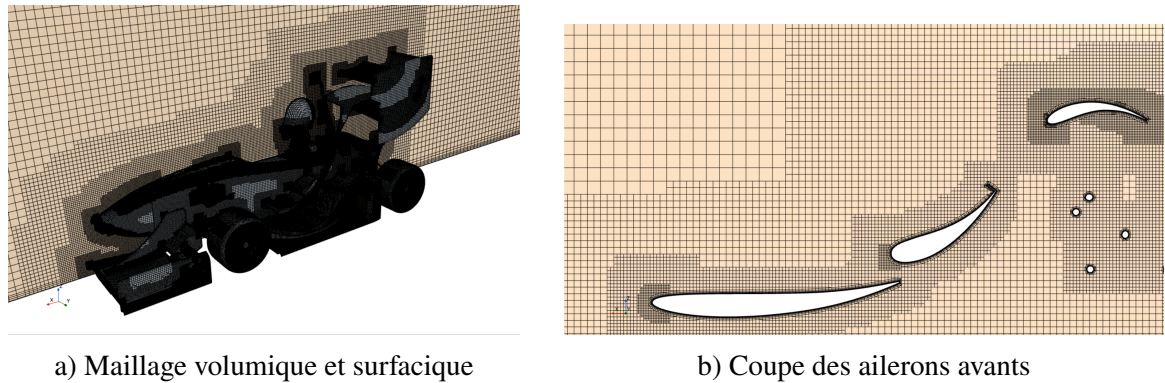


Figure 5.11 Maillage volumique de MANIC24

Quant au maillage de couche prismatique, il ajoute des couches de cellules spéciales le long des parois pour améliorer la précision des calculs, notamment ceux liés à la vitesse et à la température près des parois. Cela permet une prédiction plus précise de phénomènes comme la traînée ou la chute de pression, particulièrement importants dans les zones de turbulence près des parois.

Pour optimiser la précision des simulations aérodynamiques sur la voiture de course, le maillage de la voiture a été divisé en deux parties distinctes : le maillage "Faible Y^+ " et le maillage "Haut Y^+ ". En utilisant une approximation de y^+ égale à 1 dans le maillage "Faible Y^+ ", on s'assure que les cellules du maillage sont assez petites pour capturer efficacement la couche limite visqueuse près des parois. Cela est particulièrement important pour les éléments aérodynamiques tels que les ailerons avant et arrière, où des gradients de vitesse élevés peuvent se produire près de la surface, nécessitant une résolution fine pour une précision adéquate de la simulation.

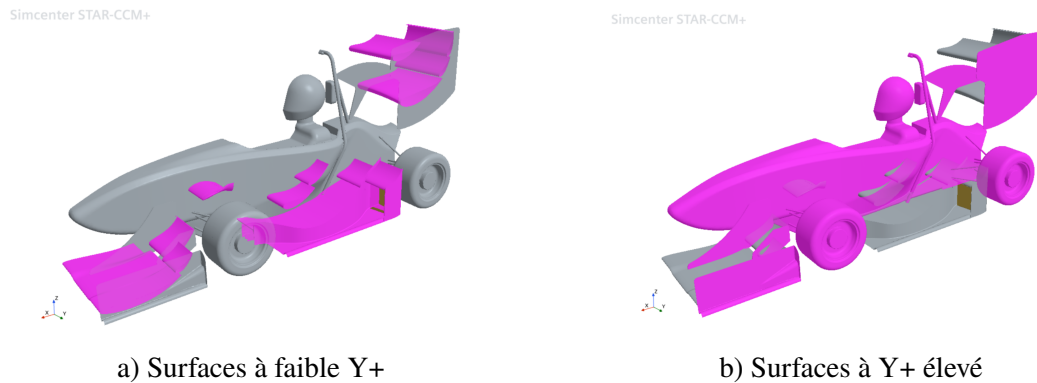


Figure 5.12 Paramétrage du Y^+ sur MANIC24

D'autre part, dans le maillage à y^+ élevé, où l'approximation de y^+ est d'environ 30, les cellules du maillage sont plus grandes, ce qui permet une simulation plus efficace des régions de l'écoulement où les gradients près des parois sont moins prononcés. Dans ces zones, comme la monocoque et les roues, des valeurs de y^+ plus élevées sont acceptables sans compromettre significativement la précision des résultats.

Voici un résumé simplifié des paramètres généraux du maillage dans le tableau ci-dessous :

Paramètres	Valeur
Taille de Base (Base Size)	30mm
Taille Cible (Target Size)	50 % de la Base Size
Taille Minimale de la Surface (Minimum Surface Size)	10 % de la Base Size
Taux de Croissance de la Surface (Surface Growth Rate)	1.3 (Lentement)

Il convient de noter que ce sont des paramètres généraux du maillage et qu'il existe des contrôles personnalisés (qui ne seront pas détaillés dans ce rapport) pour des éléments critiques nécessitant un raffinement supplémentaire.

5.5.3 Épaisseur de la première maille

Afin de capturer les forts gradients des variables proche de la paroi, l'utilisation d'un maillage à couches prismatiques est recommandé.

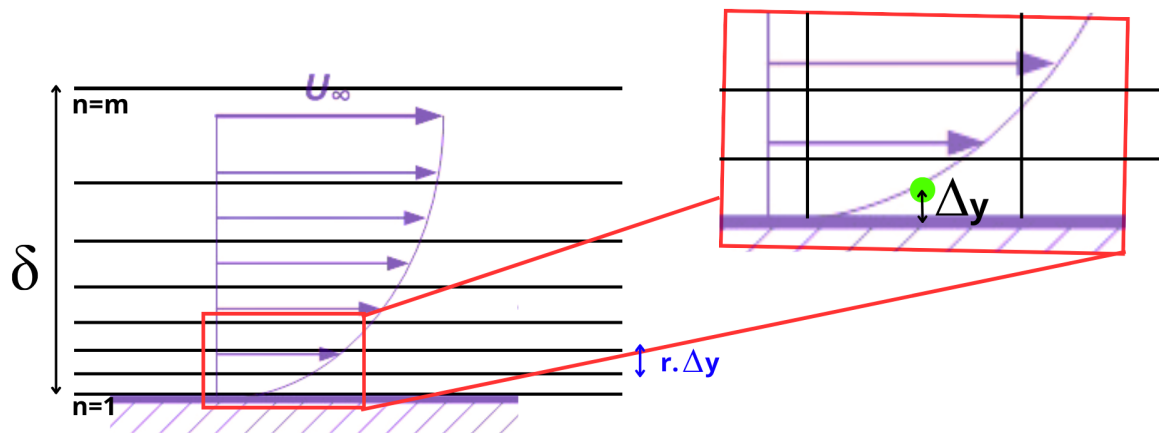


Figure 5.13 Maillage à couches prismatiques

Un tel maillage a besoin de trois principales informations :

- **L'épaisseur totale de la couche prismatique**
- **La hauteur de la première cellule**
- **Le nombre de couches**

Dans "Viscous Fluid Flow" de Frank M. White, l'épaisseur de la couche prismatique est assimilée à l'épaisseur totale de la couche limite, surtout dans le contexte de la génération du maillage. La formule de l'épaisseur totale de la couche limite (δ) pour un écoulement turbulent sur une plaque plane peut être approximée par la formule de Prandtl :

$$\delta \approx \frac{0.16 \cdot x}{Re_x^{1/7}} \quad (5.1)$$

Avec :

- x : Longueur de référence (m)
- Re_x : Nombre de Reynolds associé à x

La hauteur de la première cellule Δy est déterminée à partir de la définition du paramètre y^+ , définie dans les sections précédentes :

$$y^+ = \frac{\Delta y u_\tau}{\nu} \quad (5.2)$$

Un code MATLAB a été développé dans le but de calculer la distance Δy jusqu'à la paroi, en prenant comme référence la longueur de la voiture.

Le nombre de couches m est donné par :

$$\delta = \frac{\Delta y (1 - r^m)}{1 - r} \Rightarrow m = \frac{\ln \left(1 - (1 - r) \frac{\delta}{\Delta y} \right)}{\ln(r)} \quad (5.3)$$

où r est le facteur d'étirement ($r=1.2$)

Paramètres	Détail
Faible Y^+ ($Y^+ = 1$)	Nombre de couches : 10, Épaisseur de la CL totale : 8mm
Haut Y^+ ($Y^+ = 30$)	Nombre de couches : 5, Épaisseur de la CL totale : 5mm

Tableau 5.1 Paramètres de la couche limite pour différentes valeurs de Y^+

5.5.4 Raffinement du maillage

Les maillages générés pour les simulations à volumes finis peuvent être affinés grâce à des techniques de raffinement de maillage. Ces méthodes offrent la possibilité de définir des zones spécifiques autour des objets d'intérêt.

L'utilisation des raffinements de maillage, des résultats plus précis et plus efficaces seront obtenus dans les zones importantes. Par ailleurs, cela réduit le nombre de cellules nécessaires dans des zones où la résolution fine n'est pas requise, tout en maintenant une résolution élevée là où elle est critique.

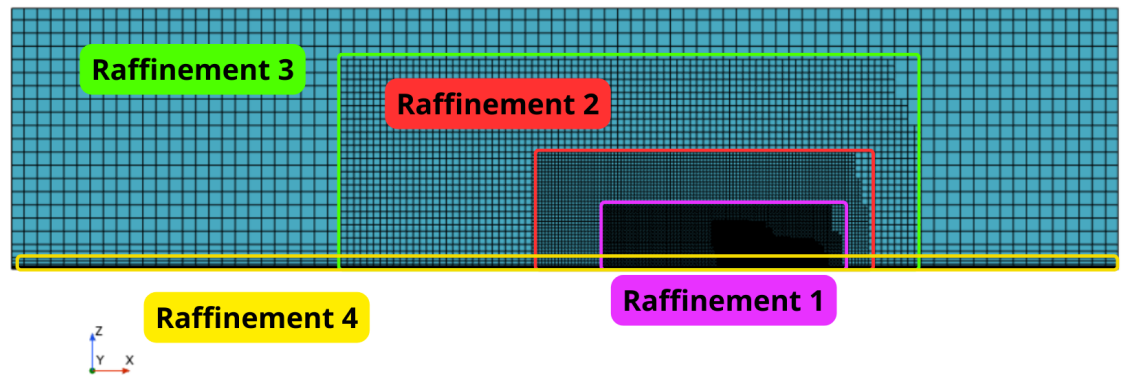


Figure 5.14 Zones de raffinement de maillage

Le modèle de simulation comporte 4 zones de raffinements. Les paramètres respectifs sont détaillés ci-dessous :

Zones de raffinement	
Zone de raffinement 1 (Offset)	Taille du maillage cartésien (trimmed) isotrope 250%
Zone de raffinement 2 (Offset)	Taille du maillage cartésien (trimmed) isotrope 400%
Zone de raffinement 3 (Offset)	Taille du maillage cartésien (trimmed) isotrope 800%
Zone de raffinement 4 (Sol défilant)	Taille du maillage cartésien (trimmed) anisotrope 50% (Direction Z), épaisseur totale de la couche prismatique : 10mm, nombres de couche : 4

5.5.5 Étude de la sensibilité du maillage

L'analyse de la sensibilité du maillage joue un rôle crucial dans les simulations numériques, car elle vise à déterminer la dimension de base la plus appropriée pour minimiser du temps de calcul et inévitablement les coûts de calcul tout en assurant la qualité du maillage.

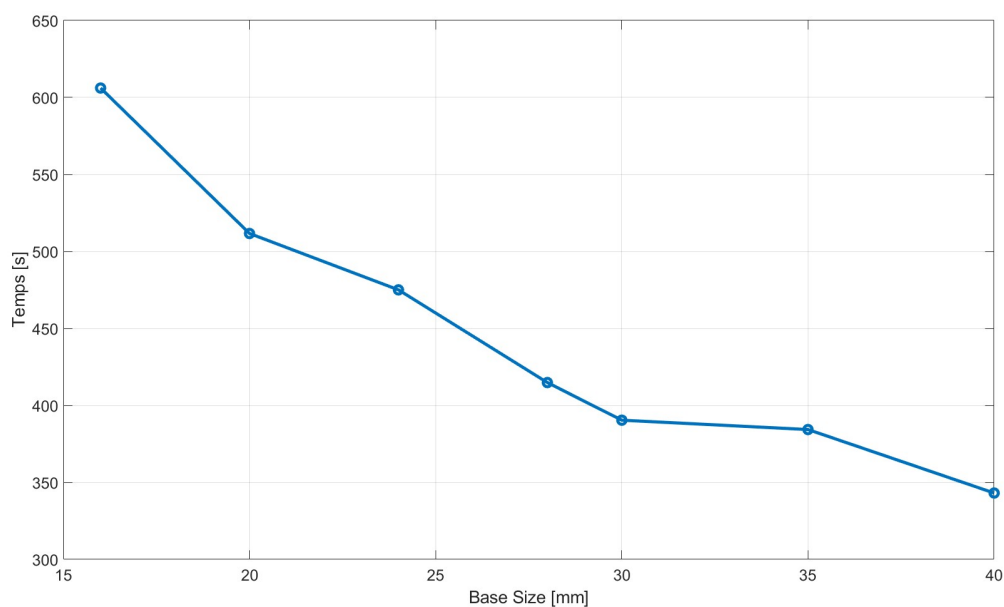


Figure 5.15 Étude de la durée de maillage en fonction de la taille d'élément

Cette étude permet de trouver un équilibre entre précision et coût de calcul en identifiant la taille de base minimale pour laquelle le coefficient de portance devient indépendant de la taille du maillage. Dans ce cas précis, une base de 30 mm a été identifiée comme optimale.

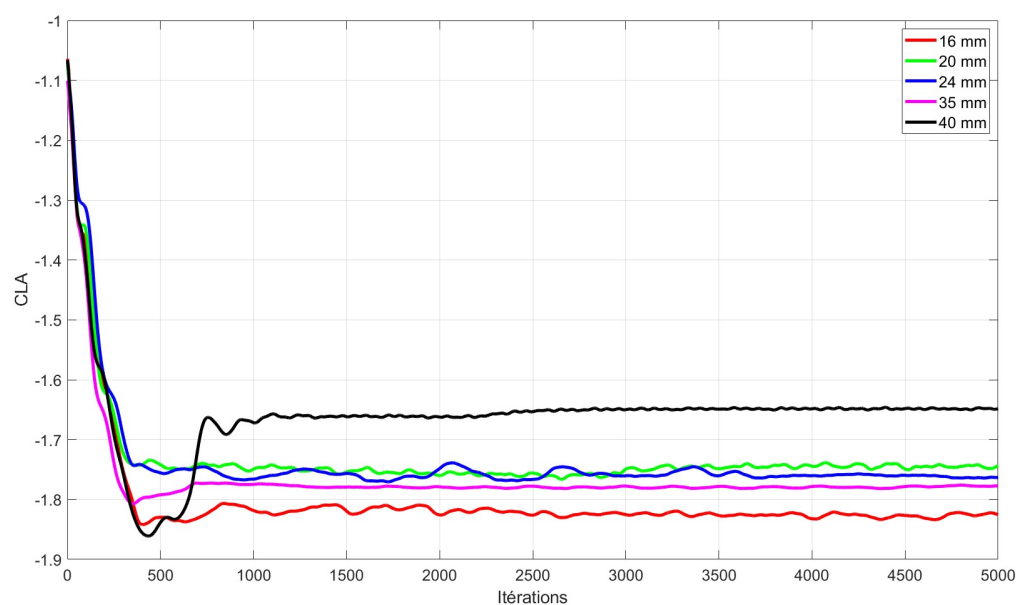


Figure 5.16 Étude de la sensibilité au maillage du CLA

En somme, ce chapitre a exposé en détail la méthodologie de simulation en ligne droite, fournissant un cadre rigoureux pour l'analyse aérodynamique des véhicules de course. En comprenant et en maîtrisant les différentes étapes de cette méthodologie, une meilleure préparation est assurée pour la conduite de simulations précises, développant ainsi les bases d'une conception aérodynamique optimisée et compétitive, en fonction des résultats obtenus.

CHAPITRE 6

ANALYSE DES RÉSULTATS (LIGNE DROITE)

Ce chapitre se concentre sur l'analyse des résultats obtenus de la simulation. Chaque aspect de l'analyse, de l'interprétation des données à la validation par comparaison du modèle numérique, en passant par l'application des résultats à des problèmes d'ingénierie réels et l'identification des améliorations potentielles, est exploré en profondeur. Cette analyse approfondie contribuera à une compréhension plus précise du comportement aérodynamique du véhicule.

6.1 Interprétation des données

6.1.1 Analyse des résidus

L'analyse des résidus dans une simulation est une étape cruciale pour évaluer la validité et la qualité des résultats de la simulation.

Les résidus mesurent la différence entre les valeurs calculées par le modèle mathématique de la CFD et les valeurs réelles ou théoriques de l'écoulement. Ainsi, plus l'écart est important, plus l'erreur de la simulation est grande et moins le modèle est fiable.

Les intervalles dans lesquels les résidus sont considérés comme acceptables ou non dépendent souvent du type de simulation, des conditions de l'écoulement et des critères spécifiques définis pour évaluer la qualité des résultats. Les valeurs typiques peuvent varier en fonction du modèle de turbulence utilisé, mais elles se situent généralement dans la plage de $1e-3$ à $1e-6$.



Figure 6.1 Graphique des résidus de la simulation

Sur la figure ci-dessus, les résidus de conservation de masse et de quantité de mouvement sont de l'ordre de 10^{-3} et les résidus de turbulence se situent dans la plage de 10^{-5} à 10^{-6} .

Il est important de garder à l'esprit que des résidus plus faibles ne garantissent pas nécessairement une solution plus précise, et il est nécessaire de valider les résultats de la simulation par rapport à la base de données expérimentale.

6.1.2 Représentation du Y^+

La visualisation de la distance à la paroi adimensionnelle y^+ fournit des informations précieuses sur la qualité des simulations, la distribution de la turbulence et les zones critiques de la conception de la voiture de course.

Les figures 6.2a et 6.2b permettent de vérifier que les valeurs de la distance à la paroi adimensionnelle Y^+ respectent les critères préalablement choisis lors de la détermination de la couche limite.

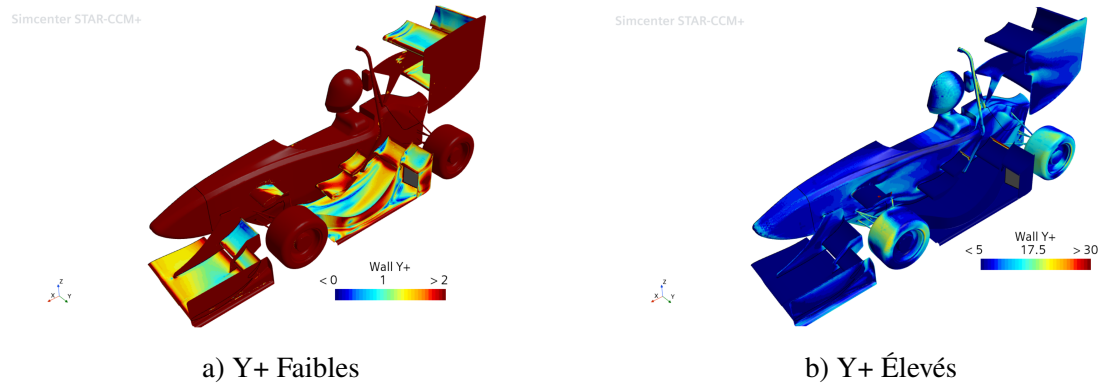


Figure 6.2 Comparaison des surfaces à hauts et faibles Y+

Si les valeurs de Y+ ne respectent pas les critères préalablement choisis, cela peut indiquer que la simulation ne capture pas correctement les effets visqueux et la turbulence près des parois. Dans notre cas, les valeurs de Y+ respectent les critères préalablement définis :

- **Faible Y+ :**

$$0 \leq y+ \leq 2 \quad (6.1)$$

- **Fort Y+ :**

$$5 \leq y+ \leq 30 \quad (6.2)$$

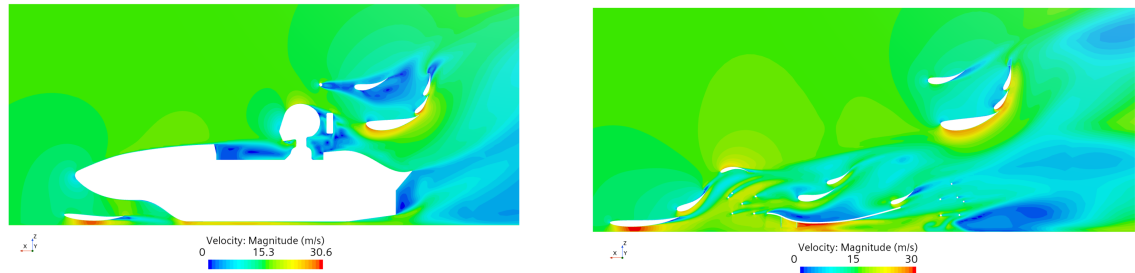
Par conséquent, en garantissant que les valeurs de Y+ respectent les critères prédéfinis, cela constitue un moyen crucial de vérification et d'assurance de la fiabilité des résultats.

6.1.3 Profil de Vitesse

L'analyse des profils de vitesse offre des informations cruciales sur l'interaction entre le flux d'air et le prototype, facilitant ainsi l'optimisation de son déplacement pour générer les effets aérodynamiques souhaités.

Cette analyse est également essentielle pour comprendre les phénomènes de surpression et de dépression, qui influent sur la traînée et l'appui aérodynamique, des aspects clés de la conception.

Pour examiner ces profils dans les simulations numériques, des vues en coupe sont utilisées pour repérer les zones où le fluide s'accélère (indiqué en rouge, créant une dépression) ou ralentit (indiqué en bleu, créant une surpression). Ces coupes permettent d'évaluer l'efficacité des ailes en termes d'appui et de traînée. Deux coupes importantes ont été réalisées à cet effet.



a) Vue en coupe du profil des vitesses à $y=0\text{cm}$ b) Vue en coupe du profil des vitesses à $y=35\text{cm}$

Figure 6.3 Vue en coupe du profil des vitesses

Ces coupes fournissent des informations cruciales en modélisant les changements de vitesse dans des zones clés de la voiture :

- **Les Ailerons Avants** : Elles révèlent le différentiel de vitesse et de pression entre l'intrados et l'extrados, générant ainsi un tiers de l'appui aérodynamique total de la voiture.
- **Le Fond Plat** : De façon similaire, elles montrent comment le flux d'air accéléré sous la voiture crée une dépression, contribuant à plaquer la voiture au sol.
- **Les Ailerons Arrières** : Ces éléments produisent à la fois de l'appui et de la traînée, et leur analyse est cruciale pour optimiser la performance aérodynamique.
- **Le Sillage de la Voiture** : Comprendre et contrôler les phénomènes de sillage générés par la géométrie du véhicule est essentiel pour réduire la traînée.

Plus généralement, l'étude des profils de vitesse et des pressions nous permet de calculer la traînée et l'appui aérodynamique de chaque composant de la voiture, aidant à identifier les surfaces clés pour optimiser l'aérodynamique.

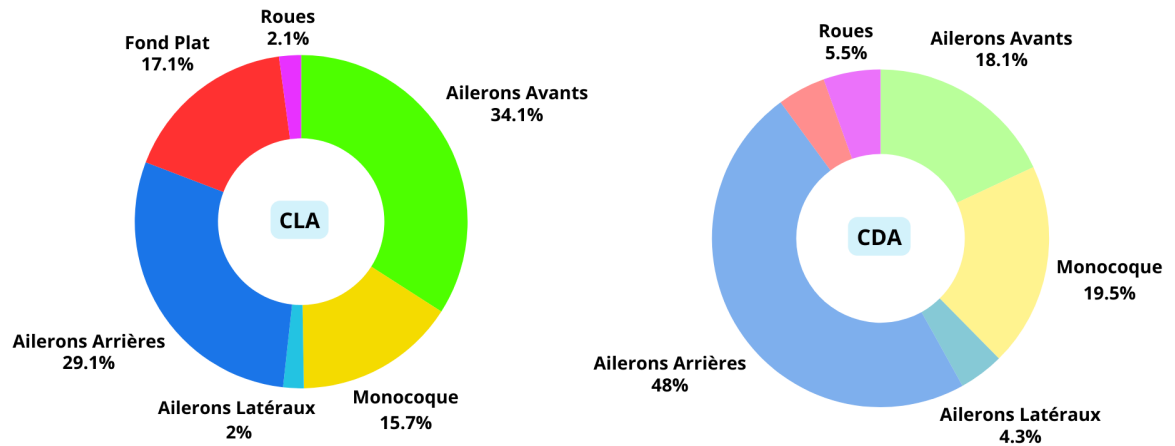


Figure 6.4 Répartition des forces aérodynamiques par élément

6.1.4 Coefficient de pression

Le coefficient de pression C_p est une mesure sans dimension utilisée pour caractériser la distribution de la pression autour d'un objet dans un écoulement. Il est défini comme suivant :

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (6.3)$$

où :

- p est la pression statique locale
- $p_\infty = 101325 Pa$ est la pression à l'infini (ici c'est la pression atmosphérique)
- ρ est la densité de l'air,
- U_∞ est la vitesse de l'air à l'infini.

Le coefficient de pression (C_p) permet d'évaluer la conversion d'énergie cinétique du fluide en énergie potentielle de pression le long de la surface d'un objet dans un écoulement. Lorsqu'un fluide s'écoule autour d'un objet, il possède une certaine énergie cinétique due à sa vitesse. Lorsque cet écoulement rencontre une forme géométrique, une partie de cette énergie cinétique peut être convertie en énergie potentielle de pression, générant ainsi des variations de pression le long de la surface de l'objet.

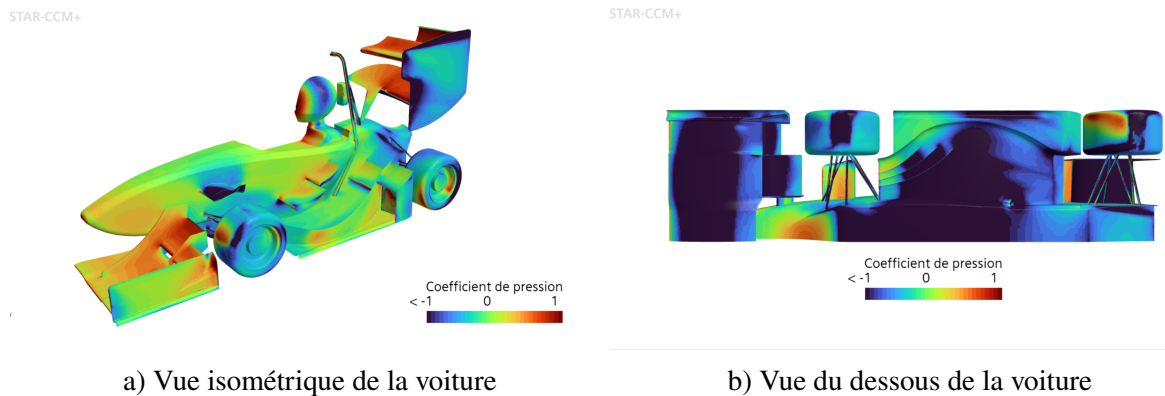


Figure 6.5 Coefficient de pression

Ainsi, un C_p élevé indique une conversion importante de l'énergie cinétique en énergie potentielle de pression, tandis qu'un C_p faible indique une conversion moindre.

En analysant la distribution de C_p sur la surface de la voiture, il est possible d'identifier les zones où les variations de pression sont les plus importantes. Ces zones peuvent indiquer des opportunités d'optimisation de la conception pour réduire la traînée, ou encore améliorer l'adhérence, augmenter la stabilité.

6.1.5 Contrainte pariétale

La représentation graphique de la contrainte de cisaillement pariétale montre la distribution spatiale de la contrainte de cisaillement le long de la paroi. La contrainte de cisaillement peut

être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\tau_p = \mu \frac{du}{dy} \quad (6.4)$$

où :

- τ_p est la contrainte de cisaillement (en Pa)
- μ est la viscosité dynamique du fluide (en Pa.s)
- $\frac{du}{dy}$ est le gradient de vitesse

Dans un écoulement turbulent, les zones de fort cisaillement peuvent indiquer des tourbillons ou des zones de turbulence intense. Par ailleurs, lorsque $\tau_p = 0$ le long de la surface cela signifie un décollement du flux, où la couche limite se détache de la surface solide.

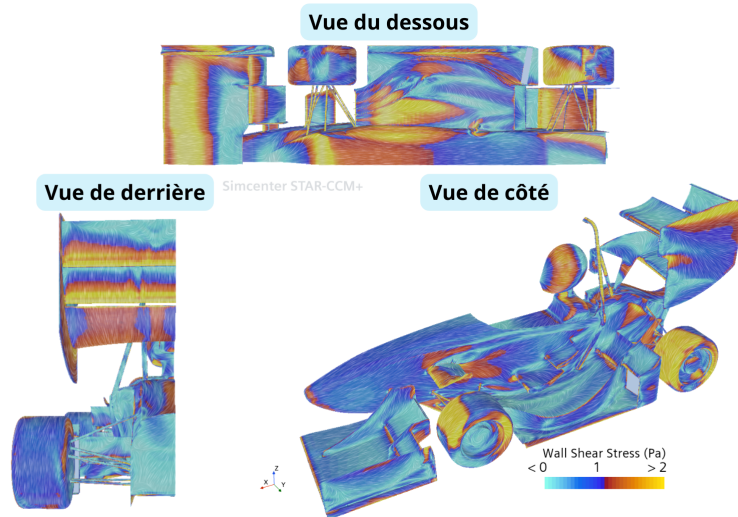


Figure 6.6 Visualisation de la contrainte pariétale

En observant la figure, la couche limite se détache à plusieurs endroits, notamment sur l'aileron avant principal, le troisième aileron arrière et légèrement sur la montée du fond plat.

En prenant en compte ces observations dans le processus de conception, il est possible d'optimiser

l'aérodynamique en concevant des solutions visant à atténuer cet effet indésirable : réduire l'angle d'attaque, changer les positions des ailerons et notamment leur écart.

6.1.6 Q-Criterion

Le critère Q est une méthode utilisée en mécanique des fluides pour identifier et détecter les tourbillons dans un écoulement. Il est défini comme suit :

$$Q = \frac{1}{2} \left[(\text{tr}(\nabla \mathbf{u}))^2 - \text{tr}(\nabla \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) \right] \quad (6.5)$$

Pour représenter graphiquement les structures tourbillonnaires, il faut utiliser des iso-surfaces du critère Q . Les valeurs choisies sont toutes positives et considérablement plus petites que la valeur maximale possible.

Les régions où la vorticité dépasse un certain seuil, défini par le critère Q , sont considérées comme des zones où les tourbillons sont présents. Sur la figure ci-dessous, il y a 3 valeurs du critère Q différents :

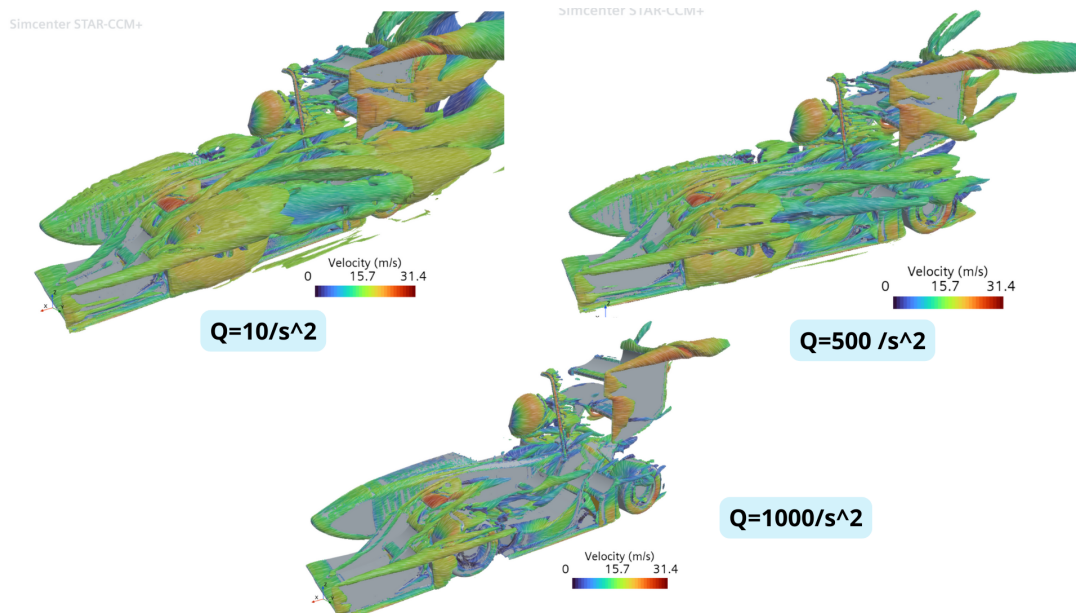


Figure 6.7 Visualisation du critère Q

Plus la valeur du critère Q est élevée, plus cela indique la présence de structures tourbillonnaires fortes et intenses.

6.1.7 Valeurs aérodynamiques finales

À la fin de cette étude, trois coefficients aérodynamiques principaux liés à l'aérodynamisme de MANIC24 ont été extraits.

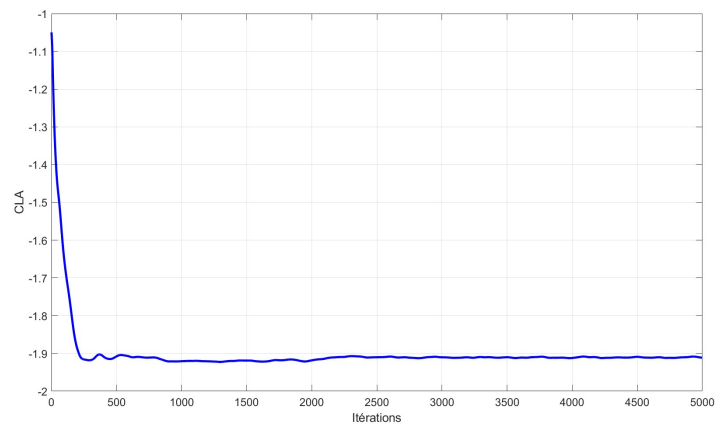


Figure 6.8 Graphique du coefficient de portance CLA

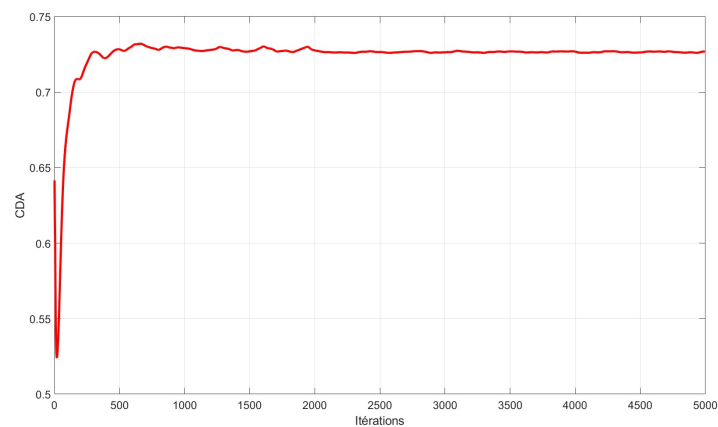


Figure 6.9 Graphique du coefficient de trainée CDA

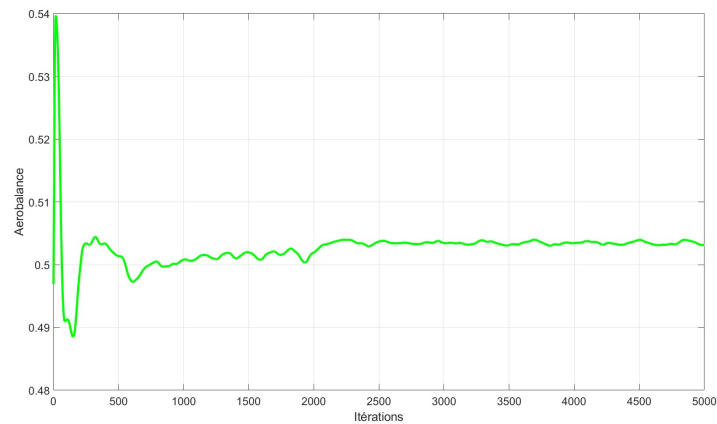


Figure 6.10 Graphique de la balance aérodynamique

Il est important de noter que les valeurs de CDA (0.74) et de CLA (-1.91) ne s'appliquent qu'à la moitié de la voiture. Les valeurs réelles sont donc multipliées par 2.

Sur le troisième graphique, on note une balance aérodynamique longitudinale de 50.5% ce qui correspond aux objectifs de conception du véhicule.

Globalement, dans un contexte de FSAE, ces valeurs sont globalement comparables à celles d'autres prototypes de la même catégorie, tant au niveau de l'appui que de la trainée, ce qui assure des performances. Ces valeurs sont cependant celles que les équipes cherchent à améliorer d'années en années.

6.2 Validation par comparaison du modèle numérique

Les essais effectués ont joué un rôle crucial dans la validation de notre modèle de simulation numérique des fluides. La validation s'est déroulée en deux phases : d'abord, une validation expérimentale a été effectuée en comparant les valeurs d'appui aérodynamique obtenues lors des essais puis une validation visuelle a été entreprise. Cette similitude visuelle permet de confirmer la capacité du modèle à reproduire les problèmes aérodynamiques observés et à proposer des concepts améliorés.

6.2.1 Validation expérimentale : Aeromaps

Dans cette étude, des variations de 20 mm à 35 mm ont été appliquées à la hauteur des essieux avant et arrière dans notre modèle de simulation. Pour chaque variation, les valeurs du CLA, du CDA et de l'équilibre aérodynamique ont été enregistrées.

CLA			Devant [mm]			
			20	25	30	35
	Derrière [mm]	35	-3.590	-3.323	-3.324	-3.204
		30	-3.570	-3.200	-3.340	-3.350
		25	-3.360	-3.442	-3.147	-3.280
20		-3.248	-3.490	-3.252	-3.152	

CDA			Devant [mm]			
			20	25	30	35
	Derrière [mm]	35	1.468	1.515	1.528	1.617
		30	1.485	1.473	1.484	1.480
		25	1.490	1.484	1.469	1.463
20		1.462	1.460	1.470	1.475	

Balance Aérodynamique [% avant]			Devant [mm]			
			20	25	30	35
	Derrière [mm]	35	51.1%	47.1%	45.6%	40.0%
		30	48.8%	46.0%	44.7%	43.5%
		25	46.0%	46.3%	46.0%	44.4%
20		47.2%	44.0%	45.0%	42.0%	

Figure 6.11 Aeromap effectuée en simulation

Pour optimiser à la fois le CLA, le CDA et l'équilibre aérodynamique, il est avantageux d'avoir une hauteur plus élevée à l'arrière et une hauteur plus basse à l'avant. Cette configuration augmente l'appui aérodynamique tout en réduisant la traînée. Par ailleurs, les variations de

hauteur à l'arrière ont moins d'incidence sur l'aérodynamisme global par rapport à celles de l'essieu avant. Ainsi, il est conseillé d'opter pour des ressorts plus rigides à l'avant, car des hauteurs avant supérieures à 30 mm entraînent une diminution notable du CDA et un déplacement de l'équilibre aérodynamique vers l'arrière. En revanche, les variations de hauteur à l'arrière ont un impact moindre sur l'équilibre aérodynamique, offrant ainsi une plus grande souplesse dans le choix des ressorts.

CLA			Devant [mm]			
			20	25	30	35
		Derrière [mm]				
		35	0.1%	6.7%	4.4%	38.7%
		30	4.3%	4.8%	0.7%	2.6%
		25	0.7%	13.3%	0.5%	18.9%
		20	6.3%	13.7%	48.7%	55.4%

Balance Aérodynamique [% avant]			Devant [mm]			
			20	25	30	35
		Derrière [mm]				
		35	0.3%	0.6%	2.5%	8.2%
		30	0.1%	0.7%	0.5%	5.6%
		25	5.9%	8.4%	3.2%	2.4%
		20	0.2%	1.5%	1.8%	0.0%

Figure 6.12 Erreurs entre la simulation et les essais en piste

La comparaison entre l'aeromap simulée et celle obtenue lors des essais sur piste révèle que le pourcentage d'erreur le plus élevé, à prendre en compte, est de 15 %, ce qui demeure très raisonnable. D'après les résultats, les pourcentages d'erreur les plus élevés sont observés lorsque l'avant de la voiture est bas et l'arrière est haut, une configuration pour laquelle la voiture n'est pas conçue, ce qui explique la disparité entre la simulation et la réalité.

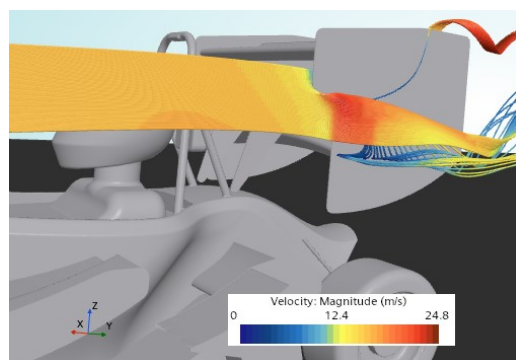
Cette cohérence renforce la validité du modèle de simulation, confirmant ainsi sa capacité à reproduire fidèlement le comportement aérodynamique du véhicule dans des conditions réelles.

6.2.2 Validation visuelle

Lors de la visualisation des flux d'air sur l'aileron arrière, des effets similaires ont été observés tant en soufflerie que dans la simulation numérique pour une même colonne de fluide. Bien que la comparaison soit seulement visuelle et non basée sur des aspects physiques ou mathématiques, elle renforce notre confiance dans la représentation aérodynamique de notre modèle.



a) Visualisation par fumée

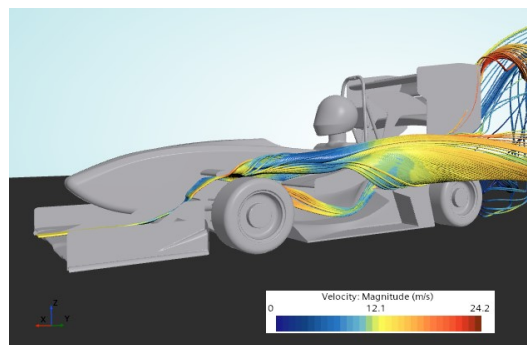


b) Simulation numérique

Figure 6.13 Flux incident sur l'aileron arrière



a) Visualisation par fumée



b) Simulation numérique

Figure 6.14 Circulation des flux autour des ailerons latéraux

Les ailerons latéraux de la voiture ont été conçus pour diriger l'air efficacement de l'avant à l'arrière du véhicule. Cependant, des tests numériques et en soufflerie ont révélé qu'ils n'étaient pas aussi efficaces qu'ils auraient dû l'être. Le problème découle d'une conception basée sur

un modèle non vérifié utilisé lors de la saison 2022-2023, ce qui a conduit à des perturbations aérodynamiques telles que des décrochages et des turbulences inattendues.

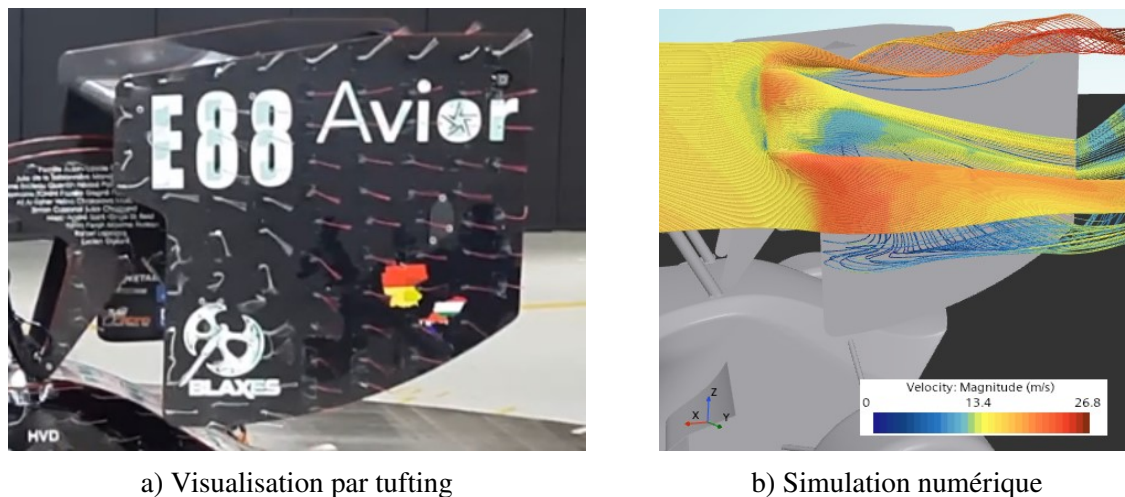


Figure 6.15 Visualisation du décrochage sur le montant de l'aileron

Nous avons observé un important décollement de la couche limite sur le montant de l'aileron arrière, similaire aux problèmes rencontrés avec les ailerons latéraux. En utilisant la méthode du tufting, nous avons confirmé ce phénomène et cherché à comprendre ses causes et ses conséquences aérodynamiques.

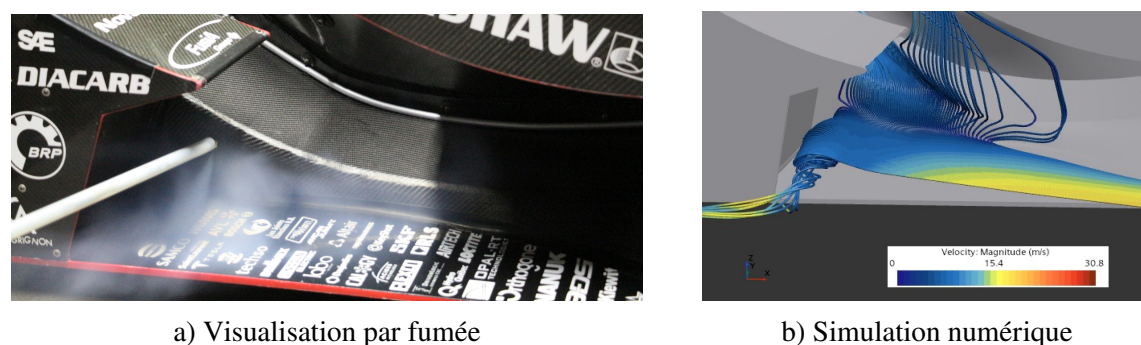


Figure 6.16 Visualisation de la recirculation sur la jupe

Pour confirmer la validité de notre modèle et approfondir notre compréhension des problèmes aérodynamiques, nous avons simulé numériquement le jet de fumée qui avait révélé une recirculation importante des fluides devant les radiateurs. Une fois de plus, notre modèle a démontré sa précision en reproduisant fidèlement les résultats des tests de tufting et de soufflerie.

6.3 Application des résultats à des problèmes d'ingénierie réels

Les simulations CFD d'une voiture en ligne droite jouent un rôle essentiel dans le domaine de la conception automobile. Ces simulations fournissent une large banque de données sur le comportement aérodynamique du véhicule, telles que la résistance à l'air, la traînée et la portance, qui sont essentielles pour optimiser les performances sur la piste.

Une des principales applications de ces résultats est la conception de véhicules plus efficaces sur le plan énergétique. En comprenant comment l'écoulement d'air interagit avec différentes parties de la voiture, les ingénieurs peuvent ajuster la conception pour réduire la traînée et améliorer ainsi l'efficacité énergétique, ce qui se traduit par une meilleure économie de carburant et des émissions réduites. De plus, cette optimisation peut permettre de réduire la taille de la batterie nécessaire, entraînant une diminution du poids du véhicule et de l'utilisation de matières premières.

De plus, l'analyse des résultats des simulations CFD permet d'optimiser la stabilité et la tenue de route du véhicule, en particulier à des vitesses élevées. En identifiant les zones de turbulence et de séparation de l'écoulement d'air, les ingénieurs peuvent apporter des modifications au design pour améliorer la stabilité directionnelle et réduire les risques de dérapage ou de perte de contrôle.

6.4 Améliorations potentielles

Une amélioration potentielle majeure serait d'intégrer des simulations en virages. Actuellement, de nombreuses simulations CFD se concentrent sur les performances en ligne droite, mais l'ajout de simulations en virages permettrait de capturer les interactions complexes entre

l'aérodynamique et la dynamique du véhicule dans des conditions de conduite plus réalistes. Puis en se basant sur les données recueillies lors des saisons précédentes, la prochaine étape du projet consisterait à analyser les configurations de véhicules les plus courantes en compétition afin de mieux comprendre les variations des rayons de virage et des vitesses à simuler. Ensuite, il serait utile d'étudier différents angles de roulis sur le véhicule pour évaluer comment la plate-forme aérodynamique réagit à ces variations. Ces informations aideraient l'équipe à choisir les ressorts appropriés pour obtenir le meilleur compromis entre maniabilité et contrôle de la plate-forme aérodynamique.

CHAPITRE 7

MÉTHODOLOGIE DE LA SIMULATION EN VIRAGE

Dans le cadre des épreuves de la compétition Formule SAE, la démonstration de la tenue de route est moins prépondérante lors de l'épreuve de ligne droite, contrairement aux autres épreuves qui mettent en évidence son importance dans les virages. Le chapitre à venir introduit la simulation en virage qui est l'objectif principal de ce projet.

7.1 Rappel des modes d'un objet

Comme expliqué dans la figure 3.1, au chapitre 3, un objet possède plusieurs modes qui permettent de qualifier ses mouvements autour d'un repère tridimensionnel, qu'ils soient de translation (selon un axe) ou de rotation (autour d'un axe).

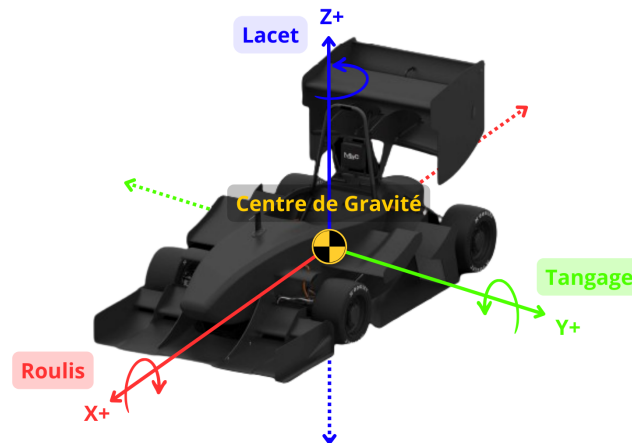


Figure 7.1 Convention décrivant les modes d'un objet

Si par le passé le seul mode utilisé était la translation en X pour la simulation en ligne droite, le mouvement désormais réalisé dans la simulation en virage est plus complexe, la voiture ayant un mouvement de roulis et de lacet quand elle effectue un virage, un mouvement dont l'importance doit être étudiée pour comprendre si elle peut ou doit être négligée.

7.2 Domaine du problème

L'appui aérodynamique en compétition de Formula SAE, en particulier dans les virages, représente un élément fondamental pour maximiser la performance et la sécurité d'un prototype. Il permet d'exploiter au mieux le potentiel des voitures de course, en offrant une adhérence supplémentaire, une stabilité améliorée et une répartition des charges optimisée. La figure 7.1 illustre que le pilote passe plus de 75% du temps à un angle de braquage supérieur à 10 degrés. Ainsi, les équipes FSAE sont confrontées à un défi majeur : optimiser la performance de leurs véhicules dans les virages, où la dynamique aérodynamique et la répartition des forces sont cruciales.

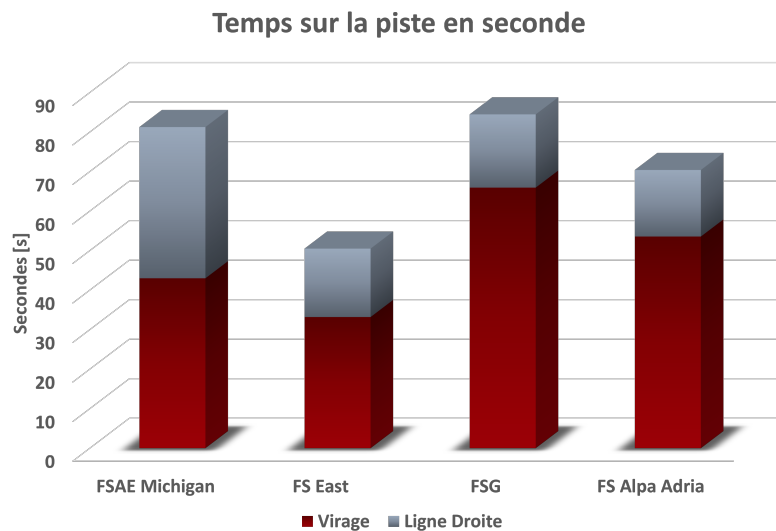


Figure 7.2 Comparaison du temps passé en virage et en ligne droite sur différents circuits

7.3 Simulation avec mouvement de lacet

Le premier pas vers la modélisation de simulations de virage consiste à effectuer des simulations avec un mouvement de lacet. En simulant ce mouvement, il est possible d'étudier comment le flux d'air interagit avec le véhicule lorsqu'il change de direction et comprendre les forces aérodynamiques impliquées dans le virage.

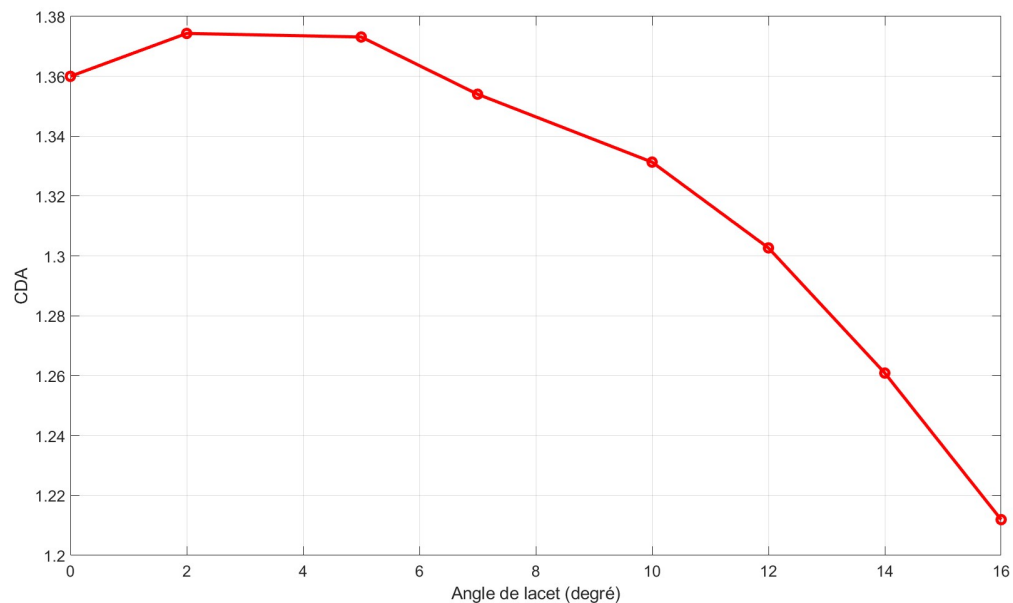


Figure 7.3 Étude de la sensibilité aérodynamique avec un mouvement de lacet

Lorsque l'angle de lacet augmente, la surface frontale effective de la voiture exposée au flux d'air augmente, ce qui devrait théoriquement augmenter la valeur de CDA. Cependant, la nature des ailerons composant la voiture relie étroitement le CDA au CLA, ce qui implique donc une baisse plus forte du CDA liée à la baisse du CLA face à l'augmentation de CDA liée à l'augmentation de surface.

Le coefficient d'appui aérodynamique (CLA) diminue lorsque l'angle de lacet augmente en raison de l'effet de réduction de la force de portance latérale générée par la voiture. D'autre part le mouvement de lacet réduit l'efficacité des éléments ne faisant pas face à l'écoulement, ce qui réduit également l'appui et la traînée qu'ils génèrent.

Par conséquent, les forces aérodynamiques sont influencées par le mouvement en lacet de la voiture, et cette influence risque d'être plus prononcée dans des simulations en virage où d'autres mouvements s'ajoutent. Ces influences ont pu être vérifiées lors des essais en soufflerie qui ont prouvé des résultats similaires

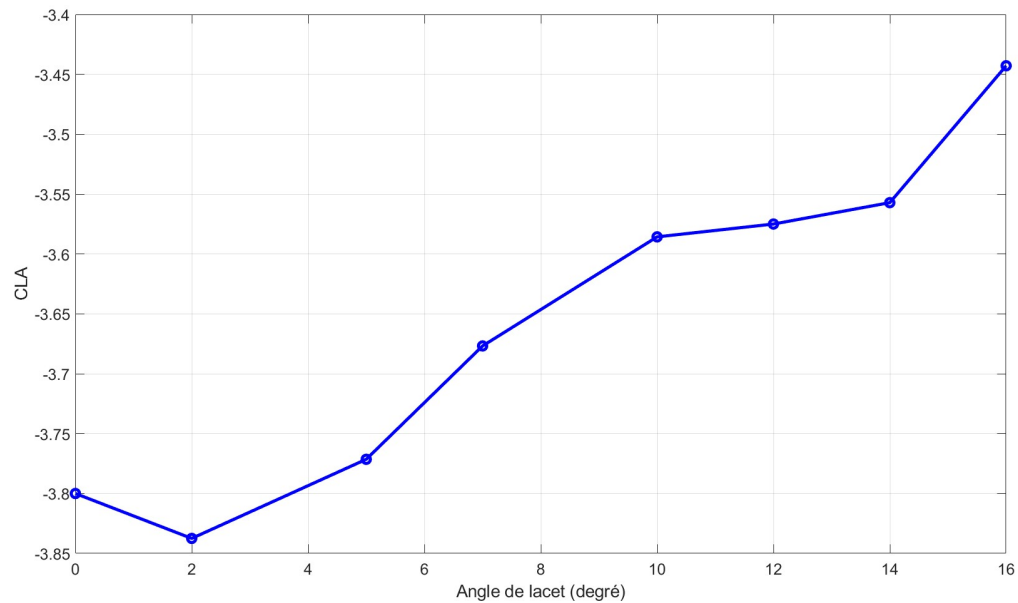


Figure 7.4 Étude de la sensibilité aérodynamique avec un mouvement de lacet

7.4 Caractéristiques géométriques

Dans les simulations en ligne droite, la symétrie permettait de réduire la complexité du modèle en ne considérant qu'une moitié de la voiture, puis en extrapolant les résultats pour obtenir une vision complète.

Cependant, dans le contexte actuel, où des virages et des situations non symétriques sont pris en compte, cette simplification n'est plus valide. Ainsi, pour une compréhension précise du comportement de la voiture, il est impératif d'utiliser un modèle complet.

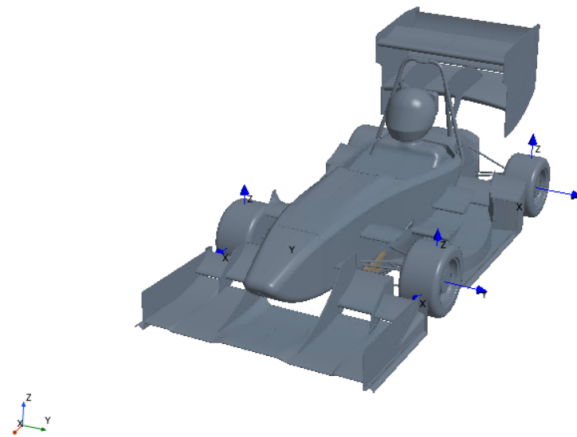


Figure 7.5 Modèle complet de la voiture de course MANIC24

En ce qui concerne le domaine du virage, il a été créé dans le modelleur de CAO de STAR-CCM+ de manière à pouvoir générer rapidement des paramètres de conception pour mettre à jour la dimension du domaine selon les rayons de virage souhaités.

Afin de prendre en compte les besoins inhérents à la simulation en virage, il est important de retravailler la géométrie du domaine considéré. En effet, le flux incident suit désormais une trajectoire circulaire dans le référentiel de la voiture, contre une trajectoire linéaire précédemment. En conséquence, le domaine qui était de prime abord rectangulaire doit maintenant prendre une forme circulaire.

7.5 Choix des équations

En ce qui concerne le modèle d'équation, celui-ci ne diffère pas du cas en ligne droite. Le modèle de fermeture sélectionné pour résoudre les équations RANS est K-Omega SST.

7.6 Description des paramètres physiques

7.6.1 Création de Paramètres Globaux

Afin de simplifier la mise en place de la méthodologie de virage, une série de paramètres ont été établis :

- g , accélération gravitationnelle, valeur : 9.81 m/s
- a_c , l'accélération latérale désirée, définition : (par exemple 2.2G)
- cg_x , représente la répartition de masse 0,4879
- empattement, tel que ci-dessus pour les définitions de domaine, par exemple 1.55 m
- Rayon, rayon de virage, par exemple 10 m
- XX_{Rad} , distance du centre de rotation à chaque pneu,
- $Rayon_{pneu}$, rayon du pneu en mètres, par exemple 0.2032m
- V , la vitesse tangentielle au centre de gravité dérivée de la voiture
- Ω_{XX} , vitesse de rotation pour le pneu XX
- Ω , vitesse de rotation au centre de gravité de la voiture

Le paramètre V est d'une importance particulière pour la normalisation dans tous rapport de coefficients dépendant de la vitesse du flux d'air.

7.6.2 Vitesse angulaire des roues

Dans une simulation de virage prenant en compte la vitesse au centre de gravité (CG) du véhicule et le rayon de courbure du virage, la vitesse tangentielle au niveau de chaque roue peut être calculée de la manière suivante.

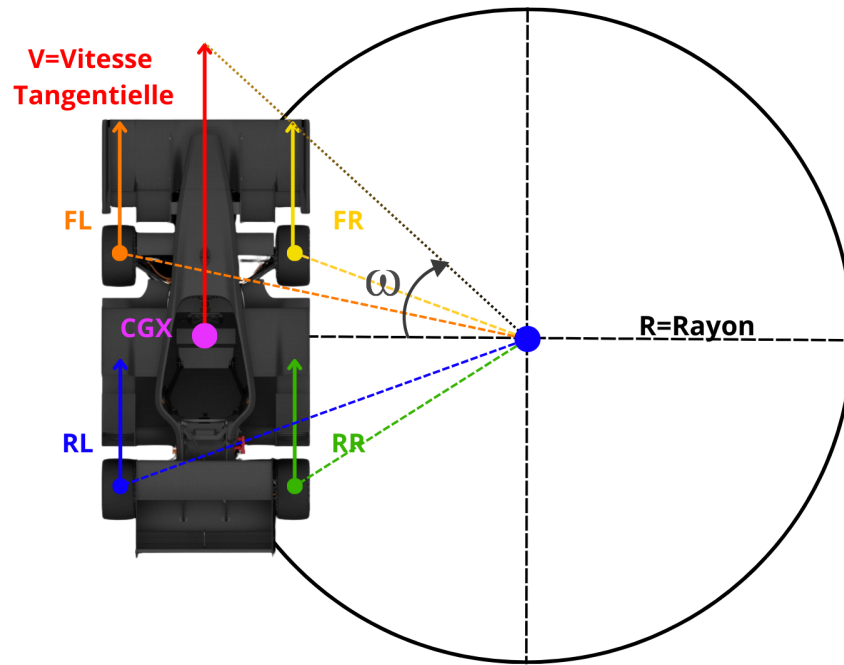


Figure 7.6 Définition des grandeurs utiles au calcul des vitesses angulaires des roues

La vitesse au centre de gravité (CG) du véhicule est la vitesse moyenne d'un skipad (une des épreuve fixe des compétitions).

$$V = 40\text{km/h} = 11\text{m/s} \quad (7.1)$$

Le rayon de virage est de 10m. De par ses éléments, il est possible de déterminer la vitesse angulaire au centre de gravité de la voiture :

$$\Omega = \frac{V}{R} = 1.1 \text{ rad/s} \quad (7.2)$$

Maintenant que la vitesse angulaire de la voiture autour du centre du virage est connue, il est possible d'utiliser la même équation pour calculer les vitesses tangentielles de chaque roue,

étant donné que le rayon est disponible pour chacune d'elles.

$$V_{FL} = \Omega \cdot R_{FL} = 11.605 \text{ m/s} \quad (7.3)$$

$$V_{FR} = \Omega \cdot R_{FL} = 10.350 \text{ m/s} \quad (7.4)$$

$$V_{RF} = \Omega \cdot R_{FL} = 11.660 \text{ m/s} \quad (7.5)$$

$$V_{RR} = \Omega \cdot R_{FL} = 10.406 \text{ m/s} \quad (7.6)$$

En connaissant la vitesse tangentielle de chacune des roues, il est alors possible de déterminer leur vitesse angulaire, étant donné que le rayon du pneu est également une variable connue.

$$\Omega_{FL} = \frac{V_{FL}}{R_{FL}} = 57.112 \text{ rad/s} \quad (7.7)$$

$$\Omega_{FR} = 50.944 \text{ rad/s} \quad (7.8)$$

$$\Omega_{RF} = 57.385 \text{ rad/s} \quad (7.9)$$

$$\Omega_{RR} = 51.210 \text{ rad/s} \quad (7.10)$$

Les roues extérieures ont une vitesse angulaire plus élevée que les roues intérieures. En effet, lorsqu'un véhicule prend un virage, les roues extérieures parcourent une distance plus longue que les roues intérieures. Pour maintenir la cohérence de la vitesse de rotation du véhicule, les roues extérieures doivent donc tourner plus rapidement que les roues intérieures.

D'autre part, ces rotations ne s'effectuent plus autour de l'axe Y propre aux roues, celles-ci étant désormais braquées comme elles le seraient en virage. Ceci impacte fortement le sillage généré par les roues qui ne sera plus majoritairement longitudinal.

7.6.3 Référentiels spécifiques

La création d'un système de coordonnées cartésiennes pour chaque roue est nécessaire pour suivre avec précision les mouvements et les orientations de chaque roue par rapport au véhicule

dans son ensemble. Ces systèmes de coordonnées permettent de définir un cadre de référence local pour chaque roue, ce qui facilite l'analyse et la modélisation des mouvements et des interactions de chaque roue avec le sol et avec le reste du véhicule.

Ces repères permettent également une rotation simplifiée des roues selon l'axe Z de leur repère lors de la préparation du calcul, afin de simuler le braquage des roues, inhérent à une situation de virage.

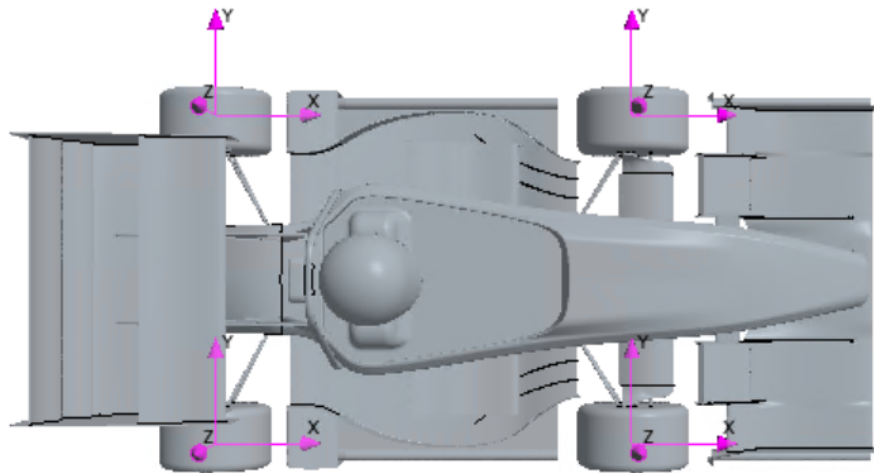


Figure 7.7 Systèmes de coordonnées propres aux roues

7.6.4 Rotating Reference Frames

Le virage est modélisé comme un domaine en forme de demie cercle à travers lequel le véhicule tourne, dans un référentiel en mouvement (MRF). Une vitesse d'entrée de zéro est spécifiée, car le mouvement du fluide est généré par le déplacement du véhicule.

La dernière étape consiste à créer le référentiel en rotation.

En mécanique des fluides numérique (CFD), les Rotating Reference Frames (cadres de référence en rotation) représentent une avancée majeure dans la modélisation des phénomènes

aérodynamiques, surtout pour les simulations automobiles en virage. Ils offrent une méthode sophistiquée pour tenir compte de la rotation du véhicule en mouvement dans l'analyse des flux d'air.

Dans un virage à grande vitesse, diverses forces complexes entrent en jeu. La rotation du véhicule produit des forces de Coriolis et centrifuges qui influent sur le comportement de l'écoulement d'air autour de la carrosserie.

Les simulations basées sur les Rotating Reference Frames permettent de capturer précisément ces phénomènes aérodynamiques spécifiques aux virages, aidant les ingénieurs à obtenir des résultats plus réalistes et à mieux comprendre les performances aérodynamiques du véhicule.

Cependant, lors de l'utilisation d'un mouvement de référence circulaire, il faut être vigilant quant à l'intervention de la force de Coriolis. En effet, dans certains cas, elle ne peut être négligée et doit être prise en compte dans la simulation numérique. Elle se traduit par :

$$\left[\frac{dV}{dt}\right]_R = \left[\frac{d}{dt}(\Omega \cdot r)\right]_R + \left[\frac{dV'}{dt}\right]_R \quad (7.11)$$

Le modèle étant un modèle stationnaire, aucune variable de vitesse ne dépend du temps. De plus, le mouvement du véhicule est effectué à une vitesse relativement faible et à un petit rayon de virage, rayon qui reste constant, l'effet de la force de Coriolis peut être négligeable et donc exclu du modèle sans compromettre de manière significative la précision des résultats.

7.7 Spécification des conditions aux limites

Dans le contexte rotatif, STAR-CCM+ considère dorénavant que tous les corps présents dans la simulation sont en rotation, ce qui signifie que le mouvement de chaque région est stationnaire par rapport à ce cadre de référence.

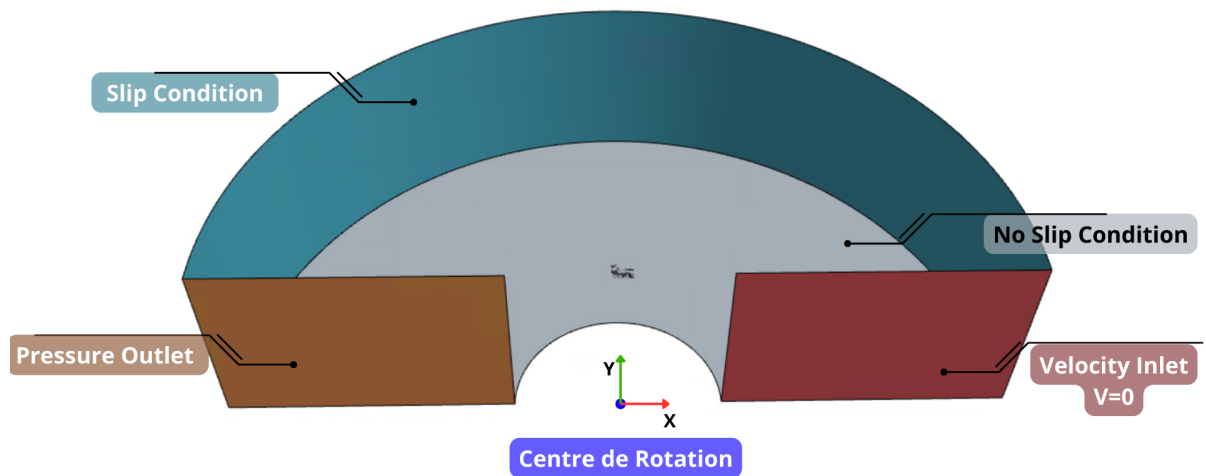


Figure 7.8 Détail des conditions aux limites du domaine en virage

Pour les conditions des parois sur les côtés et le haut, celles-ci sont considérées comme des parois glissantes, une slip-condition.

Le sol est caractérisé comme une surface avec une paroi sans glissement, mais sans vitesse tangentielle spécifique, puisque c'est la voiture qui se déplace et non l'air.

En ce qui concerne la condition de limite d'entrée, la vitesse doit être de 0 m/s et la sortie de pression doit être réglée sur les conditions par défaut.

Par la suite, des vitesses de rotation locales sont attribuées à chaque roue, avec leur mouvement axé autour de l'axe Y du référentiel propre = chaque roue, chacune possédant ses propres vitesses de rotation et son angle de braquage.

7.8 Maillage

Tous les travaux réalisés sur l'étude en ligne droite, notamment les calculs de couches prismatiques sont ici réutilisés pour mailler le domaine circulaire. La différence principale réside en fait dans le raffinement de ce maillage.

En effet, le sillage du véhicule n'est plus rectiligne comme précédemment, mais a un mouvement circulaire. Il faut donc adapter les boîtes de raffinement pour tenir compte de cette modification afin de conserver des résultats assez précis dans le sillage du prototype.

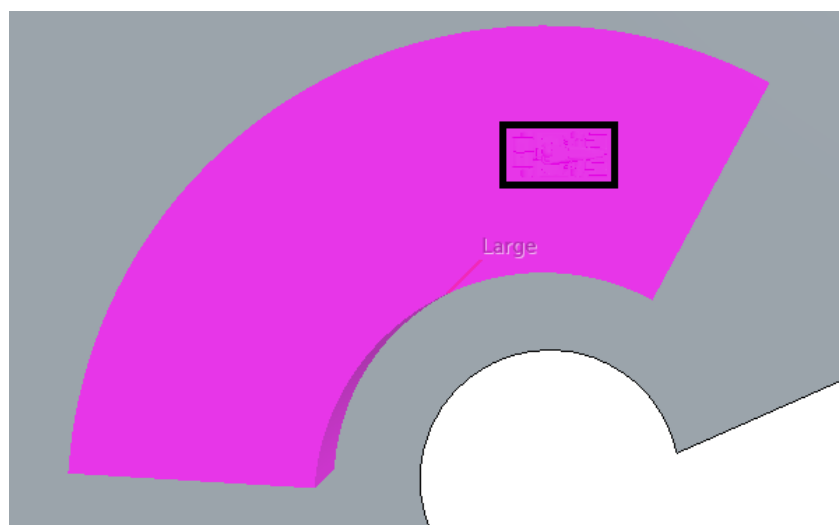


Figure 7.9 Espace de raffinement en virage

Bien que simplifié, ce raffinage permet d'avoir des résultats consistants et fiables, et amenant une convergence suffisante à notre étude.

Finalement, la méthodologie en virage reprend une majorité des éléments de la simulation en ligne droite, mais avec suffisamment de spécificités pour ouvrir un nouveau monde à étudier et à optimiser pour obtenir un modèle à la fiabilité maximale, pour ensuite optimiser le prototype grâce à de nouveaux paramètres.

CHAPITRE 8

ANALYSE DES RÉSULTATS (VIRAGE)

Il s'agira ici de visualiser et comprendre les enjeux liés à la simulation en virage, mais aussi de commencer à les quantifier pour comprendre dans quelle direction le modèle doit évoluer, et surtout dans quelle direction la conception du prototype de course doit avancer.

8.1 Introduction de nouveaux coefficients

Face aux nouvelles forces mises en jeu par l'état de virage, de nouveaux coefficients relatifs à la portée latérale du mouvement utiles à notre étude doivent être créés pour être comparés et analysés.

8.1.1 CSA - Coefficient de tangage

Le coefficient de tangage (CSA) vient compléter le CLA et CDA qui, de la même manière viennent caractériser l'action d'une normale du véhicule face à l'écoulement de l'air. Il est lié à la force de dérive.

Également connue sous le nom de "force latérale", c'est une composante de la force aérodynamique qui agit latéralement sur un véhicule en mouvement. Cette force agit perpendiculairement à la direction de déplacement du véhicule et peut avoir un impact significatif sur sa tenue de route et sa stabilité en virage.

En aérodynamique automobile, la force de dérive est souvent exploitée pour améliorer la stabilité et la maniabilité d'un véhicule en virage. Les concepteurs de voitures de course utilisent des éléments aérodynamiques tels que les ailerons, les spoilers et les diffuseurs pour générer délibérément de la force de dérive. Cependant, il est important de noter que la force de dérive peut également avoir des effets indésirables si elle n'est pas correctement gérée, comme des sur-contraintes sur des éléments aérodynamiques non dimensionnés pour résister à des forces latérales trop fortes.

Elle est définie par :

$$F_S = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_S \quad (8.1)$$

avec :

- C_S : coefficient de tangage,
- $C_{SA} = C_S * A$

8.1.2 AB-Y - Balance Aérodynamique Transversale

De manière analogue à la balance aérodynamique longitudinale vue en section 3.2, l'étude de l'équilibre transversal du prototype nous amène à chercher une relation qui permettrait de déterminer la proportion de l'appui aérodynamique s'appliquant sur la partie intérieure ou extérieure de la voiture quand elle passe en condition de virage.

Un nouveau coefficient de balance est donc intégré pour étudier ces proportions. Par convention, les roues intérieures sont utilisés comme référentiel de proportions. Il est défini tel que :

$$F_{interieur} = \frac{Moment_{interieur}}{Largeur} \quad (8.2)$$

Ainsi, la force résultante sur les roues intérieures est utilisée pour calculer le pourcentage de la force d'appui exercée sur l'intérieur de la voiture.

$$\%F_z = \frac{F_{interieur}}{F_z} \quad (8.3)$$

Finalement, le recoupement de la Balance Aérodynamique Longitudinale (AB-X) et de la Balance Aérodynamique Latérale (AB-Y) permet de déterminer l'exacte position du centre des pressions sur lequel s'appliquent les résultantes des efforts aérodynamiques qui s'exercent sur la totalité de la voiture.

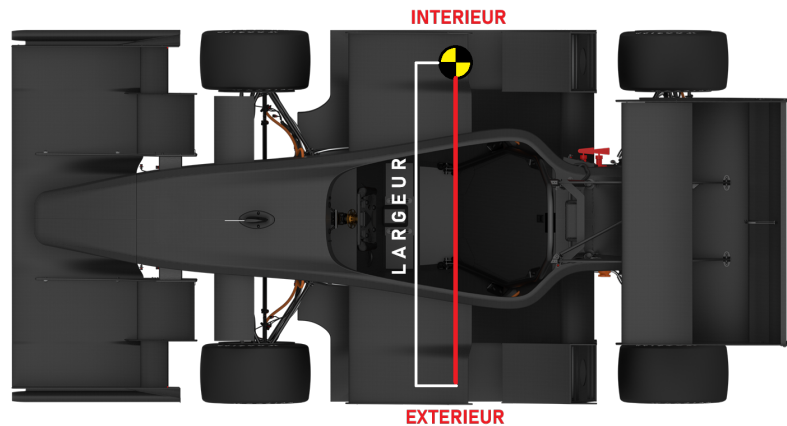


Figure 8.1 Longueurs utiles au calcul de l'AB-Y

8.2 Asymétrie du modèle

Par construction, ce modèle n'admet plus d'axe de symétrie comme le modèle de la ligne droite. Cette asymétrie s'étend également aux profils des vitesses qui doivent donc être analysés en conséquence. Les résultats seront ensuite comparés à une simulation en ligne droite à vitesse équivalente.

8.2.1 Spécificités et validation de la simulation en virage

Avant de débiter l'analyse, il est fondamental de s'assurer que la simulation qui la supportera semble concorder avec les besoins de cette étude.

Une première manière de s'en assurer passe par l'étude du sillage, car celui-ci permet de visualiser le mouvement relatif de l'air par rapport à la voiture et les effets que cette dernière a eu sur l'écoulement.

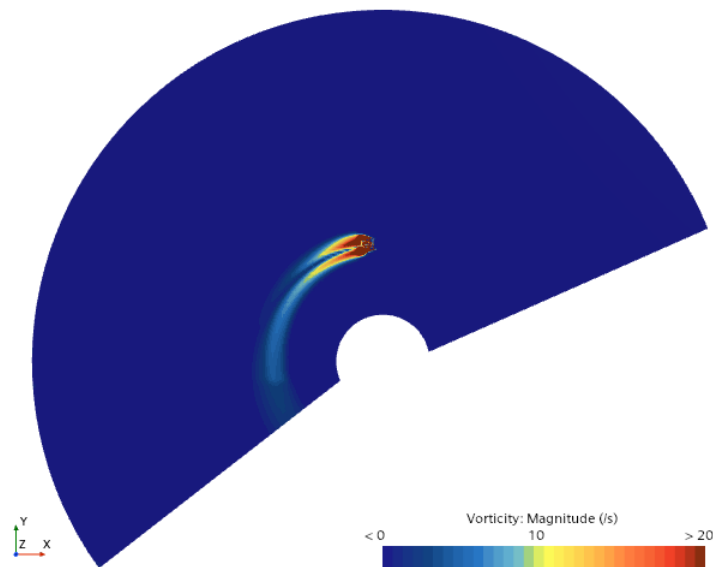


Figure 8.2 Visualisation de l'effet de sillage

Le sillage montre une influence circulaire de l'air sur la voiture, ce qui traduit un mouvement circulaire, de rayon constant, de la voiture dans un air immobile. C'est donc un modèle qui permet d'étudier un objet roulant dans un domaine en rotation, adapté à l'étude d'un prototype de FSAE en virage. Des ajustements seront cependant à prévoir, afin de parfaire ce modèle grâce à des essais qui viseront à valider ce modèle comme cela a été fait pour la simulation en ligne droite.

8.3 Tableau Général - Récapitulatif des simulations

Plusieurs simulations ont été réalisées afin de créer une comparaison, non seulement à la ligne droite, mais aussi entre différentes simulation en virage afin d'évaluer l'influence du maillage, du roulis, des radiateurs pour comprendre ce qui pouvait être négligé, la taille de la simulation étant 2 à 4x plus élevée pour une simulation en virage par rapport à son homologue en ligne droite et nécessitant d'être réduite au maximum.

La première, servant de référence à toutes les analyses aérodynamiques effectuées jusqu'alors, est la ligne droite à 16 mètres par seconde. Une seconde simulation en ligne droite, à 11 mètres par seconde, a été calculée afin d'avoir une vitesse similaire à celle rencontrée en virage.

Ainsi, 3 simulations en virage ont été retenues pour analyses et comparaisons :

- Cornering Itération 1, une simulation simple ne prenant en compte que le caractère courbé de l'air, et l'inclinaison des roues avant (15 degrés à l'extérieur, 10 degrés à l'intérieur).
- Cornering Itération 2, à laquelle est ajoutée l'étude des radiateurs, qui jusque là étaient considérés comme des parois étanches.
- Cornering Itération 3, la simulation la plus complète, prenant en compte les effets dynamiques comme le roulis.

Tous les résultats de ces simulations sont enfin compilés dans un tableau récapitulatif qui servira de référence à toutes les analyses et comparaisons quantitatives.

		Front Wing		Rear Wing		Side Wing		Monocoque		Undertray		Wheels		Total	AeroBalance X	AeroBalance Y
		Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right			
Straight 16m/s	CDA	0.119	0.119	0.322	0.322	0.028	0.028	0.134	0.134	0.028	0.028	0.047	0.047	1.35466	49.80%	
	CLA	-0.611	-0.611	-0.514	-0.514	-0.031	-0.031	-0.280	-0.280	-0.309	-0.309	0.026	0.026	-3.43768		
Straight 11m/s	CDA	0.252	0.252	0.659	0.659	0.059	0.059	0.284	0.284	0.057	0.057	0.092	0.092	2.80661	50.99%	
	CLA	-1.302	-1.302	-1.061	-1.061	-0.066	-0.066	-0.572	-0.572	-0.635	-0.635	0.077	0.077	-7.11636		
Cornering Ité. 1	CDA	0.268	0.237	0.741	0.667	0.139	0.123	0.941	0.941	0.284	0.250	0.010	0.025	3.68411	47.70%	67.99%
	CSA													-0.18389		
Cornering Ité. 2	CLA	-1.135	-0.986	-0.939	-0.872	-0.184	-0.161	-0.623	-0.623	-0.460	-0.510	0.014	-0.007	-5.86410	47.38%	67.55%
	CDA	0.265	0.230	0.735	0.650	0.123	0.119	0.952	0.952	0.142	0.128	0.018	0.032	3.39358		
Cornering Ité. 3	CSA													-0.23631	46.49%	67.62%
	CLA	-1.150	-0.980	-0.962	-0.885	-0.154	-0.159	-0.746	-0.746	-0.460	-0.404	0.041	0.030	-5.82840		
Cornering Ité. 3	CDA	0.267	0.229	0.712	0.655	0.125	0.118	0.931	0.931	0.168	0.138	0.027	0.043	3.41380	46.49%	67.62%
	CSA													-0.28641		
Cornering Ité. 3	CLA	-1.131	-0.915	-0.963	-0.883	-0.141	-0.141	-0.808	-0.808	-0.503	-0.496	0.030	0.043	-5.90778		
	CSA													-0.28641		

Figure 8.3 Tableau Récapitulatif des valeurs obtenues

8.4 Analyses et comparaisons

Il s'agira ici de réaliser toutes les analyses et comparaisons pertinentes afin de déduire si oui ou non ce modèle répond aux exigences du projet, et s'il serait utilisable dans un contexte d'optimisation de FSAE.

8.4.1 Comparaison à la ligne droite

Dans un premier temps, il est fondamental de comparer l'influence même du passage en virage sur les effets aérodynamiques externes. Pour cela il était important de calculer un modèle ligne droite où la vitesse du véhicule est similaire à celle de la simulation en virage, soit 11 mètres par seconde.

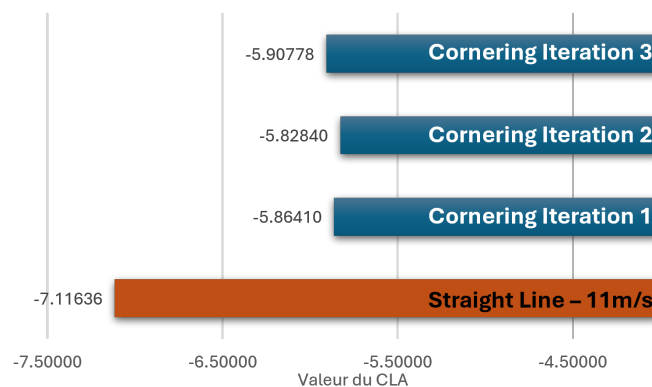


Figure 8.4 Influence de la simulation sur le CLA

Si les différentes itérations de simulation en virage semblent ne pas influencer le coefficient d'appui aérodynamique, la différence entre les simulations en virage et la simulation en ligne droite est flagrante avec une perte de près de 17% de l'appui aérodynamique lors du passage d'un virage à vitesse égale. Ceci était cependant prévisible dans la mesure où le prototype n'a été conçu et optimisé qu'à partir de simulations en ligne droite. D'un autre côté, l'incidence de l'écoulement augmente artificiellement la surface effective du prototype, ce qui devrait théoriquement augmenter l'appui généré. Ces surfaces devront donc être ré-optimisées pour ne plus n'être adaptées qu'aux lignes droites.

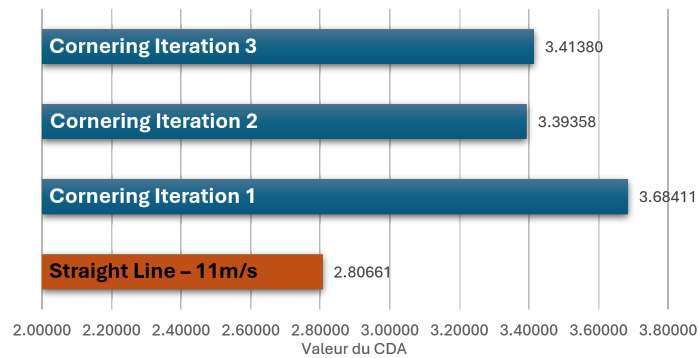


Figure 8.5 Influence de la simulation sur le CDA

De manière inverse, on remarque ici une augmentation du CDA lors du passage en virage du véhicule. Ceci étant dû au principe énoncé précédemment de l'augmentation artificielle de la surface frontale du véhicule, se traduisant par une augmentation nette de sa traînée. Par ailleurs, on remarque une certaine différence entre les Itération 2,3 et l'Itération 1 de la simulation en virage au niveau de la valeur de CDA. Ceci est exclusivement dû à la modification des conditions aux limites du radiateur, celui-ci laissant passer de l'air et réduisant la traînée globale du prototype.

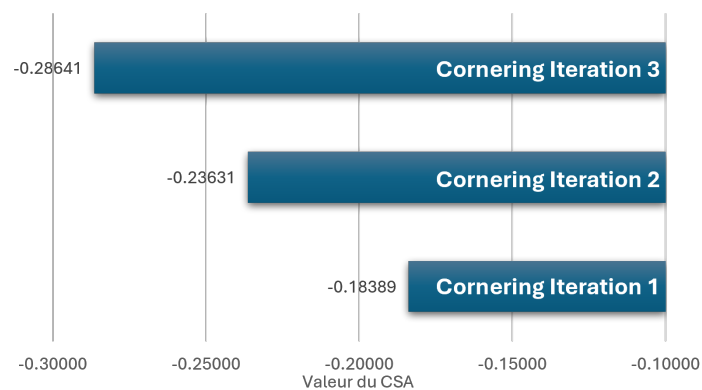


Figure 8.6 Influence de la simulation sur le CDA

Finalement, l'étude du CSA montre que c'est effectivement le coefficient qui varie le plus d'une simulation en virage à une autre selon ses conditions. Ici on ne s'intéresse pas à la simulation en ligne droite, celle-ci étant symétrique par construction, le CSA y vaudrait exactement 0.

Face à l'évolution de ces valeurs, il semblerait que plus la simulation s'éloigne d'un cas symétrique (par exemple en ajoutant les mouvements de tangage, roulis, lacet), plus la valeur de CSA augmente. Des essais plus poussés seront nécessaires afin de voir si la valeur de CSA continue d'augmenter en fonction de la fidélité de la simulation, et vers quelle valeur celle-ci tend si c'est le cas.

8.4.2 Visualisation des différences intérieur-extérieur

Afin de visualiser ces différences entre le côté intérieur et extérieur du prototype en virage, il est possible de réaliser des coupes centralisant la majorité des ailerons présents sur la voiture. L'intérieur est défini comme le côté le plus proche du centre de rotation, en l'occurrence le côté droit de la voiture dans ces simulations.

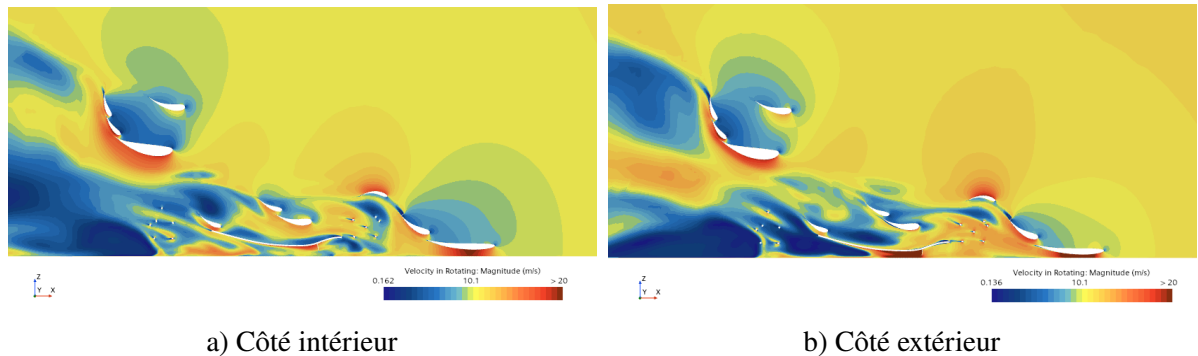


Figure 8.7 Différences dans les profils des vitesses en virage - latéral

Des différences sont clairement remarquables entre le côté intérieur et extérieur au niveau des profils des vitesses.

Ces différences sont majoritairement dues à la trajectoire courbée du flux incident, mais également au fait que la distribution des vitesses s'écoulant sur la voiture n'est pas constante, impliquant

une vitesse plus faible sur le côté intérieur et plus élevée sur le côté extérieur, visibles sur les deux coupes ci-dessus.

Il est également possible de voir des pressions plus élevées sur la partie intérieur-avant, dues au caractère tournant de la simulation.

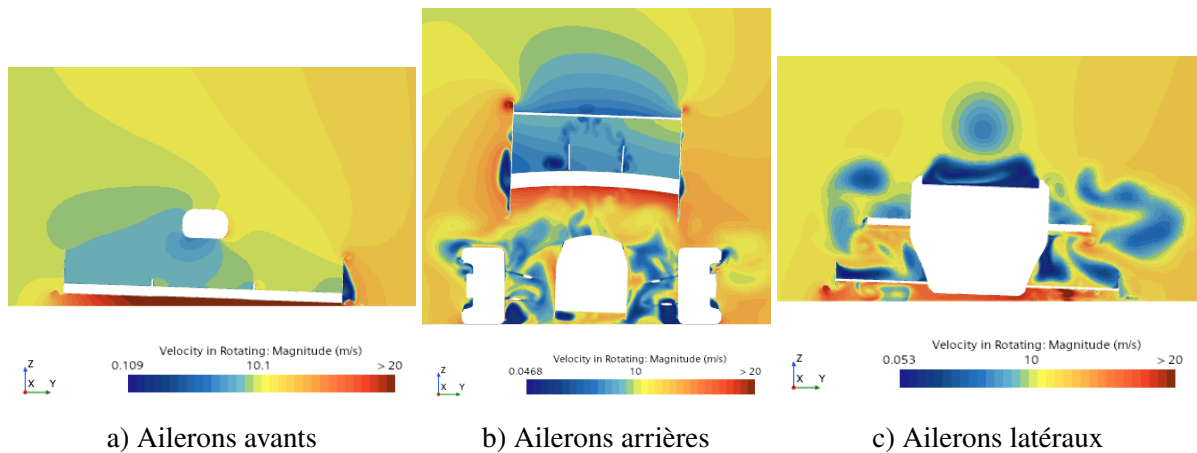


Figure 8.8 Différences dans les profils des vitesses en virage - frontal

Ces trois coupes permettent également de mettre en lumière le caractère asymétrique du modèle de simulation, et les spécificités aérodynamiques d'un véhicule en virage.

Sur l'aileron avant, il est possible de distinguer un fort décrochage sur la partie verticale en bout d'aileron, causé par l'angle entre la voiture et le fluide là où le même aileron, à l'intérieur du virage, ne présente pas de tels symptômes.

Il est également possible de voir le roulis de la voiture engendré par les forces extérieures que nous avons modélisé, et ses implications sur les flux qui l'entourent.

Enfin, et au contraire de l'aileron avant, un fort décrochage est visible sur l'empennage intérieur de l'aileron arrière, contredisant les conclusions faites ci-dessus sur l'aileron avant. Ce décrochage est en fait le même que celui visualisé sur les simulations et essais en lignes droites, et est le

résultat d'une géométrie imparfaite qui devra être réétudiée. De l'autre côté de l'aileron arrière, un décrochage est également constaté, mais est diminué par l'angle d'incidence de l'air sur l'empennage.

8.4.3 Comparaisons des valeurs droite-gauche

De par l'asymétrie du modèle, il a été possible de mettre en valeur les différences qualitatives des profils des vitesses sur les côtés de la voiture. Il s'agira maintenant de quantifier, comparer ces différences avant de les interpréter sur un plan plus pratique.

A cette fin, tous les éléments aérodynamiques sont séparés en deux par le plan XZ du référentiel de la voiture. Le côté droit est équivalent au côté intérieur, le modèle impliquant un virage à droite. La monocoque n'est assimilée ni au côté intérieur, ni au côté extérieur.

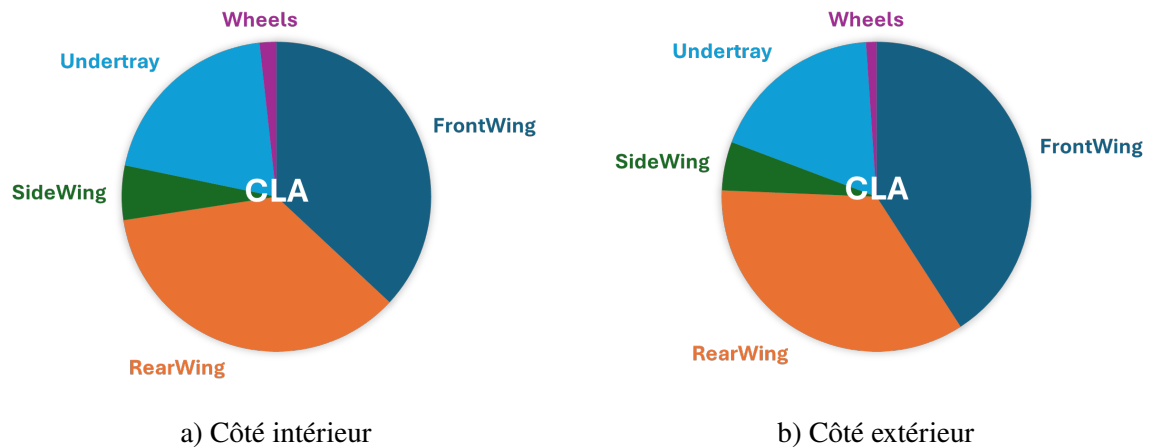


Figure 8.9 Répartition du CLA par élément

La répartition est assez semblable pour les éléments du côté intérieur et ceux du côté extérieur : les ailerons avant et arrière représente à eux deux près de 70 à 75% de la génération d'appui aérodynamique, avec une baisse relative de l'efficacité de l'aileron avant intérieur lors du virage au profit du fond plat.

Cette baisse d'efficacité de l'aileron avant peut être expliquée aussi bien par le mouvement de roulis, venant augmenter l'écart entre l'aile et le sol et donc l'efficacité de l'effet de sol, que par la zone de sur-pression créée par le nez du véhicule dans l'écoulement circulaire vue dans la figure 8.8a.

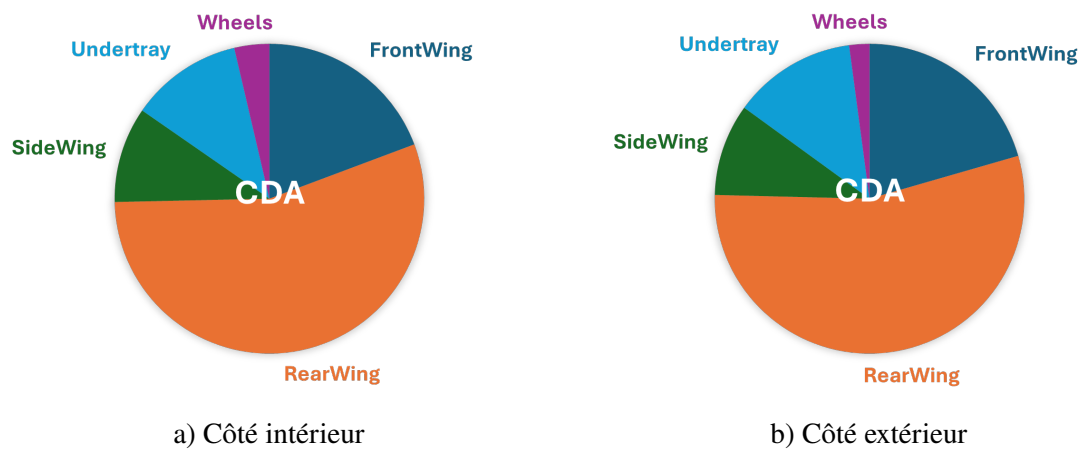


Figure 8.10 Répartition du CDA par élément

De manière similaire au CLA, la répartition du CDA entre les éléments ne diffère pas grandement entre l'intérieur et l'extérieur. Il est cependant possible de noter une différence assez nette au niveau de la traînée engendrée par le sillage des roues, celle-ci étant près de deux fois plus élevée du côté intérieur.

Cependant, afin de vraiment tirer des informations de ces précédents graphiques, il faut également évaluer les différences de production d'effets aérodynamiques entre chacun des côtés.

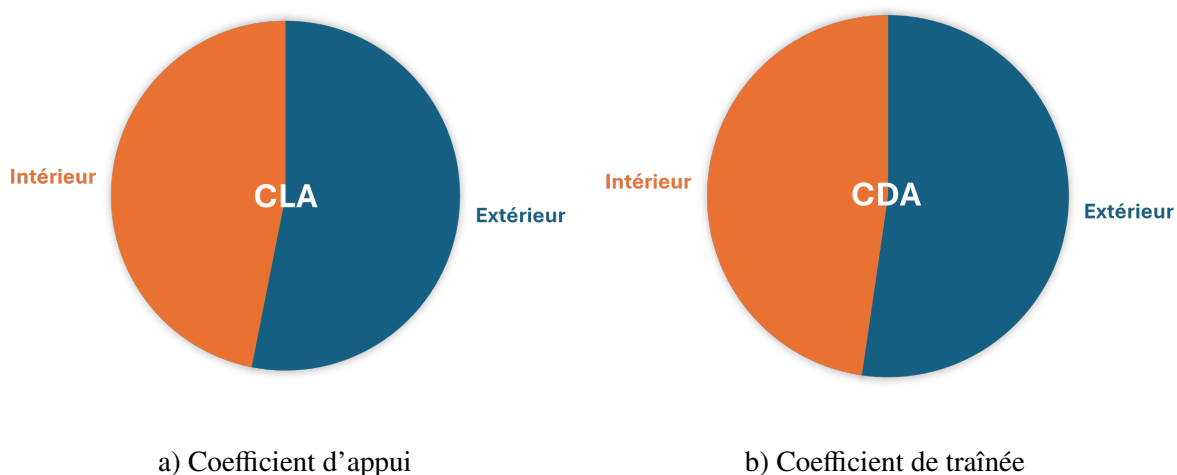


Figure 8.11 Pondérance des côtés par coefficient

Le côté extérieur du prototype semble générer plus d'effets aérodynamiques que le côté intérieur. Ceci peut sembler paradoxal puisque le côté extérieur apparaît "caché" par le véhicule dans un virage, et il serait possible de s'attendre à ce que son influence soit réduite. Cependant, il est possible que la simulation calcule que la vitesse supérieure de l'écoulement agissant sur les éléments extérieurs de la voiture permette de générer plus d'appui, mais également plus de traînée.

8.5 Interprétation des résultats

En résumé, dans le cadre d'une simulation en virage, et à l'inverse de la simulation en ligne droite, il existe un déséquilibre latéral engendré à la fois par les effets dynamiques inhérents à un véhicule de course en virage et créent une asymétrie géométrique, mais également par la création d'un gradient de vitesse de l'écoulement propre au modèle en virage, le champ des vitesses étant donc plus élevé sur l'extérieur du véhicule que sur l'intérieur.

Ce déséquilibre est quantifiable, au moyen du coefficient AB-Y défini plus tôt, et qui traduit le moment transversal. Dans le cadre des simulations en virage effectuées, il est égal à environ 67%. Recoupé avec le coefficient AB-X, égal à 48.5%, il est possible de déterminer les coordonnées

du centre de pression dans le cadre d'un virage de rayon égal à 10 mètres.

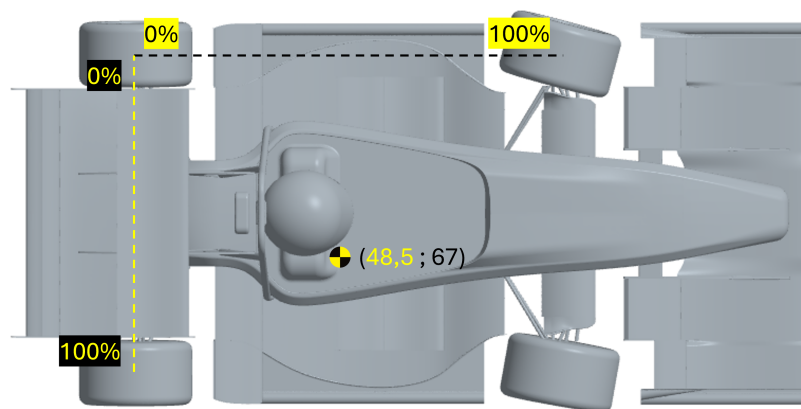


Figure 8.12 Coordonnées du centre des pressions

Si tous les résultats vus dans la section précédente impliquaient une force d'appui plus élevée sur le côté extérieur de la monoplace, il apparaît que finalement celles-ci sont plus rapprochées de la monocoque que les forces s'exerçant sur la partie intérieure, conduisant à un centre des pressions appliqué du côté intérieur. A ceci vient s'ajouter la force de dérive qui, négative, "tire" la voiture vers l'intérieur du virage.

En compétition automobile, lors d'un virage, les ingénieurs cherchent à avoir le maximum d'appui du côté extérieur, c'est à dire un AB-Y le plus faible, afin d'augmenter l'adhérence des roues extérieures et pouvoir subir une force latérale plus importante en virage avant que la voiture ne glisse (phénomène de sous-virage ou de sur-virage). Une meilleure adhérence permet également de lutter contre l'inertie, tout en augmentant le rayon maximal de braquage, permettant donc d'avoir un rayon de virage plus faible pour une même vitesse. Cependant, un AB-Y trop faible augmente le risque de renversement de la voiture, un risque qui reste très faible compte-tenu de la hauteur très faible du centre de gravité par rapport à la largeur de la voiture.

Au regard de ces informations, le coefficient AB-Y de cette simulation (si elle s'avère représentative de la réalité) est trop élevé et devrait être optimisé.

Dans un second temps, le coefficient de la force de dérive (CSA), bien que faible, aide à lutter contre l'accélération latérale en "ramenant" la voiture vers le centre de rotation du virage. Celle-ci gagnerait cependant à être augmentée en optimisant les surfaces aérodynamiques en ce sens.

En conclusion, le modèle créé semble de prime abord cohérent avec une réalité physique théorique et permet de mieux comprendre les enjeux d'une prise d'un point de vue aérodynamique.

CHAPITRE 9

PISTES D'AMÉLIORATION

Face à toutes ces analyses et conclusions, ce chapitre sert de résumé à propos de ce qui a été fait, et de ce qui doit être fait à l'avenir afin de poursuivre ces travaux, de les valider puis de les mettre en œuvre.

9.1 Modèle de simulation

Du côté de la simulation numérique, nous avons réussi à créer deux modèles de calcul.

Le premier permettant d'analyser le prototype 3D en ligne droite, issus de travaux d'années précédentes et que nous avons raffiné pour de meilleurs résultats. Ce raffinement a pu s'effectuer grâce à de nombreuses séances d'essais et de validation qui ont permis de mettre en évidence les failles du modèle CFD afin de pouvoir les corriger et d'établir un modèle cohérent et suffisamment représentatif de la réalité pour permettre son utilisation dans le cadre de la conception d'un véhicule de Formula SAE.

Le second, et le but final de ce projet, permet d'analyser le même modèle géométrique dans une situation de virage, en prenant en compte les spécificités physiques et géométriques de cette situation pour assurer une fidélité accrue, et offrir de nouvelles possibilités d'optimisation du prototype pour améliorer ses performances.

Ce modèle en virage, bien qu'il ne soit pas encore validé, présente des résultats prometteurs et cohérents comparativement à une simulation en ligne droite à vitesse équivalente. D'autres essais de validation et de vérification devront être effectués afin d'affiner ce modèle pour s'assurer de son efficacité. Ces essais incluront de nouveaux essais en soufflerie, des quadrillages de pitots et des parcours en conditions réelles.

Sur le long terme, le modèle en virage devra être standardisé et paramétré afin de permettre l'étude rapide de différents rayon de virage en fonction du rayon de virage et de la force latérale ou de la vitesse du véhicule. Ceci permettra de multiplier les simulations en fonction du tracé

d'un circuit, pour étudier l'efficacité aérodynamique du prototype sur un tour complet et donc de permettre des réglages plus fins et poussés de la voiture.

D'autres pistes d'améliorations pourraient inclure la modélisation du circuit sur le logiciel de simulation et le passage par un modèle transitoire, en dépit du temps de calcul conséquent d'une telle simulation. De manière analogue, il serait possible de créer un modèle multiphysique étudiant à la fois les effets aérodynamiques et leur couplage sur la dynamique du véhicule. Toutes ces solutions sont cependant les résultats de travaux de niveau professionnels qui ne seront peut-être pas réalisables dans le cadre d'un projet étudiant.

9.2 Modèle géométrique de la voiture

Pour le moment, l'amélioration du modèle géométrique repose sur un procédé relativement archaïque, un processus itératif où le modèle géométrique est modifié, puis analysé, de manière cyclique jusqu'à aboutir à une solution satisfaisante.

Une manière différente, plus rapide, d'atteindre un résultat satisfaisant serait d'utiliser des procédés d'optimisation topologique, ou de déformation adaptative, où il serait possible d'optimiser la forme des éléments pour maximiser la génération d'appui, ou bien la réduction de traînée. Il nous serait possible d'effectuer ce type d'optimisation à travers STAR-CCM+ grâce aux options intégrées, mais ceci pourrait faire l'objet d'un nouveau travail de recherche face à la complexité et le temps nécessaire à la réalisation de ce projet.

Quelle que soit la manière d'optimiser les éléments aérodynamiques, ceux-ci devront répondre à un cahier des charges mis-à-jour grâce aux nouvelles perspectives offerts par la simulation en virage. Ainsi, au-delà de chercher le meilleur compromis entre appui et traînée, en visant une AB-X de 50%, il faudra s'intéresser au signe et à la valeur de la force de dérive, en cherchant à minimiser l'AB-Y. Ceci devrait, en théorie, augmenter drastiquement l'efficacité aérodynamique du prototype dans les virages à forte cinétique.

Les principaux appendices aérodynamiques qui devront être analysés et modifiés à l'avenir seront les ailerons latéraux et arrières, et ceci pourra être effectué lors de la saison 2024-2025 sur le prototype qui succèdera à MANIC-24 et donc le châssis sera réétudié grâce aux méthodes mises au point dans cette étude.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

En conclusion, l'analyse approfondie de l'aérodynamique d'un véhicule de course Formule SAE est cruciale pour maximiser ses performances sur la piste. Les différents chapitres ont exploré les forces aérodynamiques, les principes fondamentaux de la mécanique des fluides appliqués au véhicule, ainsi que la méthodologie de simulation, tous étant des éléments essentiels à l'analyse des résultats.

Les simulations en ligne droite réalisées ont fourni des données sur la distribution des forces aérodynamiques, le profil de vitesse, le coefficient de pression, et d'autres paramètres essentiels. Ces résultats ont été validés par des comparaisons avec des données expérimentales obtenues lors d'essais en soufflerie et sur circuit.

En outre, des améliorations potentielles ont été identifiées, notamment l'extension de la simulation pour inclure des conditions de virage, offrant ainsi une perspective plus complète sur le comportement du véhicule dans des situations de conduite réalistes.

En étudiant les écoulements d'air autour de la voiture lorsqu'elle prend un virage à haute vitesse, les ingénieurs peuvent ajuster la conception des carrosseries, des ailerons et des diffuseurs pour maximiser l'appui aérodynamique tout en minimisant la traînée. Cela permet d'optimiser la stabilité et l'adhérence du véhicule, améliorant ainsi ses performances sur la piste. Finalement nous avons réussi à monter un modèle de simulation en virage physiquement cohérent, qu'il faudra vérifier avant de pouvoir l'utiliser dans nos travaux de conception futurs.

ANNEXE I

ANNEXE

1. Code Matlab pour determiner l'épaisseur de la première maille

```
% Freestream parameters
T_inf = 298.15; % K (Freestream temperature)
U_inf = 16; % m/s (Freestream velocity)
% Sutherland's Law constants
mu_ref = 1.715e-5; % Pa.s (Reference dynamic viscosity)
T_ref = 273.15; % K (Reference temperature)
S = 110.4; % K (Sutherland temperature)
% Freestream dynamic viscosity
mu_inf = mu_ref * (T_inf/T_ref)^(3/2) * ((T_ref + S)
/ (T_inf + S)); % Pa.s
% Freestream density
rho_inf = 1.162; % kg/m^3
% Reference length for Reynolds number (length of the car)
x = 2.881;
% Reynolds number at x (reference length)
Re = rho_inf * U_inf * x / mu_inf;
% Skin friction coefficient (Prandtl's approximation)
Cf = 0.074 / Re^(1/7);
% Wall shear stress
tau = 0.5 * Cf * rho_inf * U_inf^2;
% Friction velocity
u_star = sqrt(tau / rho_inf);
%%The Stretching Factor
r=1.5
%Wall distance :
delta_lowy=mu_inf/(rho_inf*u_star);
delta_highy=(30*mu_inf)/(rho_inf*u_star);

%Thickness Total Prism Layer
y=(x*0.16)/Re^(1/7);

%Number of layers
m_low=log10(1-(1-r)*(y2/delta_lowy))/log10(r);
m_high=log10(1-(1-r)*y2/(delta_highy))/log10(r);
```

BIBLIOGRAPHIE

- Angelidis, D. (2018). *Computational Aerodynamics Optimization of a Formula SAE Vehicle*. SAE Technical Paper.
- Ansys. (2019). *Aerodynamics Simulation and Optimization of a Formula SAE Car*. ANSYS FLUENT.
- Bhanderi, M. (2004). *Design and Optimization of a Formula SAE Car for Minimum Drag*. SAE Technical Paper.
- Blazek, J. (2001). *Computational Fluid Dynamics : Principles and Applications*. Elsevier Science Ltd.
- Carrol, J. (2019). *Computational Fluid Dynamics : Principles and Applications*. SAE Technical Paper.
- Durbin, P. & Petersson Reif, B. (2001). *Computational Fluid Dynamics : Principles and Applications*. Journal of Fluid Mechanics.
- Emmons, H. (1951). *The Laminar-Turbulent Transition in a Boundary Layer—Part 1*. Journal of the Aeronautical Sciences.
- Gillespie, T. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE International.
- Gormley, T. (2008). *Experimental and Computational Investigation of the Aerodynamics of a Formula SAE Car*. SAE Technical Paper.
- Greenshields, C. & Weller, H. (2022). *Notes on Computational Fluid Dynamics : General Principles*. CFD Direct.
- Groves, C. P. (2006). *Computational and Wind Tunnel Studies of the Aerodynamics of a Formula SAE Racecar*. SAE Technical Paper.
- Houghton, E. L. & Carpenter, P. W. (1970). *Aerodynamics for Engineering Students*. Hodder Stoughton Educational.
- Katz, J. (1996). *Race Car Aerodynamics : Designing for Speed*. Bentley Publishers.
- Katz, J. (2010). *Introductory Fluid Mechanics*. Cambridge University Press.
- Kundu, P. K. & Cohen, I. M. (2015). *Fluid Mechanics*. Academic Press.

- Mathieu, J. & Scott, J. (2000). *An Introduction to Turbulent Flow*. Cambridge University Press.
- McBeath, S. (2017). *Competition Car Aerodynamics : A Practical Handbook*. Veloce.
- Milliken, W. F. & Milliken, D. L. (1995). *Race Car Vehicle Dynamics*. SAE International.
- Pope, S. B. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.
- Roache, P. J. (1998). *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*. Hermosa Pub.
- Ruban, A. I. & Gajjar, J. S. B. (2017). *Fluid Dynamics*. OUP Oxford.
- Schlichting, H. & Gersten, K. (1979). *Boundary-Layer Theory*. McGraw-Hill Professional.
- Toh, K. (2016). *Numerical Simulation of a Formula SAE Racecar Aerodynamics*. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering.
- van Valkenburgh, P. (1993). *Race Car Engineering Mechanics*. Hp Books.
- Versteeg, H. K. & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method*. Pearson.
- White, F. M. (1974). *Viscous Fluid Flow*. McGraw Hill.
- White, F. M. (1979). *Fluid Mechanics*. McGraw Hill.
- Wilcox, D. C. (1993). *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries.