



Projet d'Ingénierie de 2^{ème} année
Arts et Métiers Campus d'Aix-en-Provence

Soutenance le jeudi 12 janvier 2023

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DU PHENOMENE DE MARSOUINAGE SUR LES F1 2022

Présenté par :

AUDIER Maxime

BEAUBIAT Arno

DELANCHY Alban

FAYNOT Guillaume

HANON Quentin

Résumé :

Le phénomène de marsouinage, aussi appelé « porpoising », apparaît sur les F1 2022 et se manifeste par une oscillation verticale des monoplaces à haute vitesse. Il a pour origine l'augmentation de l'importance de l'effet de sol dans le mix d'appui aérodynamique de la voiture. Le marsouinage entraîne une diminution de la performance globale ainsi qu'une gêne importante pour le pilote, il faut donc s'en affranchir.

Au cours du projet, nous avons d'abord scindé les aspects aérodynamiques et mécaniques du problème pour ensuite les regrouper dans une étude globale en simulant l'ensemble sur Simulink. Les études théoriques et expérimentales (CFD, expérience en soufflerie et simulation Matlab) nous ont permis de comparer des modèles pour finalement mettre en évidence le phénomène de marsouinage.

Table des matières

I.	Introduction.....	5
A.	Qu'est-ce que le marsouinage ?.....	5
B.	L'origine du phénomène.....	5
C.	Appui aérodynamique et effet de sol.....	5
II.	Définition du projet et objectifs	6
A.	Périmètre d'étude.....	7
B.	Risques du projet	7
C.	Pilotage du projet.....	7
III.	Analyse vidéo du marsouinage	8
IV.	Modèle.....	9
A.	Choix du profil d'aile	10
B.	Caractéristiques de la soufflerie	11
V.	Etude expérimentale en soufflerie.....	13
A.	Objectifs.....	13
B.	Instrumentation.....	13
C.	Conception du modèle	14
D.	Mise en application et assemblage	15
E.	Installation dans la veine d'essai	19
F.	Expérience.....	20
VI.	Simulation numérique CFD	21
A.	Quelques tentatives.....	21
B.	1 ^{er} modèle : Modèle K epsilon.....	27
C.	2 ^{ème} modèle : Modèle Spalart Allmaras.....	29
D.	Résultats.....	31
VII.	Etude mécanique et simulation Matlab	32
A.	Théorie.....	32
B.	Calcul des pulsations propres et vecteurs propres	34
C.	Simulation MATLAB Simulink	35
VIII.	Conclusion et perspectives	42
IX.	Bilan personnel.....	43
X.	Bibliographie.....	44

Table des figures

Figure 1 : Illustration de l'effet Venturi appliqué à une F1	6
Figure 2 : Amplitude d'une F1 subissant le marsouinage.....	8
Figure 3 : Graphique de l'accélération verticale en fonction de la fréquence d'oscillation	8
Figure 4 : Fond plat des premières « wing-cars » exploitant l'effet de sol, Lotus 79, 1977.....	9
Figure 5 : Fond plat d'une F1 2022	9
Figure 6 : Principaux efforts s'appliquant sur une aile	10
Figure 7 : Profil de l'aile GOE 801	10
Figure 8 : Courbe polaire C_z en fonction d' α pour $Re = 50\,000$	11
Figure 9 : Photo de la veine d'essai, vue de face	12
Figure 10 : Principe de la sonde Pitot	12
Figure 11 : Capteur de force unidirectionnel	13
Figure 12 : Modèle 3D CATPart de l'aile 3D et son dispositif de fixation à une branche.....	14
Figure 13 : Modèle 3D CATPart de l'aile 3D et son dispositif de fixation à deux branches ...	14
Figure 14 : Solutions de mise en expérience.....	15
Figure 15 : Assemblage capteur/poignée	16
Figure 16 : Taraudage de l'aile	17
Figure 17 : Insert dans l'aile	17
Figure 18 : Détail de la liaison tige/poignée.....	18
Figure 19 : Détail de la liaison tige/aile	18
Figure 20 : Assemblage de l'ensemble	18
Figure 21 : Veine d'essai	19
Figure 22 : Aile dans la veine d'essai vue de face et de profil	19
Figure 23 : Support du montage	20
Figure 24 : Courbe portance en fonction de la distance au sol	21
Figure 25 : Visuel du modèle 3D de F1 2022	22
Figure 26 : essai de reproduction d'un châssis de Formule 1	22
Figure 27 : Essai de reproduction d'un aileron avant de Formule 1	23
Figure 28 : Modélisation du profil GOE 801 sous Catia V5 avec dimensions	24
Figure 29 : Modélisation de la veine d'essai avec l'aile placée au centre.....	24
Figure 30 : Corps de la veine en ayant soustrait celui de l'aile	25
Figure 31 : Action pour pouvoir faire une simulation 2D.....	25
Figure 32 : Maillage 2D de notre étude.....	26
Figure 33 : Modèle pour notre étude	26
Figure 34 : Vitesse du flux pour $D = 13\text{ mm}$, modèle Kespilon	27
Figure 35 : Vitesse du flux pour $D = 2\text{ mm}$ modèle Kepsilon	28
Figure 36 : Visualisation du gradient de pression	28
Figure 37 : Portance pour l'essai 1	28
Figure 38 : Portance pour l'essai 2	28
Figure 39 : Courbe de Résidus pour K Epsilon.....	29
Figure 40 : Vitesse du flux pour $D = 13\text{ mm}$, modèle Spalart Allmaras.....	30
Figure 41: Vitesse du flux pour $D = 2\text{ mm}$, modèle Spalart Allmaras.....	30
Figure 42 : Courbe des résidus pour Spalart Allmaras.....	30
Figure 43 : Portance (N) en fonction de la distance au sol (mm).....	31

Figure 44 : Ligne de fluide pour une situation de référence pour une portance de 40N	32
Figure 45 : Lignes de fluide pour une hauteur de 2.74 mm et une portance de 80 N	32
Figure 46 : Lignes de fluide pour une hauteur de 1.14 mm et une portance de 39 N	32
Figure 47 : Schéma du système mécanique étudié	33
Figure 48 : Réponse fréquentielle pour la masse suspendue	35
Figure 49 : Schéma bloc du système sous Simulink	36
Figure 50 : Evolution du profil Zexc en fonction du temps	36
Figure 51 : Schéma bloc de la suspension du quart de voiture	37
Figure 52 : Schéma bloc de la suspension seule	38
Figure 53 : Caractéristique Appui / Garde au sol adaptée à notre modèle	38
Figure 54 : Schéma bloc de l'appui aérodynamique	39
Figure 55 : Vitesse de CFD d'un diffuseur de F1 en vue arrière avec garde au sol basse (gauche) et haute (droite)	39
Figure 56 : Paramètres du bloc Suspension	40
Figure 57 : Résultats de la simulation : zs en bleu et zn en rouge en fonction du temps	40
Figure 58 : Variations de F(zs) en fonction du temps	41
Figure 59 : Dispersion Appui / Garde au sol sous Matlab	41

I. Introduction.

A. Qu'est-ce que le marsouinage ?

Le marsouinage, aussi appelé « porpoising », est un terme trouvant racine en zoologie pour désigner la nage du marsouin (« porpoise » en anglais), un petit cétacé marin à dents peuplant la plupart des côtes tempérées et froides du globe. Il se meut au ras de la surface de l'eau en effectuant des mouvements d'oscillations de bas en haut, se recroquevillant sur lui-même successivement, parfois sortant hors de l'eau. Ceci donne à l'observateur l'impression que l'animal se déplace par bonds.

C'est cette analogie de rebonds qui nomme le phénomène appliqué aux véhicules et notamment aux F1.

B. L'origine du phénomène

La Fédération Internationale de l'Automobile (FIA) a décidé pour la saison 2022 de F1 de modifier le règlement technique, en apportant des contraintes très précises sur le plan de l'aérodynamique. Ces changements de réglementation sont monnaie courante en F1 et plus généralement pour le sport automobile, que ce soit pour orienter les développements, améliorer la compétitivité ou le spectacle.

Le concept des monoplaces a été revu en profondeur, avec notamment le retour de l'effet de sol, qui permet de générer de l'appui aérodynamique, afin de faciliter les dépassements. Il s'agit de créer des tunnels Venturi pour des bolides qui d'une part sont moins sensibles à l'air perturbé devant eux et d'autre part perturbent eux-mêmes moins l'air qu'ils traversent.

C. Appui aérodynamique et effet de sol

Deux forces aérodynamiques principales s'exercent sur une F1 lancée à pleine vitesse : une force verticale (l'appui), avec l'air qui plaque la voiture au sol en frappant les surfaces aérodynamiques et qu'en bout de chaîne les pneus se chargent de convertir en adhérence, et une force horizontale (la traînée), avec l'air qui résiste à l'avancée de la monoplace et influe donc sur sa vitesse de pointe. Plus l'appui généré de cette façon augmente, plus la traînée est forte. Les écuries et pilotes sont donc toujours à la recherche du meilleur compromis entre adhérence pour les virages et vitesse pour les lignes droites, en fonction des caractéristiques du circuit visité.

Quand on parle d'« effet de sol » en sport automobile, cela veut dire que l'on se sert du sol (donc de la piste) comme d'une partie intégrante du système aérodynamique qui va servir à augmenter l'appui de la voiture et donc l'adhérence dans les virages. Dans le cadre du sport auto, « effet de sol » est donc en réalité une expression fourre-tout qui regroupe plusieurs

phénomènes visant à créer de l'appui, plutôt qu'une application pure et dure de cet effet qui dans sa définition la plus stricte évoque la portance créée par un objet volant près du sol.

Principalement, une F1 à effet de sol cherche à recréer un effet Venturi idéal pour générer de l'appui via une différence de pression entre le dessous et le dessus de la voiture, qui va alors créer une déportance. L'air s'engouffrant dans l'entonnoir que représente l'aile, celui-ci est accéléré par conservation du débit de fluide. D'après le principe de Bernoulli, $\Delta P + \frac{1}{2}\rho\Delta v^2 = cte$. Aussi, s'il y a augmentation de la vitesse de l'écoulement de l'air, il y a aussi une diminution de pression. Il se produit un effet de succion : comme la pression baisse localement en dessous mais qu'elle n'est pas affectée au-dessus, il se crée une force qui appuie vers le bas (ou tire vers le haut si c'est l'objet du bas qui est mobile), et plaque alors la voiture au sol.



Figure 1 : Illustration de l'effet Venturi appliqué à une F1

II. Définition du projet et objectifs

Les objectifs formalisés lors de la proposition du sujet en amont de ce PJT étaient :

- Etat de l'art sur ce type de phénomène
- Modélisation et simulation de la dynamique du véhicule (aspects vibratoires)
- Modélisation et simulation des phénomènes aérodynamiques (CFD)
- Conception et réalisation d'un banc d'essais avec sur la soufflerie de l'école pour modéliser et simuler les phénomènes aérodynamiques
- Réalisation des essais et confrontation aux résultats de simulation

A. Périmètre d'étude

Il s'agit dans ce PJT de mettre en œuvre des moyens permettant de décrypter le phénomène de marsouinage. L'interaction aérostructure semble être ici au cœur de la genèse du phénomène. Nous nous attachons donc à étudier le marsouinage du point de vue aérodynamique, en étudiant plusieurs modèles et du point de vue mécanique en bâtissant un modèle simplifié permettant de rendre compte des oscillations verticales de la voiture.

B. Risques du projet

Bien que le phénomène de marsouinage soit connu depuis les années 1970 avec les premières « wing cars » vite abandonnées car trop dangereuses, ce problème de stabilité a surpris les équipes engagées dans le championnat 2022. En effet, seules des simulations numériques de type CFD et des essais sur modèle réduit fixe sont prévus par le règlement sportif et technique. Ce phénomène n'a donc pas pu être anticipé en amont de la saison, et les ingénieurs se sont retrouvés piégés. Aussi, résoudre ce problème est un enjeu majeur de recherche et développement, d'une part pour la performance pure de la voiture, mais aussi pour le confort, voire la santé du pilote qui doit endurer des oscillations et chocs répétés tout au long de la séance de roulage. De ce fait, la plupart des ressources disponibles sont très récentes (dernier trimestre 2022), ou il s'agit de ressources issues de revues plus ou moins techniques spécialisées. Nous avons dû faire des hypothèses fortes pour aboutir à notre modèle.

C. Pilotage du projet

Le PJT s'est étalé sur 10 séances de 4h avec en supplément de nombreuses heures de travail personnel. Nous avons réparti les différentes tâches au sein des membres du groupe. En effet pour ce projet, il est possible de paralléliser les différentes tâches que sont :

- L'état de l'art sur le phénomène de marsouinage, avec les différentes modélisations et simplifications proposées dans la bibliographie scientifique
- L'étude expérimentale en soufflerie : élaboration d'un modèle 3D, insertion dans la veine d'essai et instrumentation par capteurs
- La modélisation numérique de l'aile puis le paramétrage aérodynamique de la veine d'essais (CFD)
- L'étude théorique de l'aspect mécanique et sa modélisation sur Matlab
- La simulation finale englobant les aspects aérodynamiques et mécaniques sur Matlab

III. Analyse vidéo du marsouinage

Les enregistrements vidéo des médias réalisés en début de saison sont les premières ressources que nous avons eues pour étudier le phénomène de marsouinage. On y voit la voiture osciller en bout de ligne droite.

La vidéo utilisée date de février 2022.



Figure 2 : Amplitude d'une F1 subissant le marsouinage

On a pu déterminer plusieurs caractéristiques sur le marsouinage : la fréquence des oscillations, leur amplitude, et la vitesse moyenne des oscillations. Les mesures sont faites approximativement en prenant des repères fixes dans l'image (déplacement de la visière du pilote, d'une taille que l'on peut estimer à 7 cm de haut) et au chronomètre.

Fréquence (Hz)	Environ 5 Hz
Amplitude	Environ 10 cm
Vitesse moyenne verticale	Environ 1m/s

Tableau 1 : Caractéristiques cinématiques du marsouinage

Par ailleurs, F1 TV a publié des données relatives à l'amplitude et l'accélération subie par le pilote lors du marsouinage :

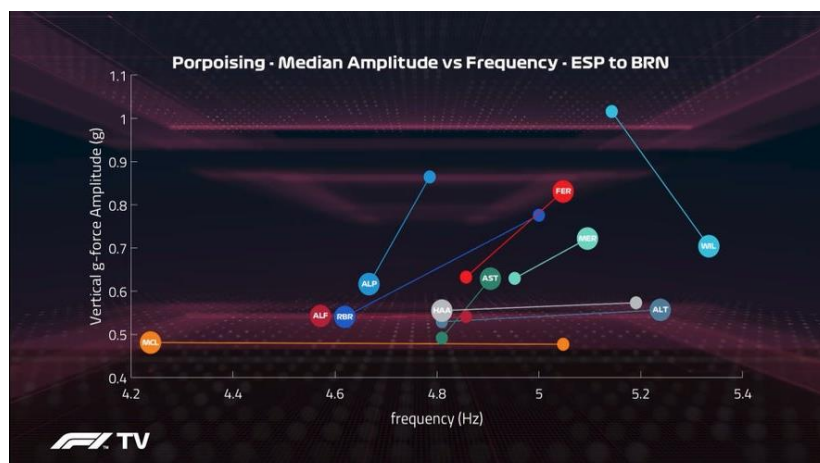


Figure 3 : Graphique de l'accélération verticale en fonction de la fréquence d'oscillation

On voit ici l'évolution entre deux séances d'essais (Espagne et Bahrein). La fréquence se situe en moyenne autour de 4,8Hz selon les équipes, mais l'accélération verticale peut atteindre 1G, ce qui devient critique pour le pilote qui doit subir cette gêne répétée plusieurs fois par tour et au fil des tours, soit une cinquantaine de fois par séance de roulage. Il devient critique d'isoler les causes de ce phénomène et d'essayer de le résoudre.

IV. Modèle.

Nous avons choisi d'utiliser le même modèle pour la simulation numérique et pour l'expérience. Le but est de pouvoir comparer nos résultats et d'améliorer les différents modèles selon le retour de la simulation ou de l'expérience.

Une Formule 1 étant complexe à modéliser, notamment le fond plat et ce de manière cohérente, nous avons décidé de simplifier l'étude en modélisant une Formule 1 comme une aile d'avion. En effet cette simplification est valable car le fond plat des Formule 1 n'est plus plat depuis la nouvelle réglementation mais incurvé comme une aile d'avion inversée.

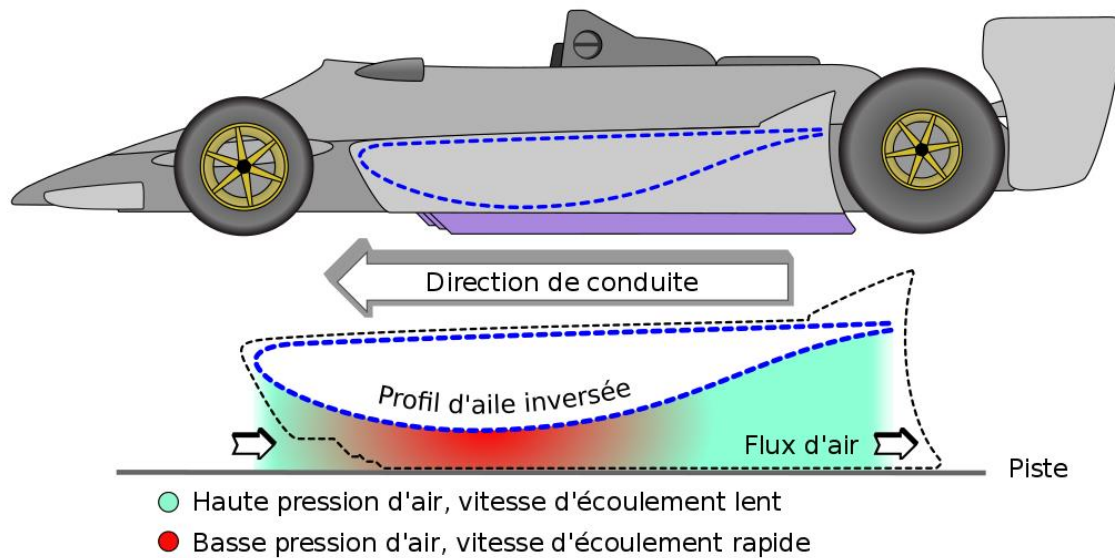


Figure 4 : Fond plat des premières « wing-cars » exploitant l'effet de sol, Lotus 79, 1977



Figure 5 : Fond plat d'une F1 2022

Ainsi, dans notre simulation, nous modéliserons la Formule 1 par une aile d'avion inversée. Le phénomène que nous voulons montrer étant lié à la portance, nous voulons une aile avec un coefficient C_z le plus élevé possible afin de mettre le plus facilement possible en évidence le phénomène de marsouinage.

A. Choix du profil d'aile

Dans cette partie, on s'intéresse aux facteurs qui motivent le choix d'un profil d'aile.

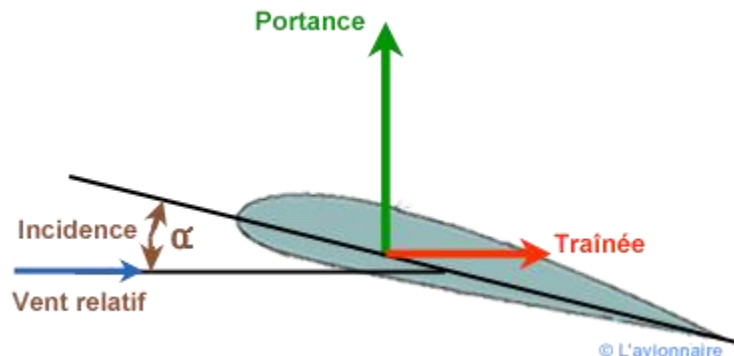


Figure 6 : Principaux efforts s'appliquant sur une aile

La portance est la composante de la force subie par un corps en mouvement dans un fluide selon l'axe vertical. Aussi, si la portance devient négative, on parle d'appui (ce qui peut se produire lorsque l'aile est retournée). Ainsi, on parlera sans distinction dans cette partie d'appui ou de portance, tantôt l'aile étant retournée ou pas pour des besoins d'accommodation aux conditions expérimentales.

Nous avons parcouru plusieurs bases de données de profils d'aile. Celle offrant les données les plus intéressante est airfoiltools.com. Comme expliqué plus haut, il faut que l'aile ait une portance élevée (C_z), mais, quitte à n'isoler qu'un seul phénomène, limiter le plus possible la trainée (C_x).

Dans nos recherches dans la base de données de profil, on souhaite trouver une aile dont le rapport $\frac{C_z}{C_x}$ est maximisé.

Nous avons trouvé que le profil GOE 801 possède un C_z élevé pour un angle $\alpha = 0^\circ$ ($C_z = 0,60$ pour $Re = 50\,000$ (Airfoil Tools, s.d.)), ainsi qu'un C_x faible, on a donc utilisé ce profil d'aile.

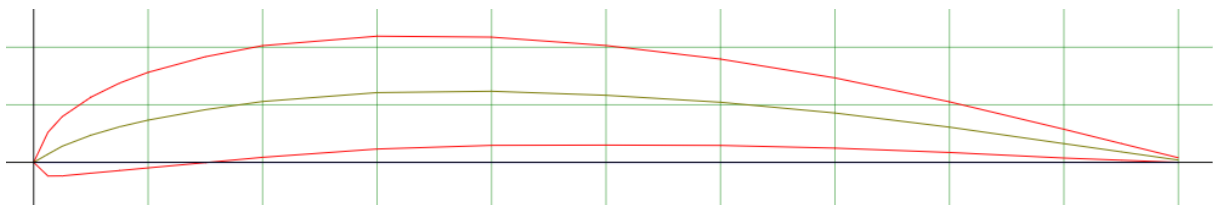


Figure 7 : Profil de l'aile GOE 801

Nous avons décidé de rester avec $\alpha = 0^\circ$ pour des raisons pratiques. En effet, si on regarde la courbe polaire de notre profil, on observe que C_z est maximal pour des angles α plus grands. Or de façon numérique et grâce à Star CCM+, il est très simple de choisir l'angle que l'on veut précisément, au contraire de l'expérience où il est beaucoup plus compliqué de connaître l'angle précisément. C'est pour cette raison que nous avons décidé de conserver un angle $\alpha = 0^\circ$.

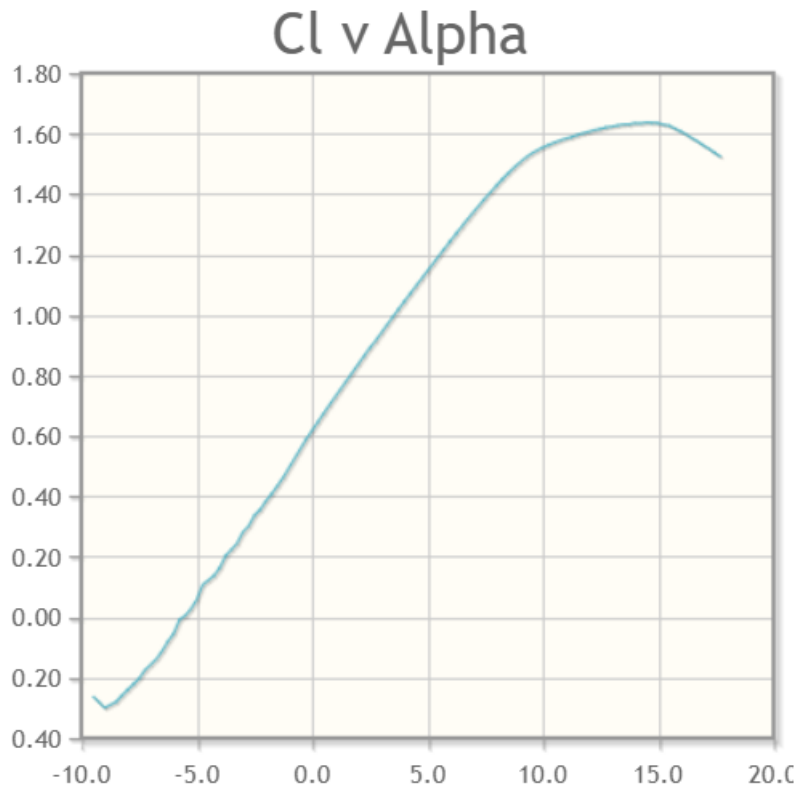


Figure 8 : Courbe polaire C_z en fonction d'alpha pour $Re = 50\,000$

B. Caractéristiques de la soufflerie

Nous effectuerons nos essais dans la soufflerie de l'ENSAM. Ainsi la veine d'essai sera un parallélépipède de dimensions 26 cm de haut, 26 cm de long et 30 cm de large.

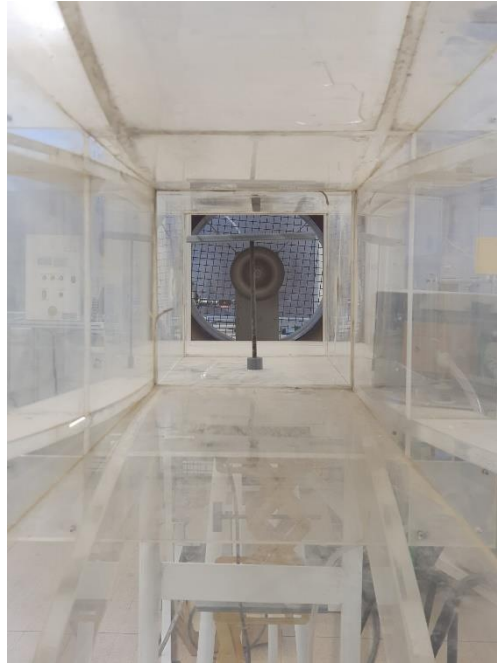


Figure 9 : Photo de la veine d'essai, vue de face

Aussi, le phénomène de marsouinage se produit à des vitesses élevées, en effet lors des courses de Formule 1, il se produit majoritairement en bout de ligne droite et de temps en temps pendant les virages extrêmement rapides, soit à partir de 200 km/h.

Nous utiliserons donc la vitesse maximale disponible par la soufflerie.

Pour déterminer cette vitesse, nous avons utilisé la sonde Pitot installée dans la soufflerie. Cette sonde mesure une différence de pression que nous allons pouvoir relier à la vitesse. On mesure une différence de hauteur $\Delta H_{eau} = 43 \text{ mm}_{eau}$ que nous allons relier à une pression. $\Delta P = \rho g \Delta H_{eau} = 1000 * 9.81 * 43 * 10^{-3} = 0.42 \text{ kPa}$.

Or comme nous sommes dans le cas d'une sonde Pitot, on peut relier la vitesse à la pression grâce à la formule (Granier, Le théorème de Bernoulli et ses applications ("Classe inversée", PC*), s.d.) :

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{air}}} = \sqrt{\frac{2 * 42}{1.22}} = 26 \text{ m/s} = 94 \text{ km/h}$$

On gardera donc cette vitesse comme vitesse de référence pour toutes les études expérimentales et numériques.

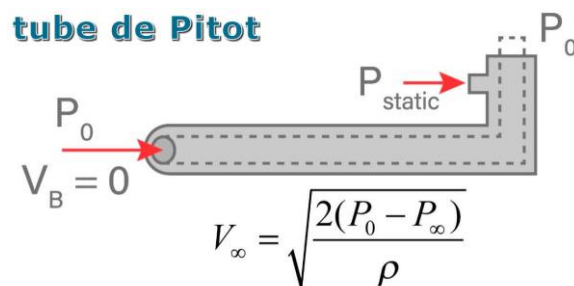


Figure 10 : Principe de la sonde Pitot

V. Etude expérimentale en soufflerie

A. Objectifs

Notre objectif étant de mettre en évidence le phénomène de marsouinage, il nous faut donc modéliser un objet générant une portance aérodynamique avec une vitesse importante proche d'une paroi qui modélisera le sol. Nous avons la chance d'avoir à disposition dans le laboratoire de mécanique des fluides une soufflerie qui nous permettra de modéliser un phénomène à des vitesses qui se rapprocheront de la réalité.

Il s'agit dans le cadre de cette étude d'étudier l'évolution de la portance/appui en fonction de la distance de l'aile par rapport au mur de la veine. Il s'agit d'une analogie entre la distance entre le bas de caisse et le sol, soit la garde au sol du véhicule.

Pour se faire on prépare un plan d'expérience qui nous permet de répondre à des besoins précis en appliquant un protocole expérimental adapté aux mesures que l'on souhaite effectuer.

B. Instrumentation

On cherche dans notre expérience à récupérer les paramètres d'acquisition suivants : la force verticale issue de la portance de l'aile en fonction de la distance aile-sol. Et ce dans le but de les comparer au modèle numérique.

On cherche donc un capteur de force uniaxial à utiliser dans le sens vertical pour isoler la force de portance/d'appui aérodynamique lors de notre essai. Notre choix s'oriente donc vers un capteur uniaxial et donc selon l'axe Z, soit l'axe de révolution du cylindre métallique du capteur.



Figure 11 : Capteur de force unidirectionnel

On utilisera directement l'interface d'affichage des acquisitions fournie avec ledit capteur pour relever nos données et les injecter dans un tableur. On pourra ainsi obtenir la courbe de l'évolution de la portance en fonction de la garde au sol.

C. Conception du modèle

Le fond plat de la F1 sera modélisé par un profil d'aile GOE 801. Nous utilisons ce profil d'aile qui est connu pour avoir une portance importante ce qui va nous donner plus de chance d'observer le phénomène de marsouinage. La piste quant à elle sera modélisée par une des parois en Plexiglass de la veine d'essai de la soufflerie.

Le capteur de force uniaxial nous permet d'étudier seulement l'axe Z et nécessite d'être relié à l'aile par une tige rigide. Il doit être placé à l'horizontale. Deux solutions sont alors possibles :

Nous avons modélisé deux dispositifs de fixation sur CATIA représentés ci-dessous :

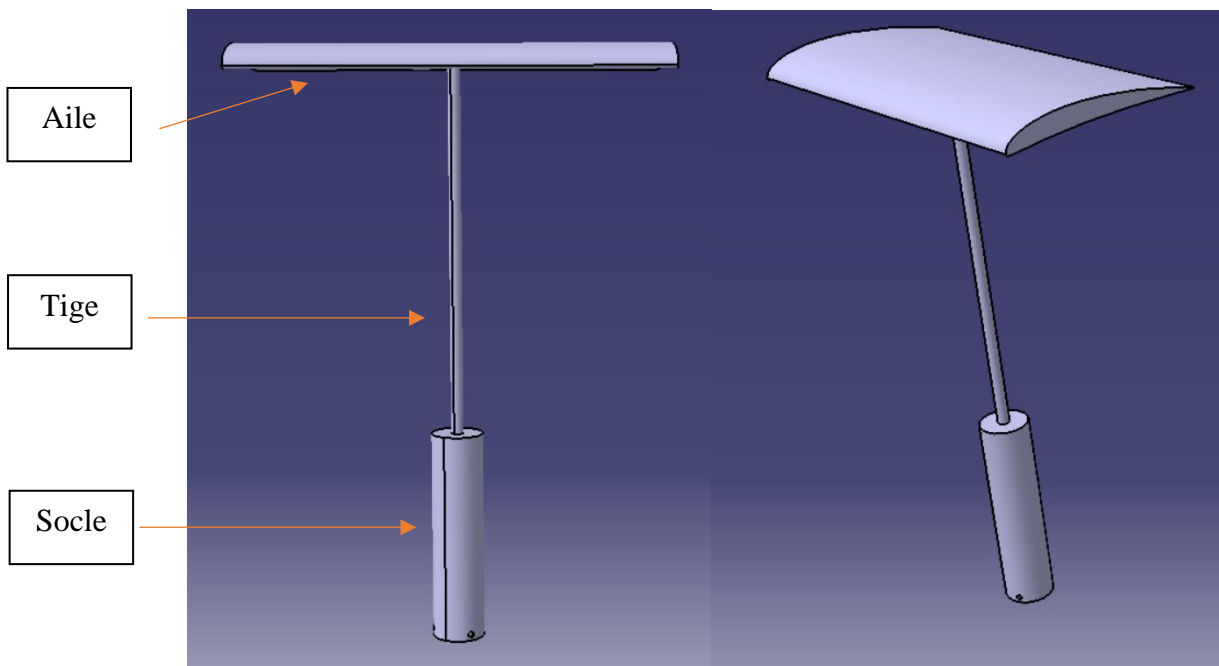


Figure 12 : Modèle 3D CATPart de l'aile 3D et son dispositif de fixation à une branche

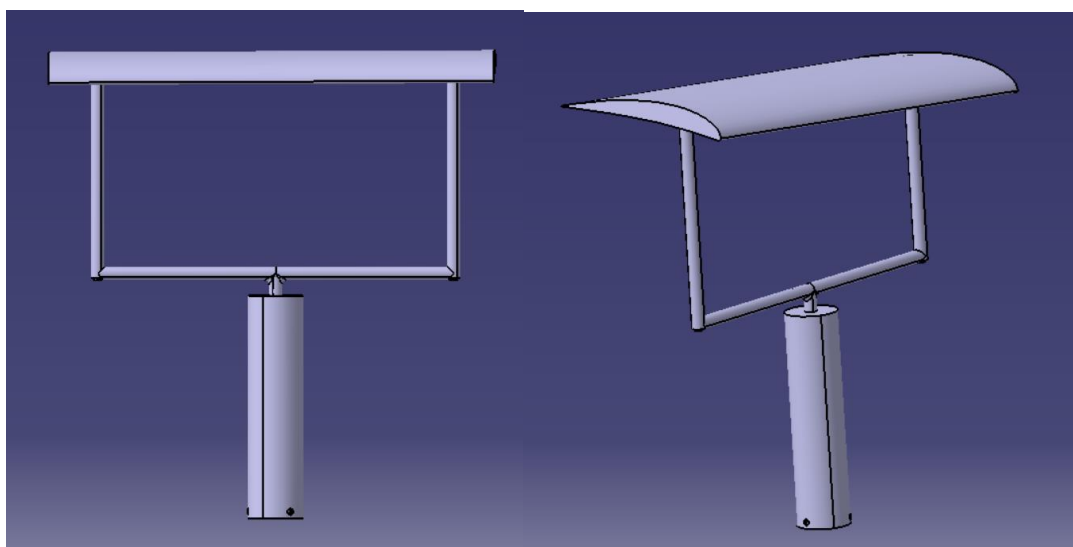


Figure 13 : Modèle 3D CATPart de l'aile 3D et son dispositif de fixation à deux branches

Nous avons donc choisi l'option décrite dans la figure 12. En effet, il est plus simple technologiquement de réaliser la première option étant donné que nous allons l'imprimer via une imprimante 3D. De plus, il n'y a pas de problème aérodynamique d'utiliser la première option ou bien la seconde.

Cependant, nous allons modifier légèrement le modèle réalisé sur CATIA, une fois imprimé. Nous allons donc procéder aux modifications ci-dessous.

La conception 3D est réalisée comme suit :

- Création d'une esquisse plane de l'aile en reliant par une courbe tous les points du contour (intrados et extrados) de l'aile, disponible dans la base de données ayant fourni le profil. La corde de l'aile mesure 10cm.
- Extrusion de ce profil sur une longueur de 20cm.
- Révolution de la tige de fixation (fine) et de sa base (socle de plus grand diamètre).

Deux solutions s'offrent alors à nous pour réaliser l'expérience :

- Laisser le profil de l'aile dans le sens de la mesure de la portance et calculer la distance entre l'aile et la paroi supérieure de la veine d'essai.
- Instrumenter le profil d'aile inversée pour calculer l'appui et mesurer la distance entre l'aile et la paroi inférieure de la veine d'essai.

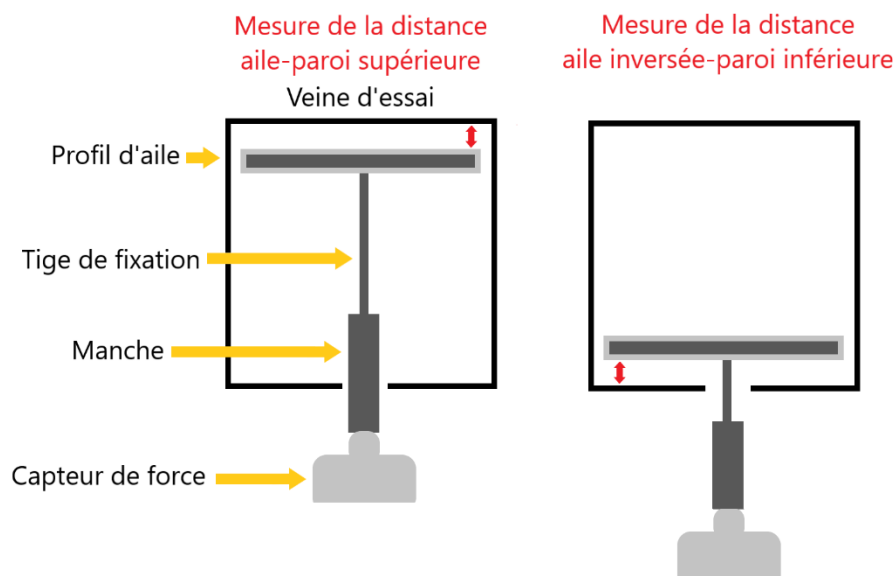


Figure 14 : Solutions de mise en expérience

D. Mise en application et assemblage

On décide de fabriquer l'aile avec un matériau solide et léger, afin qu'il puisse facilement se loger dans la soufflerie. Nous avons retenu la technique d'impression 3D en PLA. Nous avons exploité les ressources de l'école, notamment les imprimantes du FABLAB. Les surfaces fonctionnelles sur lesquelles nous serons attentifs sont l'extrados de l'aile et l'extrusion

intérieure de la poignée. Afin de limiter les problèmes de rugosité au niveau de la couche limite du fluide, on choisit d'imprimer l'aile selon une trajectoire linéaire allant du bord d'attaque jusqu'au bord de fuite de l'aile : les lignes de filament de plastique déposées par l'impression 3D sont ainsi le long de la trajectoire du fluide, ce qui diminue la rugosité apparente de l'extrados.

En effet il faut éviter une texture granuleuse au niveau de l'extrados pour la couche d'air au contact de cette surface pour qu'elle subisse un décrochage proche de ce qui est observé sur les F1 avec des ailerons lisses. La présence d'une rugosité excessive de surface entraînerait une accroche de la couche limite excessive sur l'aile.

Deux pièces sont imprimées : l'aile d'une part, munie d'un trou pour y loger une tige filetée (conformément à la tige fine visible sur le modèle CAO), et le socle percé pour y loger la base du capteur de force et la tige filetée.

On choisit d'encastrer le socle de la tige avec le support de mesure du capteur comme on cherche à mesurer la portance de l'aile, soit le projeté de l'effort aérodynamique subi par l'aile selon l'axe vertical. Par ailleurs, on estime que le moment transmis est négligeable car la surface du point de contact entre le socle et la base du capteur est petite (environ 30cm²). Pour assurer cette mise en contact on dépose de la colle chaude au niveau de l'interface avant l'assemblage.



Figure 15 :Assemblage capteur/poignée

On choisit une tige filetée de diamètre 8mm pour la tige, en effet au premier abord on avait imprimé une tige en 3D mais celle-ci présentait une flexion bien trop importante et n'était donc pas capable de transférer les contraintes axiales de l'aile vers le capteur sans une dissipation importante.

Les prises de vue suivantes détaillent les liaisons tige/aile et poignée/aile qui sont réalisées par inserts filetés vissés dans le plastique au préalable taraudés.



Figure 16 : Taraudage de l'aile

On taraude très progressivement par aller-retours successifs. En effet le maillage volumique de l'impression en nid d'abeille est très fragile et doit donc être ménagé lors du taraudage.



Figure 17 : Insert dans l'aile

L'insert est mis en position pour bien prendre sur les filets en étant le plus droit possible pour éviter en vissant la tige de se retrouver avec une aile bancale. Il est vissé en butée dans le fond de l'aile. On procède de même du côté de la base.

On choisit de ne pas utiliser d'huile ou de WD40 car nous ne connaissons pas l'influence de ces huiles sur le plastique de l'imprimante 3D et que leur usage peut entraîner une accumulation de copeaux au fond du puits de taraudage. On préférera donc nettoyer manuellement le taraud après quelques cycles de vissage pour assurer une meilleure liaison.

Ensuite on visse ensemble les trois éléments en prenant la précaution au préalable de meuler les extrémités de la tige filetée pour éviter de foirer le pas de l'insert et de détruire notre montage.



Figure 18 : Détail de la liaison tige/poignée

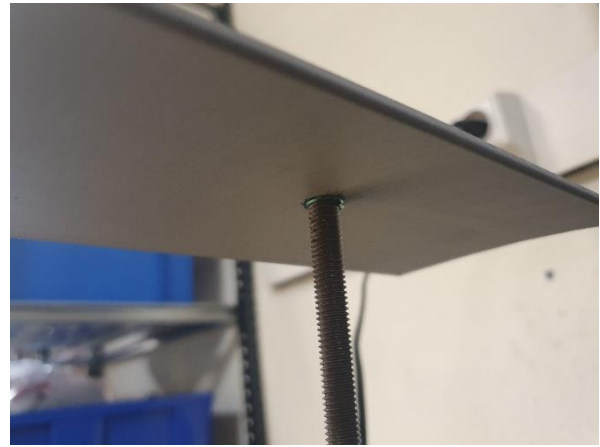


Figure 19 : Détail de la liaison tige/aile



Figure 20 : Assemblage de l'ensemble

E. Installation dans la veine d'essai



Figure 21 : Veine d'essai

On démonte une des plaques latérales de la veine d'essai dans le but d'y insérer le montage. De plus on retire le tube de Pitot fixé sur la paroi inférieure dans le but d'y faire passer la poignée de fixation.

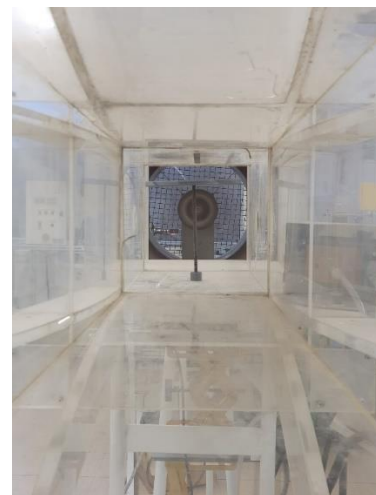
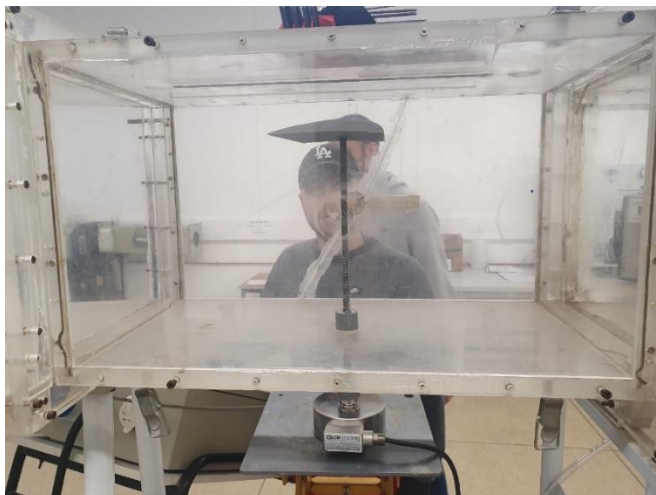


Figure 22 : Aile dans la veine d'essai vue de face et de profil

On place le montage dans la veine d'essai et on le positionne sur un plateau réglable pour pouvoir ajuster la distance entre l'aile et la paroi supérieure de la veine d'essai. Pour mesurer précisément cette distance on colle sur la poignée en plastique un ruban adhésif que l'on gradue pour faciliter la prise de mesures lors de l'expérience.



Figure 23 : Support du montage

F. Expérience

Nous savons que le phénomène de marsouinage apparaît à des vitesses importantes. Cependant, nous avons une soufflerie qui peut générer des vitesses de l'ordre de 100 km/h. On utilisera donc la soufflerie au maximum de ses capacités, à 100km/h. Ensuite, nous avons positionné l'aile sur la paroi supérieure de la soufflerie. A l'aide d'une graduation au niveau du manche, nous avons pu réaliser nos mesures.

Nous avons alors allumé la soufflerie à une vitesse de 100 km/h, puis relevé les forces que le capteur de force nous indiquait. Nous avons pu rassembler nos mesures dans un tableau Excel. L'objectif étant de trouver la courbe de la force exercée sur le capteur de force unidirectionnel en fonction de la distance avec le sol.

Nous obtenons alors la courbe suivante :

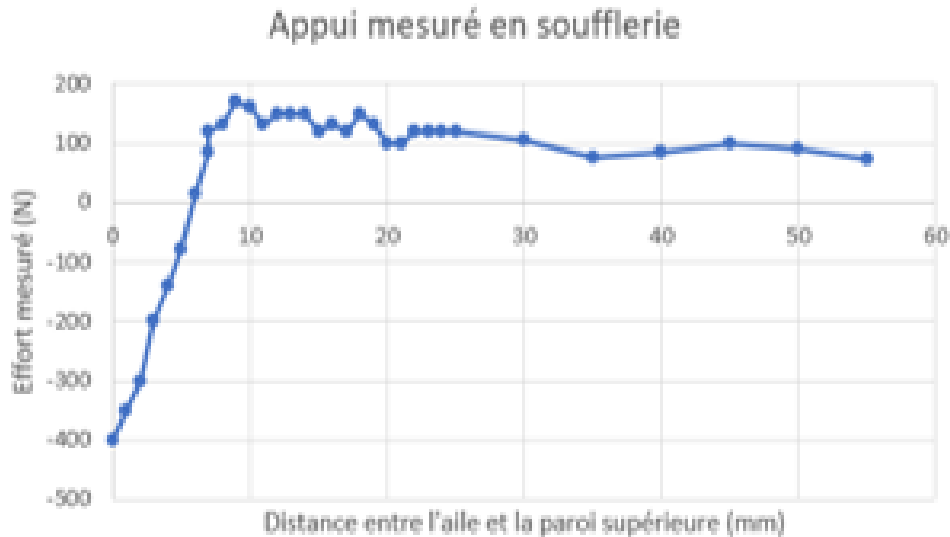


Figure 24 : Courbe portance en fonction de la distance au sol

Nous observons une courbe qui est tout d'abord croissante dans l'ensemble et puis décroissante par la suite. Nous avons pris un nombre plus important de points au niveau du changement de variation de la courbe afin d'être plus précis sur ce qu'il se passait à cet endroit. En effet, c'est l'endroit qui nous intéresse. Nous observons donc un maximum à cet endroit. Cela vient confirmer alors que nous avons la même allure que la courbe trouvée dans la partie CFD, donc que notre modèle est conforme. Nous pouvons interpréter cela de différentes manières, en effet, lorsqu'on se rapproche de trop près de la paroi, c'est-à-dire, lorsque l'on a passé le pic, nous avons un « décrochage » qui se produit au niveau de l'aile. Il n'y a donc plus d'effet de portance de l'aile. Ensuite, lorsque l'aile est suffisamment loin de la paroi supérieure, il n'y a plus d'effet de sol et la force verticale devient constante à partir d'une certaine distance. Dans notre étude, nous cherchons à mettre en évidence ce maximum, ce pic et c'est ce que nous avons obtenu pour une hauteur de 8 cm.

VI. Simulation numérique CFD

Dans un premier temps, nous avons souhaité nous former à l'utilisation de logiciels de calculs « professionnels » et utilisés en bureau d'étude.

A. Quelques tentatives

Dans la littérature, on trouve souvent des travaux réalisés sous OpenFOAM, une boîte à outils de simulation multi-physique open-source, basée sur Linux. Nous avons tenté de faire tourner cette simulation sur nos machines personnelles (pourtant sous Windows), sans succès malgré les tutoriels trouvables sur Internet.

Nous avons également tenté d'exploiter, non pas un modèle simplifié d'aile, mais un modèle 3D de F1 correspondant aux réglementations 2022. Il s'agit d'un modèle 3D au format .STL trouvé sur un forum, provenant d'une fuite de données (leak) de l'écurie Alfa Romeo à visée graphique/publicitaire. Nous avons tenté de réexploiter cette géométrie sous CATIA et FreeCAD, aux formats .CATPart, .model, .obj, mais nous n'avons pas pu obtenir une géométrie correcte (problème de tessellation).

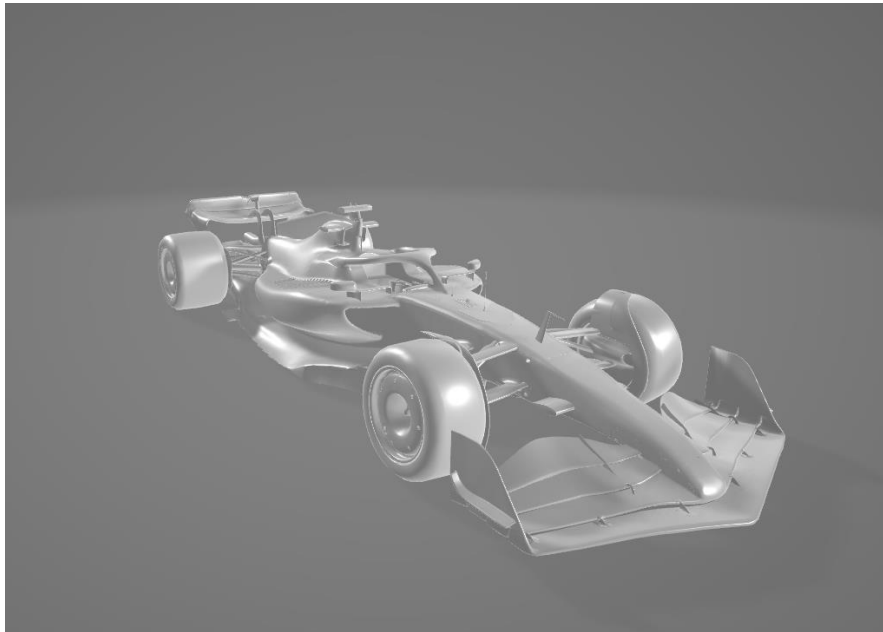


Figure 25 : Visuel du modèle 3D de F1 2022

Nous avons également tenté de reproduire ce modèle « à la main » sous CATIA V5 sans succès dans le module Generative Shape Design.

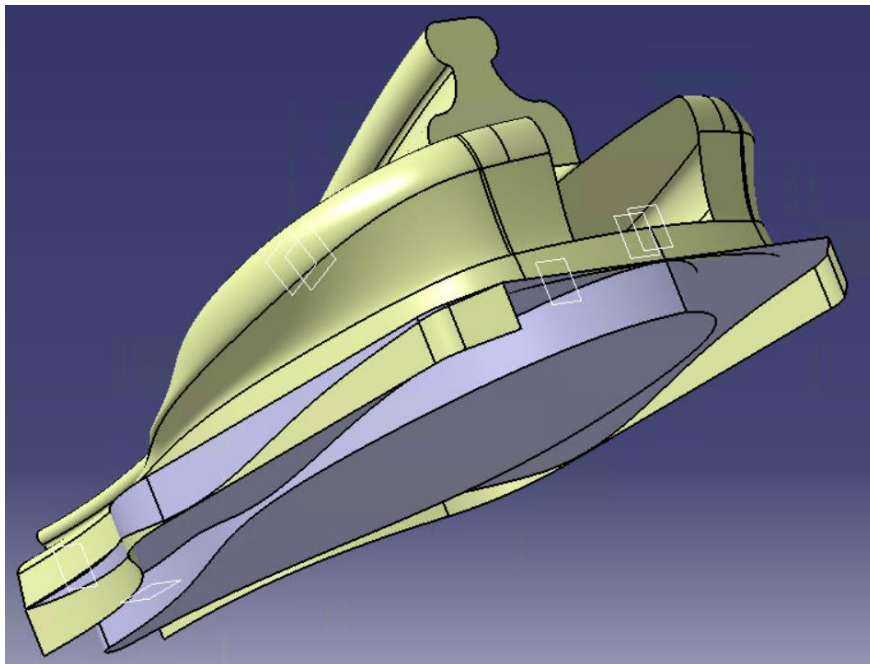


Figure 26 : Essai de reproduction d'un châssis de Formule 1

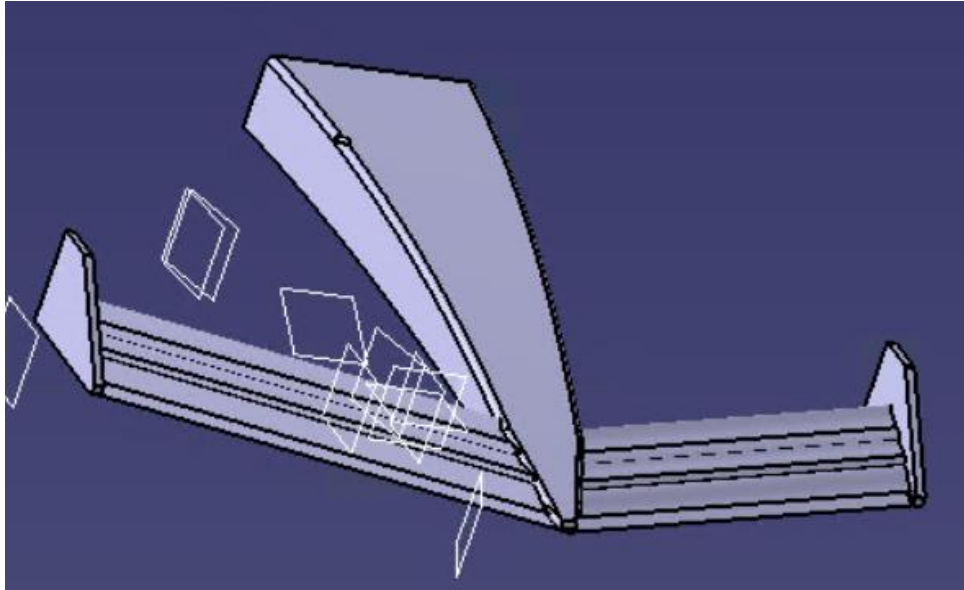


Figure 27 : Essai de reproduction d'un aileron avant de Formule 1

Pour réaliser la simulation numérique nous avons d'abord utilisé le module XFlow de 3DExpérience car nous y avons accès facilement et nous sommes habitués à travailler sur cet environnement. Cependant ce logiciel n'est pas performant. En effet la plupart des logiciels de mécanique des fluides (CFD en anglais) se reposent sur les équations de Navier-Stokes mais le module XFlow de 3D expérience utilise lui la méthode Lattice-Boltzmann qui est plus précise que les équations précédentes mais la méthode demande une puissance de calcul beaucoup plus importante (relation de dispersion de particules de fluide à l'échelle mésoscopique et étude des collisions entre elles). De plus, il y a très peu de données en ligne pour se former sur ce module et comme personne ne l'utilise à l'ENSAM, nous n'avons pas réussi à comprendre le logiciel. On a donc cherché une autre solution et on a remarqué que l'école possédait la licence du logiciel Star CCM+. On a donc choisi d'utiliser ce logiciel car il se base les équations de Navier-Stokes ce qui implique un temps de calcul faible. De plus, c'est un logiciel énormément utilisé dans l'industrie, il existe donc de nombreux tutoriel pour bien prendre le logiciel en main.

Le choix du logiciel étant fait, il faut maintenant modéliser le problème. Comme dit précédemment, nous avons choisi de simplifier la Formule 1 par un profil d'aile GOE 801. Nous avons donc réalisé ce profil sous Catia V5 pour pouvoir l'importer directement dans Star CCM+.

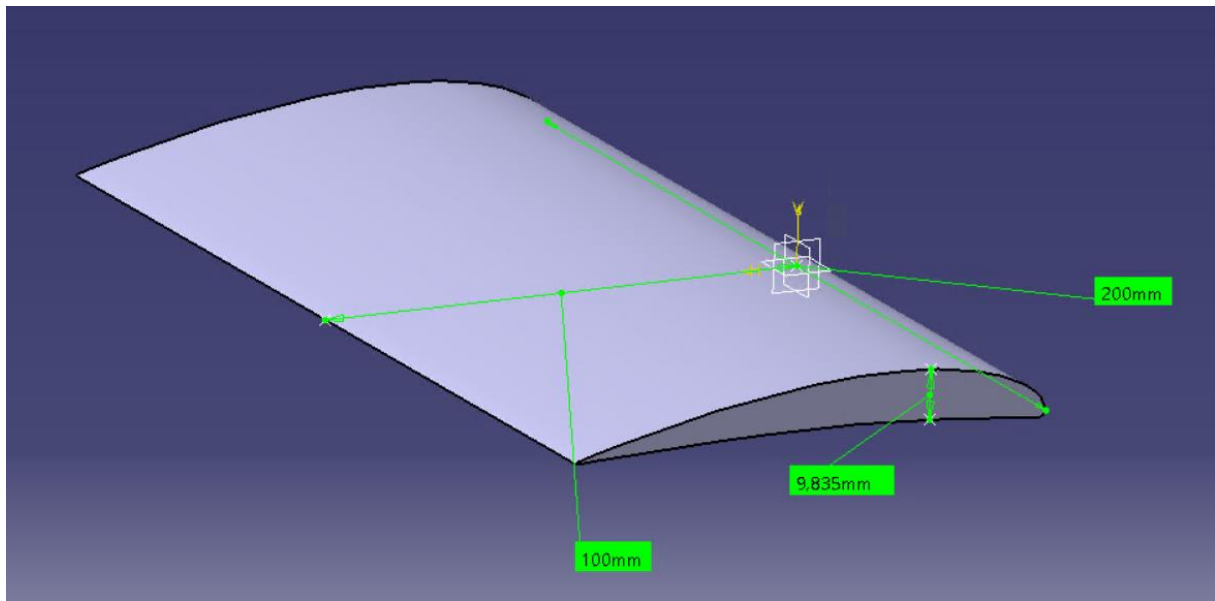


Figure 28 : Modélisation du profil GOE 801 sous Catia V5 avec dimensions

Aussi, nous réalisons la veine d'essai directement sur Star CCM+ et nous plaçons au centre de la veine, l'aile importée de CatiaV5.

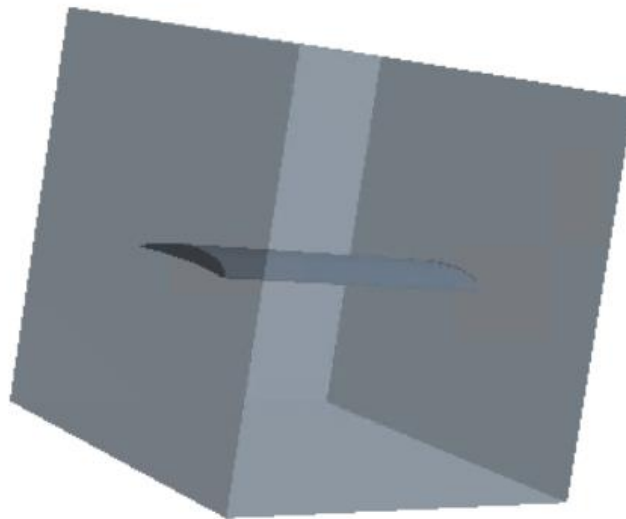


Figure 29 : Modélisation de la veine d'essai avec l'aile placée au centre

Maintenant que la veine d'essai et l'aile sont paramétrés dans Star CCM+, il nous suffit de modifier les coordonnées de l'aile en la faisant translater en hauteur. Le but de la simulation est de tracer la courbe Portance en fonction de la distance au sol de l'aile.

Pour ce faire, nous allons réaliser une simulation 2D. Il faut donc dans Star CCM+. La première étape est donc de soustraire le corps de l'aile au corps de la veine. On se retrouve donc dans la situation suivante :

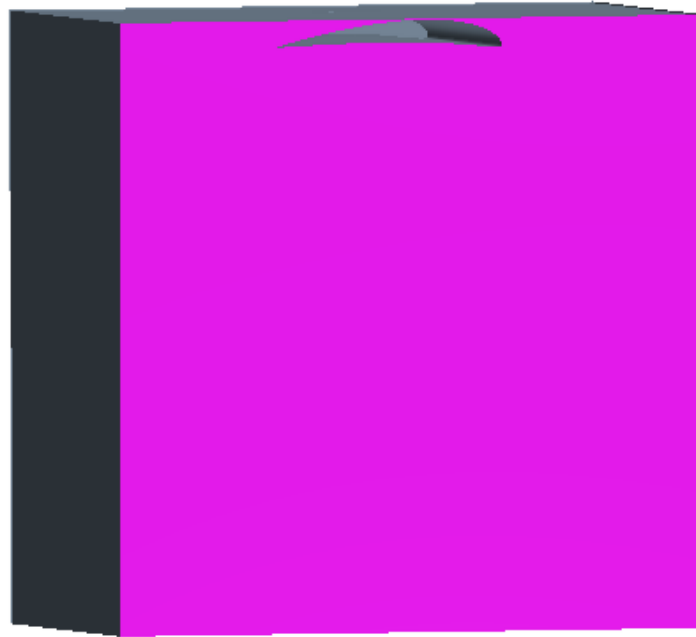


Figure 30 : Corps de la veine en ayant soustrait celui de l'aile

Ensuite, on rentre dans la partie simulation du logiciel. On se place dans le sous onglet Geometry/Operations et on peut cliquer sur l'opération « Badge for 2D meshing ». A partir de ce moment-là, toute la suite de la simulation se déroulera en 2D. On a choisi de faire l'étude en 2D car cela demande des temps de calculs bien moins longs qu'une étude en 3D.

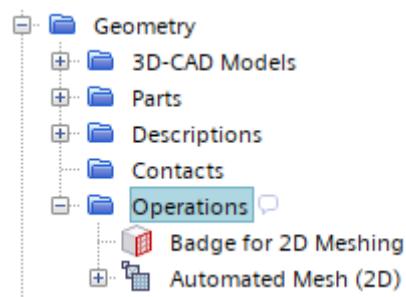


Figure 31 : Action pour pouvoir faire une simulation 2D

On choisit de réaliser un maillage fin proche des murs, proche de l'aile et aux alentours de l'aile. En effet, lors d'une simulation classique il n'aurait pas été nécessaire de faire un maillage fin proche des murs. Cependant, comme nous allons rapprocher l'aile du mur, ce maillage fin devient nécessaire. On a aussi un maillage fin aux alentours de l'aile car cette aile va générer des phénomènes de turbulence. Il faut donc les prendre en compte, d'où ce maillage. On se retrouve avec le maillage suivant :

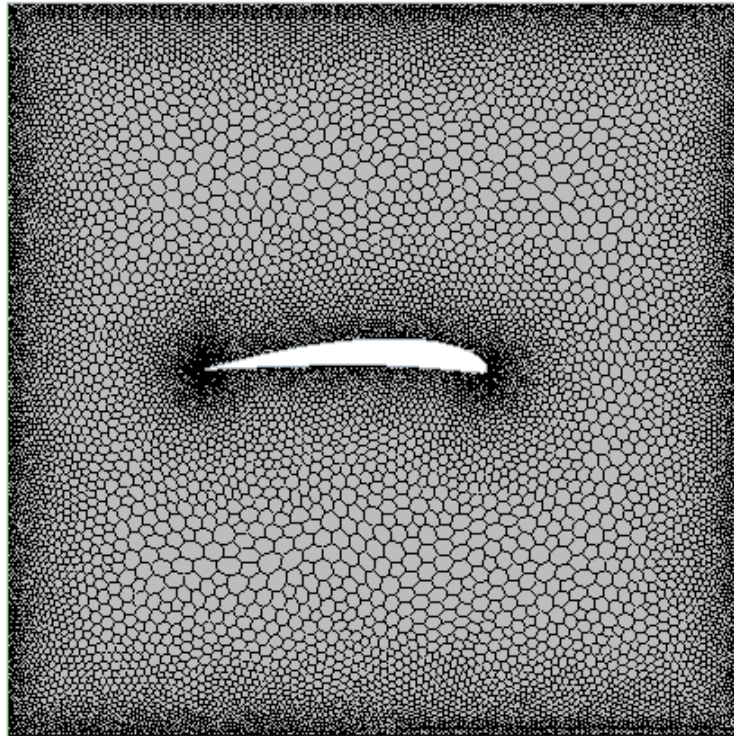


Figure 32 : Maillage 2D de notre étude

Il faut à présent rentrer les caractéristiques de notre écoulement. Notre étude se déroule dans l'air, comme nos vitesses sont largement inférieures à la vitesse du son, on va considérer l'air comme un gaz incompressible. Il aura donc une densité constante. L'étude est aussi une étude 2D donc on sélectionne cette option. On va considérer des intervalles de temps fixes lors de notre étude et donc on choisit l'option « Steady ». Comme notre écoulement est subsonique, on choisit « Segregated Flow » qui convient mieux à ce type d'écoulement et qui convergera plus rapidement. Ensuite notre écoulement comportera des turbulences, on choisit donc un écoulement turbulent.

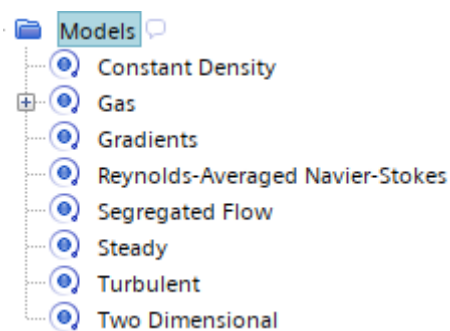


Figure 33 : Modèle pour notre étude

Tout d'abord on calcule le nombre de Reynolds : $Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{1.204 \cdot 26 \cdot 0.1}{1.825 \cdot 10^{-5}} = 1,7 \cdot 10^5$. Or pour un écoulement à l'air libre, on a $Re_{critique}$ qui est entre $3 \cdot 10^5$ et $3 \cdot 10^6$. On remarque que notre écoulement est proche de ce $Re_{critique}$. Notre écoulement est donc laminaire mais comme la vitesse va augmenter quand on va rapprocher l'aile du sol par effet venturi, notre écoulement pourra devenir turbulent. Il faudra donc faire attention à cette transition lors de notre étude.

Lors de cette étude, compte tenu de la proximité de notre nombre de Reynolds à celui critique, on choisit d'utiliser deux modèles de turbulence, le modèle K epsilon qui est plutôt adapté pour des hauts nombres de Reynolds et le modèle Spalart Allmaras qui est adapté pour des nombres de Reynolds Faible.

B. 1^{er} modèle : Modèle K epsilon

Comme expliqué précédemment, nous allons dans un premier temps étudier le modèle de turbulence K epsilon. Pour ce faire, on retourne dans notre onglet « models » et on ajoute le modèle de turbulence K epsilon.

Ce modèle possède des avantages et des inconvénients listés dans le tableau suivant (Ravelet, 2013) :

Modèle	Avantages	Inconvénient
K epsilon	Robuste, économique et relativement précis. Adapté aux écoulements à grand nombre de Reynolds.	Résultats médiocres pour des écoulements complexes (fort gradient de pression, rotation).

On sait que notre modèle va avoir de forts gradients de pression quand l'aile va s'approcher du sol. Il faudra donc vérifier si la solution converge avant d'étudier toute la courbe.

On obtient les résultats suivants :

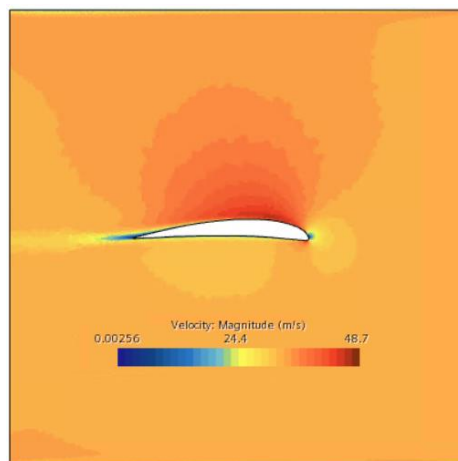


Figure 34 : Vitesse du flux pour $D = 13 \text{ mm}$, modèle K Epsilon

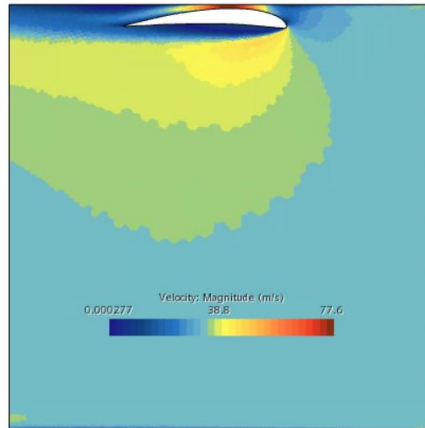


Figure 35 : Vitesse du flux pour $D = 2\text{mm}$ modèle $K \epsilon$

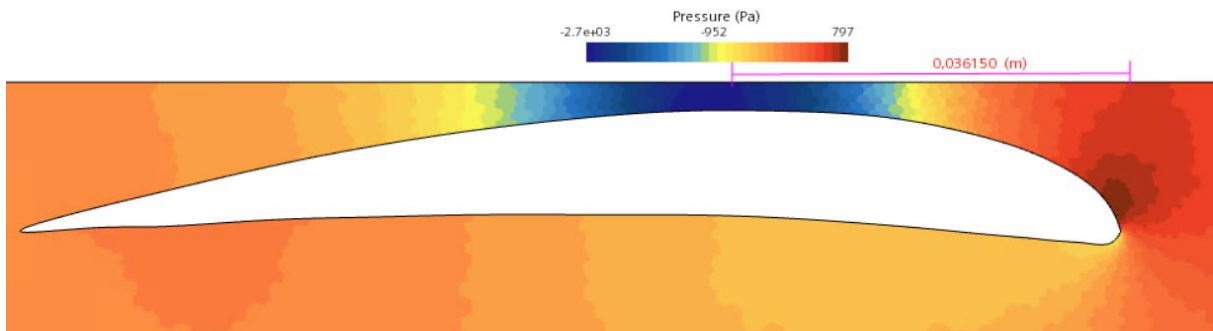


Figure 36 : Visualisation du gradient de pression

Nous observons donc un haut gradient de pression ($\Delta P = 797 \text{ Pa}$ en 36cm) ce qui peut être dangereux pour notre modèle. De plus on observe que pour une même valeur de hauteur, on obtient des forces totalement différentes.

Monitor value: 61.74526135858518

Figure 37 : Portance pour l'essai 1

Monitor value: 66.3506305260597

Figure 38 : Portance pour l'essai 2

Pour une même hauteur, on observe qu'on a un écart relatif de 7.5%. Ce n'est pas énorme mais ce n'est pas négligeable car pour la même simulation on devrait avoir un écart relatif beaucoup plus faible.

A la vue de ce qu'on a évoqué plutôt, on se rend compte que notre simulation a un problème. Pour essayer de le déterminer, nous allons observer les courbes nommées « residuals ».

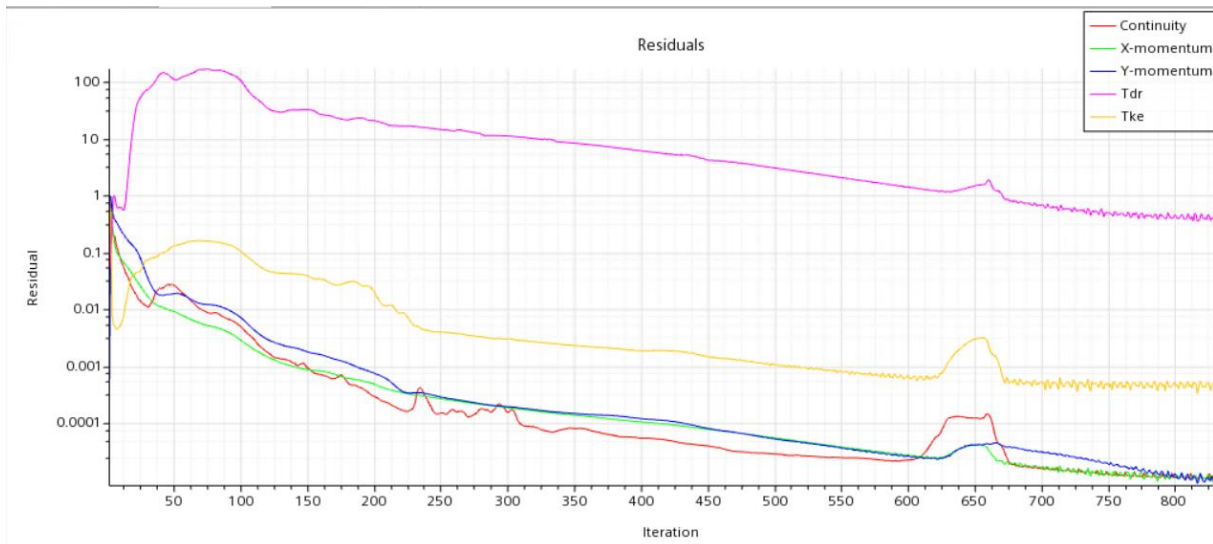


Figure 39 : Courbe de Résidus pour K Epsilon

On observe qu'après plus de 900 itérations, les courbes se stabilisent, or la courbe Tdr qui représente les résidus de l'équation est liée au calcul des turbulences. On voit que cette courbe converge vers 0.7 ce qui est une valeur trop élevée pour notre simulation. On doit donc corriger cela. Pour ce faire, on pourrait diminuer la taille de maille mais cela augmentera énormément nos temps de calcul. On va donc plutôt changer de modèle pour avoir des résultats corrects.

C. 2^{ème} modèle : Modèle Spalart Allmaras

Comme précédemment, on va déterminer les forces et faiblesses de notre modèle (Ravelet, 2013).

Modèle	Avantages	Inconvénient
Spalart Allmaras	Economique (1 équation). Bon pour les écoulements libres, et les écoulements sur profil sans décollement ni grands gradients de pression.	Nécessite une plus grande résolution du maillage aux frontières (pas de lois aux murs).

On remarque un point qui peut être problématique, dans notre simulation, on aura des décollements et des grands gradients de pression. Il faudra donc faire attention à voir si nos solutions convergent.

On obtient les résultats suivants :

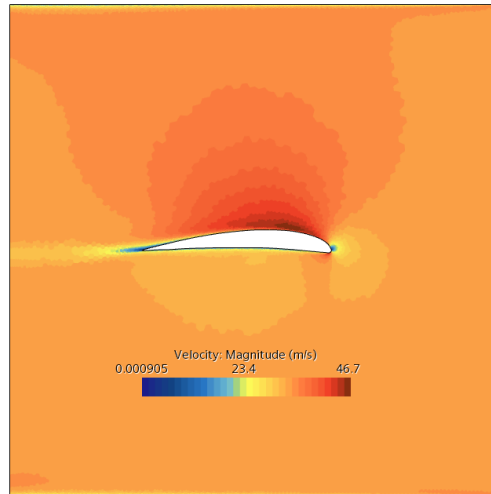


Figure 40 : Vitesse du flux pour $D = 13$ mm, modèle Spalart Allmaras

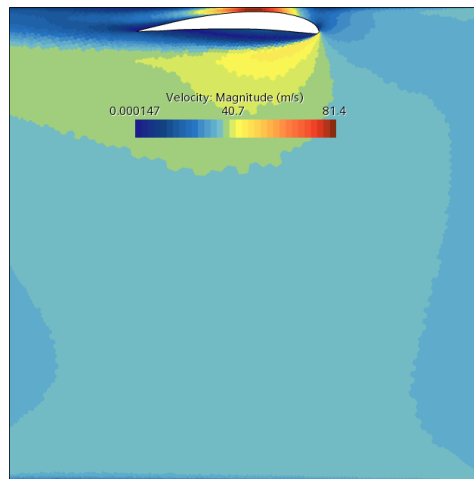


Figure 41: Vitesse du flux pour $D = 2$ mm, modèle Spalart Allmaras

On obtient la courbe des résidus suivants :

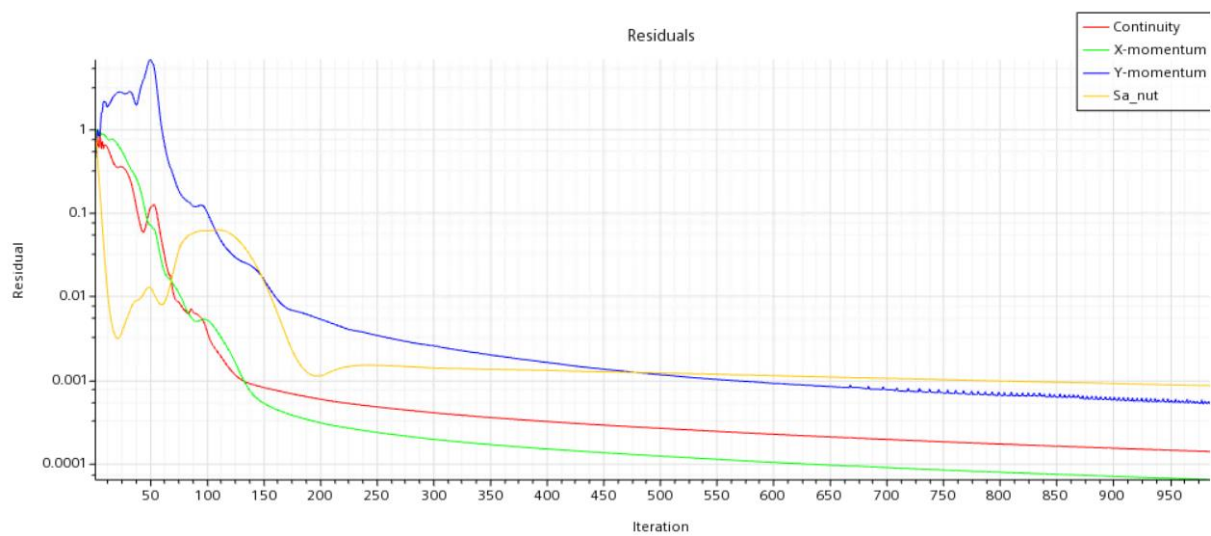


Figure 42 : Courbe des résidus pour Spalart Allmaras

On observe que les résidus convergent bien. Notre modèle est donc correct. Cela est sûrement dû au fait que nous avons réalisé un maillage fin proche des murs afin de bien respecter les inconvénients du modèle.

Nous allons maintenant réaliser plusieurs simulations en faisant varier la hauteur de notre aile pour pouvoir tracer la courbe de la portance en fonction de la hauteur.

D. Résultats

Après plusieurs simulations, on obtient la courbe suivante :

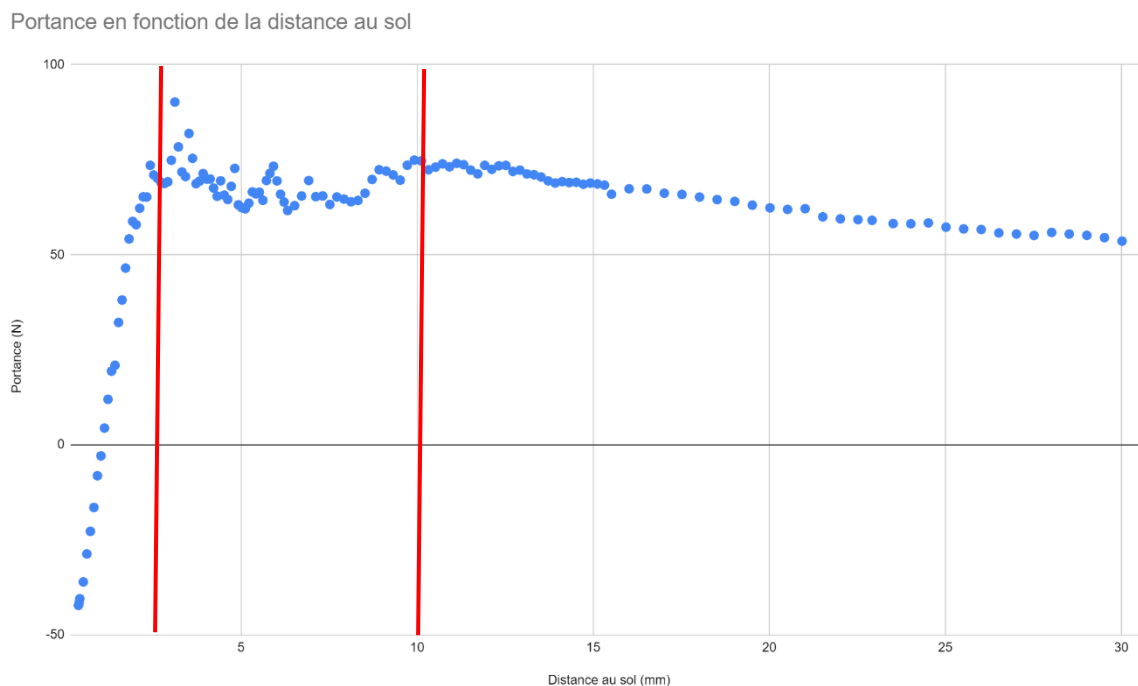


Figure 43 : Portance (N) en fonction de la distance au sol (mm)

On observe 3 phases distinctes :

- Une phase où la portance augmente quand la distance au sol diminue $[10 ; +\infty[$
- Une phase de transition où la portance est plus ou moins constante $[3.5 ; 10]$
- Une phase où la portance diminue quand la distance au sol diminue $] -\infty ; 3.5]$

On observe donc un point critique à partir duquel la portance va diminuer. Cela pourrait expliquer le phénomène de marsouinage. En effet, si on se retrouve dans cette zone où la portance diminue, la force de rappel des suspensions peut reprendre le dessus. La distance au sol va donc remonter ce qui va augmenter la portance. La force de portance va donc être plus grande que la force de rappel ce qui va baisser la distance au sol. On se retrouve donc dans un cycle d'hystérésis que nous allons détailler dans la partie suivante. Cependant on peut essayer d'expliquer pourquoi on a une perte de portance à partir d'une distance au sol de 3.5mm. Pour ce faire, on va étudier les lignes de fluide lors de nos simulations.



Figure 44 : Ligne de fluide pour une situation de référence pour une portance de 40N

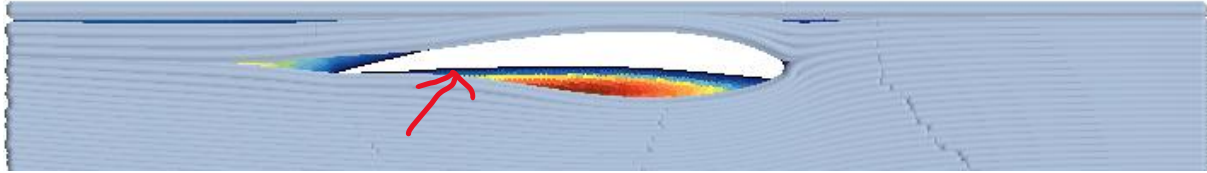


Figure 45 : Lignes de fluide pour une hauteur de 2.74 mm et une portance de 80 N

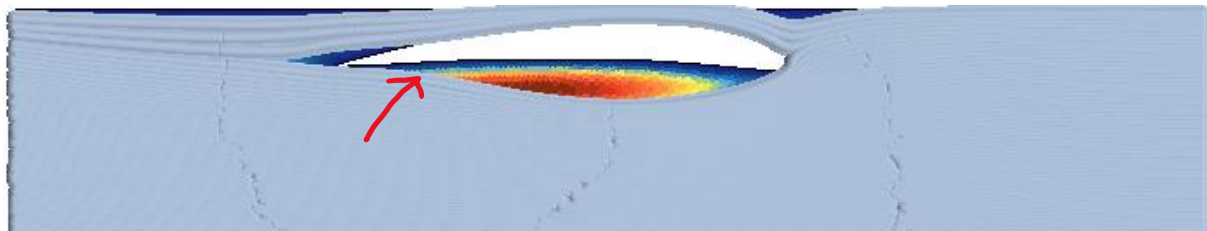


Figure 46 : Lignes de fluide pour une hauteur de 1.14 mm et une portance de 39 N

On observe un décollement des lignes de fluide de l'aile. Or quand il y n'y a pas de ligne de fluide, cela veut dire qu'il y a des tourbillons. On appelle ce phénomène, le décollement de flux. Cependant ce décollement entraîne une perte de portance. (Katz)

Il y a donc deux phénomènes qui rentrent en compétition :

- Le décollement du flux qui engendre une perte de portance.
- Le phénomène Venturi (Granier, Cours effet venturi , s.d.) qui quand on se rapproche du sol, va augmenter la vitesse du flux et donc la portance.

On comprend donc que dans la phase 1, le phénomène Venturi domine. Dans la phase 2, les deux phénomènes sont équivalents. Dans la phase 3, le décollement du flux domine.

Pour réduire ce phénomène on peut donc essayer d'avoir un profil d'aile qui permet un décollement du flux à une distance du sol la plus faible possible.

VII. Etude mécanique et simulation Matlab

A. Théorie

Notre objectif est d'étudier la théorie du couplage aérostructure entraînant le phénomène de marsouinage sur les Formule 1. On souhaite construire un modèle dynamique d'une Formule 1 en se focalisant sur ses suspensions et en intégrant les phénomènes aérodynamiques, notamment l'appui généré au sol.

La théorie de suspension d'une voiture étant complexe, nous avons décidé de nous baser sur un modèle de quart de voiture avec une seule suspension. Ainsi, seuls les déplacements verticaux seront étudiés.

Ce modèle semble cohérent car, en visualisant le marsouinage en vidéo, on observe que la voiture se soulève et s'abaisse d'un seul tenant lors des oscillations. Si un modèle prenant en compte 2 essieux de voiture aurait pu être utilisé, il semble trop complexe pour modéliser le phénomène.

On représente le quart de voiture par le schéma suivant :

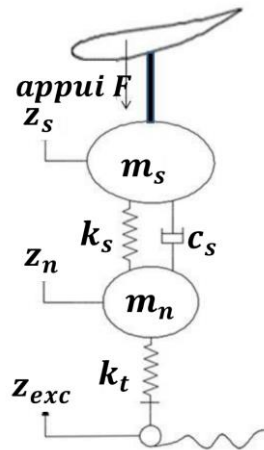


Figure 47 : Schéma du système mécanique étudié

On assimile le pilote et le châssis de la voiture à une masse suspendue m_s et la roue et son triangle de suspension associé à une masse non suspendue m_n . La position du châssis est repérée par l'ordonnée z_s , la position de la roue par l'ordonnée z_n et l'altitude de la route par l'ordonnée z_{exc} qui par ses différentes variations (modifications du profil de la route avec notamment des défauts rencontrés) va entraîner une réaction des amortisseurs et donc du châssis. L'appui aérodynamique, engendré par la géométrie de la voiture et par la vitesse que celle-ci possède, est modélisé un appui vertical F . En pratique, nous négligeons l'amortissement du pneu devant celui de l'amortisseur.

On peut alors appliquer l'équation de Lagrange au système, et déduire l'équation du mouvement. On ne s'intéresse pas ici aux positions d'équilibre de la voiture, mais seulement à l'amplitude des oscillations.

$$E_c^{\Sigma/Rg} = \frac{1}{2} m_n \dot{z}_n^2 + \frac{1}{2} m_s \dot{z}_s^2$$

$$E_{préd}^{\Sigma/Rg} = \frac{1}{2} k_t z_n^2 + \frac{1}{2} k_s (z_s - z_n)^2$$

$$D^{\Sigma/Rg} = \frac{1}{2} c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_n)^2$$

Equation de Lagrange :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_C}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_C}{\partial q_i} + \frac{\partial E_P}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i$$

Il vient alors le système d'équations :

$$\begin{cases} m_n \ddot{z}_n + c_s (\dot{z}_n - \dot{z}_s) + k_t z_n + k_s (z_n - z_s) = 0 \\ m_s \ddot{z}_s + c_s (\dot{z}_s - \dot{z}_n) + k_s (z_s - z_n) = -F(z_s) \end{cases}$$

On peut alors l'écrire sous forme matricielle en posant le vecteur $Z = \begin{pmatrix} z_n \\ z_s \end{pmatrix}$

$$\begin{bmatrix} m_n & 0 \\ 0 & m_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{z}_n \\ \ddot{z}_s \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} c_s & -c_s \\ -c_s & c_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{z}_n \\ \dot{z}_s \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} k_t + k_s & -k_s \\ -k_s & k_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} z_n \\ z_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -F(z_s) \end{pmatrix}$$

En ce qui concerne les valeurs des coefficients, nous avons comparé de nombreuses ressources bibliographiques traitant de voitures de course type Formule 1 pour finalement en tirer les valeurs suivantes :

- $m_s = 220 \text{ kg}$ (Quart de voiture et pilote)
- $m_n = 25 \text{ kg}$ (Roue et son triangle de suspension associé)
- $k_s = 16\,000 \text{ N.m}^{-1}$ (Ressort de la suspension)
- $k_t = 200\,000 \text{ N.m}^{-1}$ (Ressort du pneu)
- $c_s = 1\,000 \text{ N.s.m}^{-1}$ (Amortisseur suspension)

Ces valeurs sont une synthèse d'éléments trouvés dans des revues techniques, parutions scientifiques et forums de discussion spécialisés.

B. Calcul des pulsations propres et vecteurs propres

Afin de calculer la réponse d'une Formule 1 à une sollicitation en fréquence, on peut calculer les modes propres et vecteurs propre du système. Il s'agit alors de résoudre $\det(K - \omega^2 M) = 0$ pour le système non dissipatif. On utilise pour cela un programme Python :

```
D=np.dot(np.linalg.inv(M),K)
vp,Vp=np.linalg.eig(D)
omega12,omega22=vp[0],vp[1]
print("omega1=",np.sqrt(omega12))
print("omega2=",np.sqrt(omega22))
Phi1,Phi2=np.transpose(Vp)[0],np.transpose(Vp)[1]
print("Phi1=",np.transpose(Phi1))
print("Phi2=",np.transpose(Phi2))
```

Il vient alors : $\omega_1 = 8,20 \text{ rad/s}$, $\omega_2 = 92,98 \text{ rad/s}$,

Et $\Phi_1 = \begin{pmatrix} 0,0744 \\ 0,997 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$, $\Phi_2 = \begin{pmatrix} 0,999 \\ 0,00848 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

Nous avons pu par ailleurs tracer la réponse en fréquence de l'amplitude des oscillations pour le système dissipatif avec la méthode de Cramer en utilisant la notation complexe :

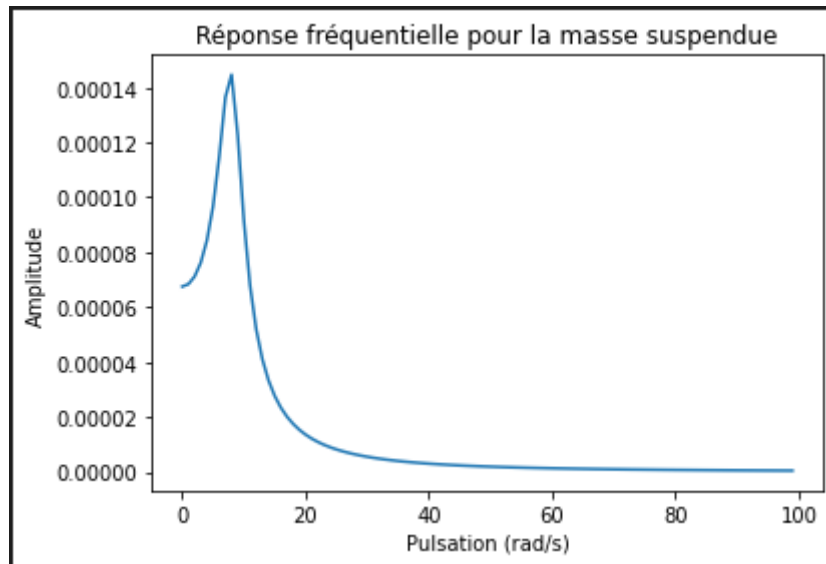


Figure 48 : Réponse fréquentielle pour la masse suspendue

Aussi, nous avons calculé les expressions des matrices de masse, amortissement et raideur dans la base modale :

$$\begin{aligned}
 M_m &= \begin{bmatrix} 2.50140334e+01 & 4.80867209e-16 \\ 5.98346751e-16 & 2.18919200e+02 \end{bmatrix} \\
 C_m &= \begin{bmatrix} 1016.96595471 & -930.57144203 \\ -930.57144203 & 851.51641972 \end{bmatrix} \\
 K_m &= \begin{bmatrix} 2.16257062e+05 & -1.65543322e-12 \\ -1.46000393e-12 & 1.47327754e+04 \end{bmatrix} \\
 F_m &= [-0.01694272 \quad 0.99382587]
 \end{aligned}$$

On a bien des matrices diagonales avec erreurs d'arrondi dus aux calculs numériques.

C. Simulation MATLAB Simulink

Afin de mettre en évidence le phénomène de marsouinage, nous avons construit un modèle MATLAB Simulink sous forme de schéma bloc reprenant le quart de voiture avec un bloc comprenant le modèle d'une suspension et un autre bloc agissant en rétroaction dans lequel nous avons ajouté avec l'appui qui varie en fonction de la garde au sol.

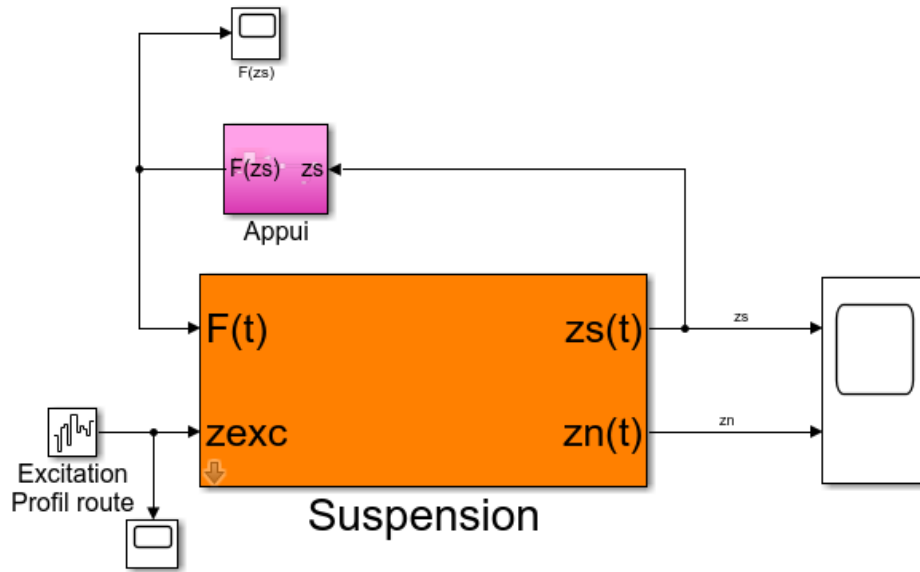


Figure 49 : Schéma bloc du système sous Simulink

L'entrée z_{exc} représente un profil de route « aléatoire » qui reflèterait le profil d'une route réelle comportant variations et défauts.

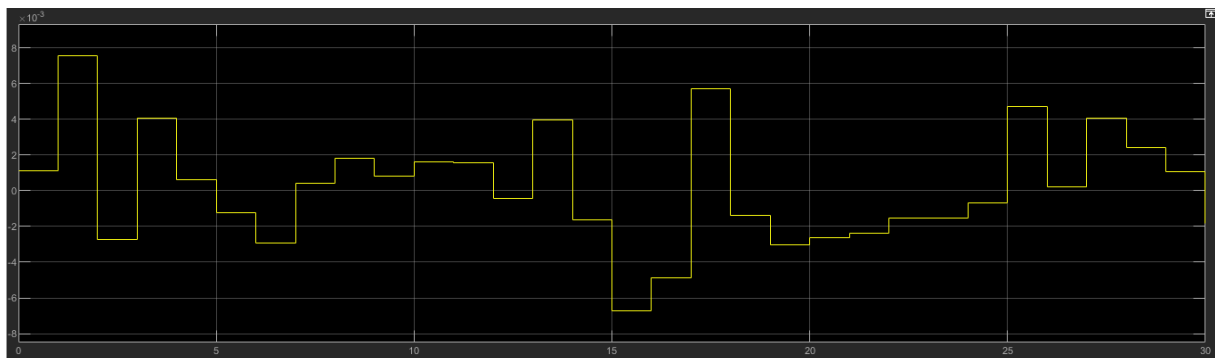


Figure 50 : Evolution du profil Zexc en fonction du temps

Nous avons choisi de modéliser le profil d'une piste de bonne qualité par un profil aléatoire présentant une variation de rugosité de l'ordre de 5mm. Ceci permet d'assurer une légère excitation du système.

Le bloc « Suspension » a été construit selon la théorie évoquée dans la précédente. Il résout dans le domaine de Laplace les deux équations du mouvement.

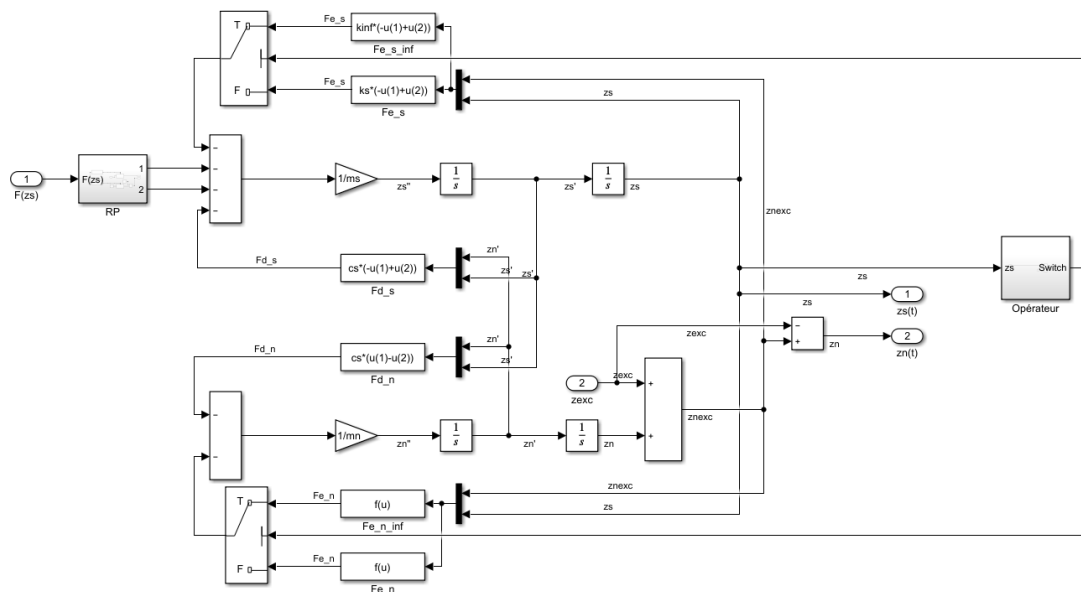


Figure 51 : Schéma bloc de la suspension du quart de voiture

Nous avons rajouté une butée à la suspension traduisant la non-linéarité qui apparait lorsque la compression de la suspension est trop importante. Cette non-linéarité peut se traduire ainsi :

$$k_s = \begin{cases} k_{snom} & \text{si } L_{suspension} > L_{butee} \\ \infty & \text{si } L_{suspension} < L_{butee} \end{cases}$$

La condition « si » est réalisée avec un switch commandé par un comparateur, présents dans le bloc « Opérateur ».

On ajoute également un opérateur permettant d'atteindre un régime permanent RP. En effet, deux approches sont possibles pour modéliser la manière dont la masse suspendue subit l'effort $F(zs)$:

- Lors de l'accélération, la vitesse de la F1 augmente et l'effort aérodynamique augmente (au carré : $F = \frac{1}{2} \rho C_S v^2$) et peut alors atteindre un effort aérodynamique critique propice au marsouinage.
- Le système atteint un régime permanent pour lequel le marsouinage apparaît. Cela revient à faire l'hypothèse que le marsouinage se produit à vitesse constante. Dans la réalité, le marsouinage apparaît en bout de ligne droite, donc lorsque la F1 subit une accélération assez faible. C'est cette hypothèse que l'on choisit. Concrètement, on laisse le système atteindre l'équilibre pour un effort aérodynamique constant et représentatif de la réalité, ici un appui de 7500N pendant 4s.

Par ailleurs, nous avons vérifié que le schéma bloc de la suspension était correct en développant les équations précédentes de la théorie, en les passant dans le domaine de Laplace et en comparant les résultats des deux schémas blocs :

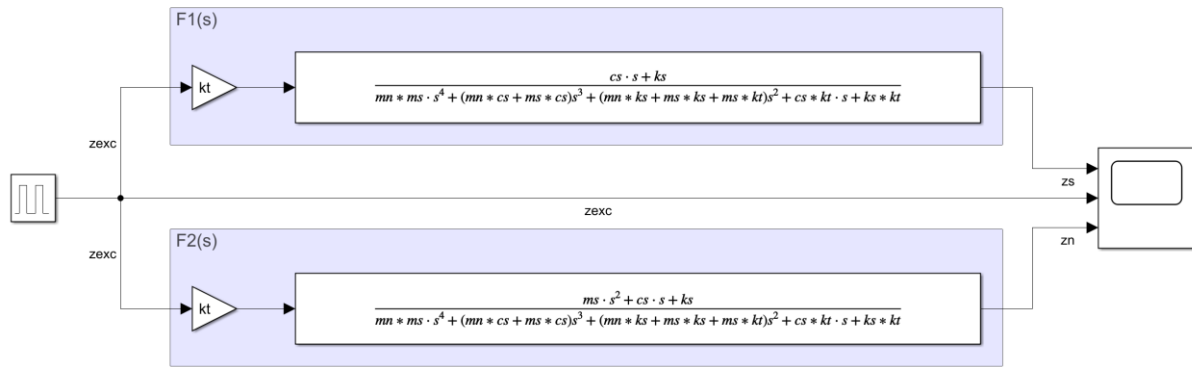


Figure 52 : Schéma bloc de la suspension seule

Le second bloc « Appui » traduit l'influence de l'appui aérodynamique en fonction de la garde au sol. Il comporte une boucle de rétroaction qui a vocation à soumettre le système à un appui aérodynamique suivant la caractéristique Appui/Garde au sol théorique (issue de la CFD) déterminée précédemment.

Une étude bibliographique a permis de quantifier l'effort aérodynamique d'une Formule 1 moderne. Ces chiffres fluctuent entre 7500 et 12000 N. Ainsi, il a fallu normaliser cette caractéristique. Nous avons pour cela translaté et dilaté la courbe pour la faire correspondre avec les caractéristiques du modèle mécanique :

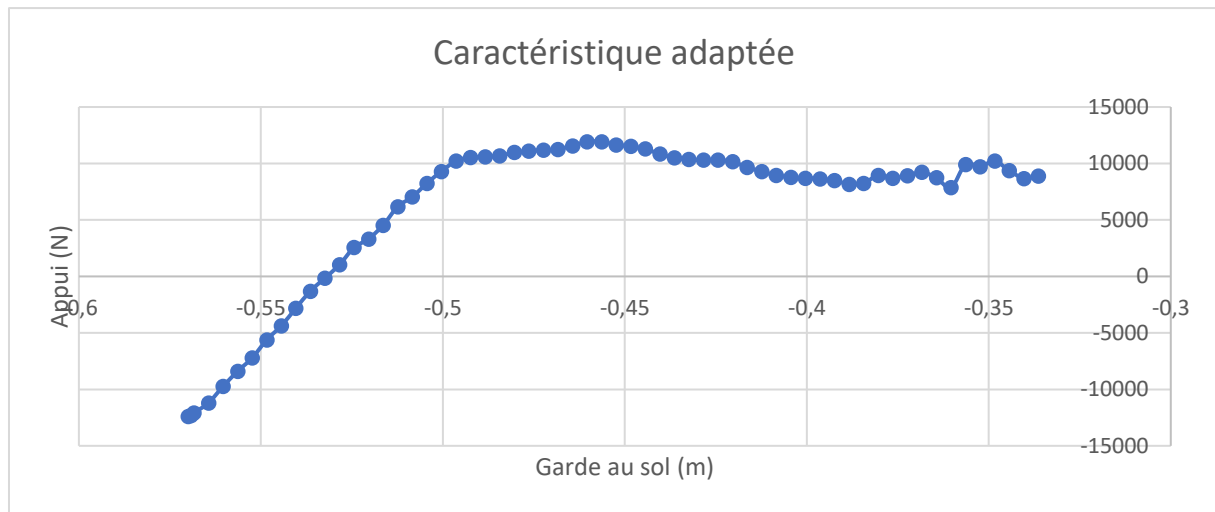


Figure 53 : Caractéristique Appui / Garde au sol adaptée à notre modèle

On dilate la partie utile, ie la partie concave sur une largeur de 10 cm, comprise entre 7500 et 12000 N.

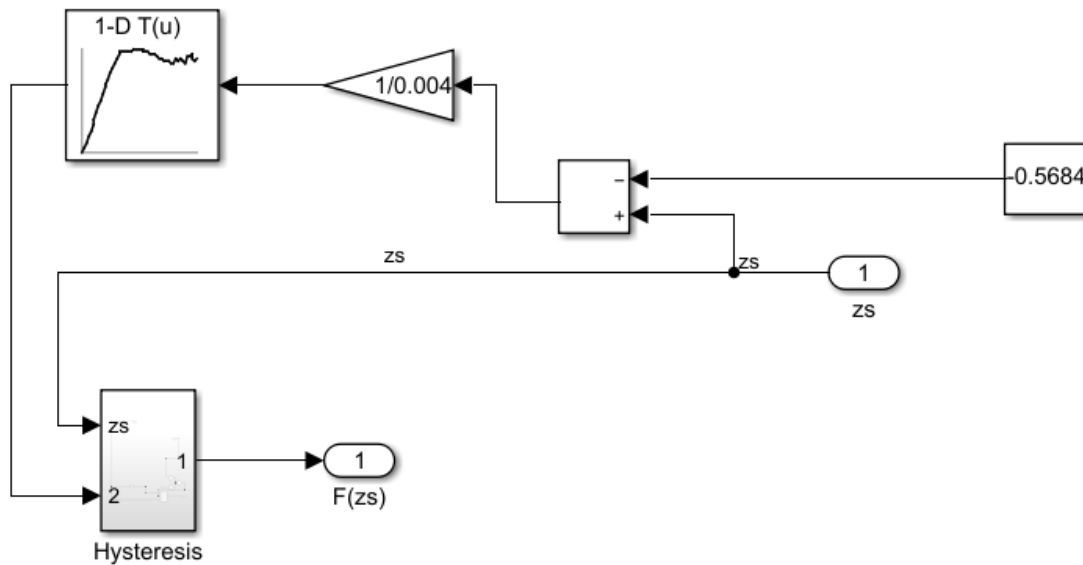
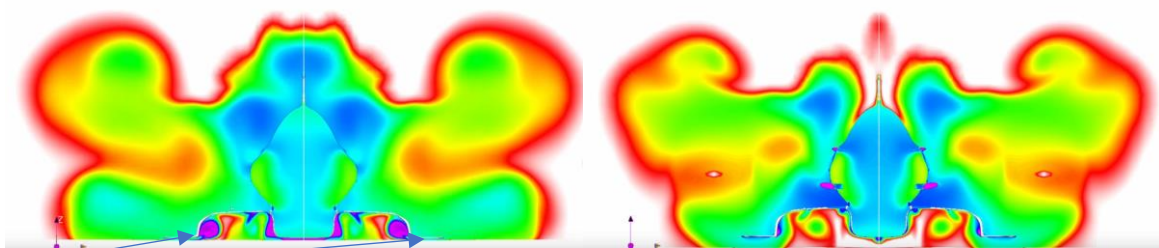


Figure 54 : Schéma bloc de l'appui aérodynamique

Au cours de notre étude, nous n'avons pas été correctement en mesure d'observer un phénomène aérodynamique, qui est le décollement de la couche limite de fluide en bout d'aile.

Sur une F1, ce phénomène entraîne une perte soudaine de vitesse du fluide sous la caisse de la voiture dans le fond plat, et donc une augmentation brutale de pression. Les pressions sur et au-dessous de la voiture s'équilibrent brutalement, et la garde au sol augmente de même.

KYLE.ENGINEERS, ingénieur aérodynamicien a pu mettre en évidence ce phénomène de manière informelle en réalisant une étude CFD sur une modèle complet de F1 2022



Vortex

Figure 55 : Vitesse de CFD d'un diffuseur de F1 en vue arrière avec garde au sol basse (gauche) et haute (droite)

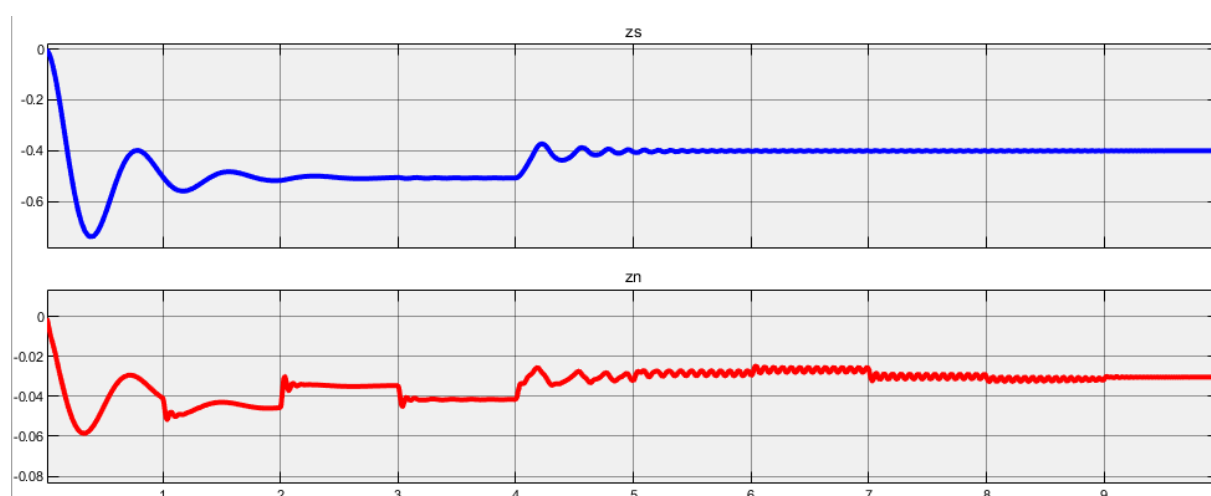
Selon lui, il pourrait survenir une séparation de la couche limite au niveau des bords du diffuseur, créant un contre vortex qui annulerait les bénéfices aérodynamiques du profil d'aile inversé

Ce phénomène est modélisé sur MATLAB en amenant à 0 l'effort aérodynamique si la garde au sol relative à la position initiale passe sous les -0,4m.

Paramètres	
ks =	16000
cs =	1000
kt =	200000
mn =	25
ms =	220
bump stop =	-0.4
kinf =	200000000
F0 =	7500

Figure 56 : Paramètres du bloc Suspension

On obtient alors l'allure suivante pour z_n et z_s :

Figure 57 : Résultats de la simulation : z_s en bleu et z_n en rouge en fonction du temps

On remarque qu'après 4 secondes, soit au terme du régime permanent, des oscillations se produisent. Celles-ci sont d'une amplitude de 2 cm, contre 10 cm dans la réalité, et d'une fréquence de 7 Hz, contre 5 pour les phénomènes observés en F1. De tels écarts sont dus aux choix dans notre modèle, notamment l'allure de la caractéristique Appui/Grade au sol, pour laquelle nous avons choisi des paramètres que nous ne pouvons pas transposer avec certitude sur un modèle réaliste. Toutefois, le phénomène d'hystérésis aérodynamique permet d'entretenir les oscillations et fait office de force excitatrice ici :

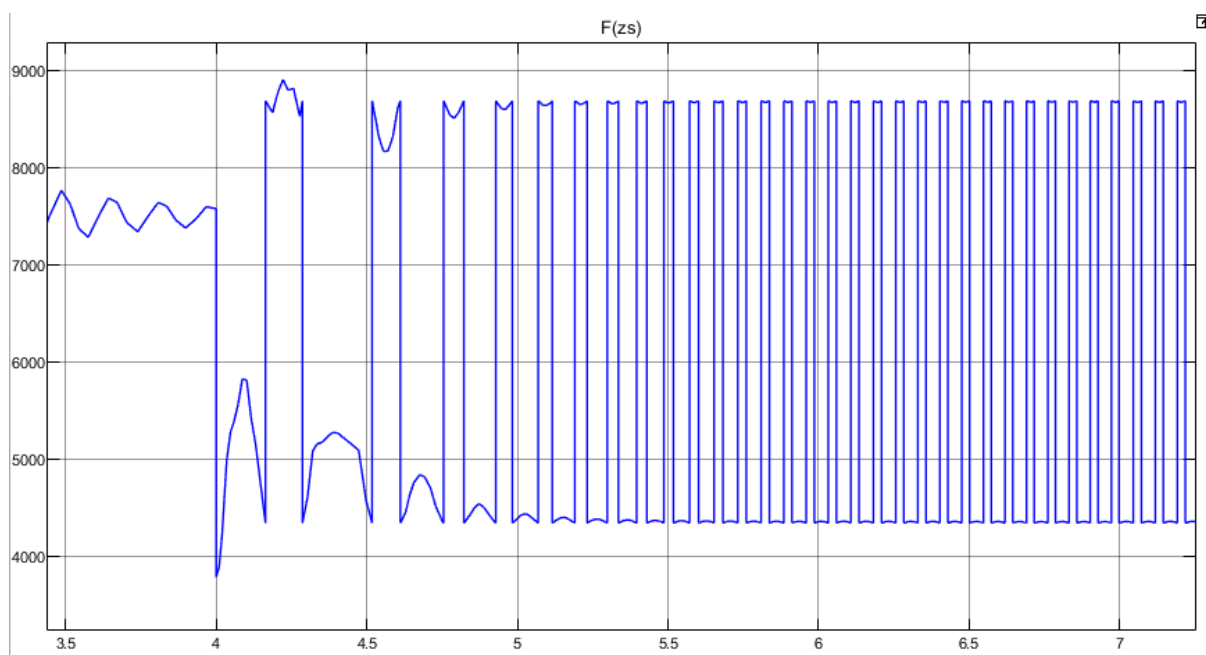


Figure 58 : Variations de $F(zs)$ en fonction du temps

On met en évidence les oscillations de l'appui et l'hystérésis dans le graphe ci-dessous :

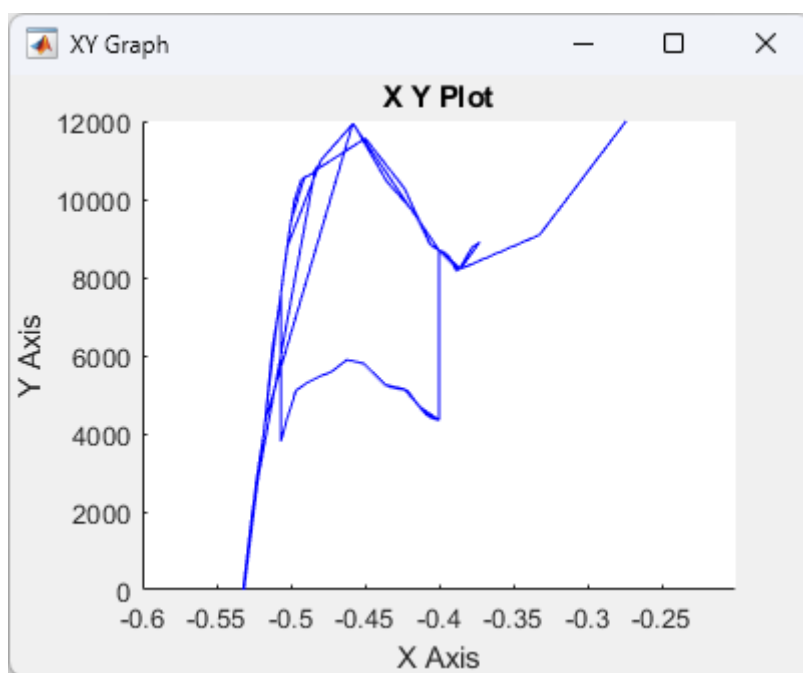


Figure 59 : Dispersion Appui / Garde au sol sous Matlab

Toutefois, ce modèle ne semble pas convenir totalement, car on observe, à terme, une stabilisation de la garde au sol.

Une étude plus poussée sur la caractéristique de l'appui en fonction de la garde au sol permettrait d'avoir des résultats précis.

VIII. Conclusion et perspectives

Ainsi, au cours de ce PJT, nous avons pu mettre en place différentes stratégies d'étude dans le but de mettre en évidence le marsouinage. Tout d'abord du point de vue aérodynamique et ensuite du point de vue mécanique.

Les différentes études aérodynamiques nous ont mené à comparer les modèles entre eux afin d'obtenir une simplification qui pouvait permettre une exploitation correcte des résultats.

Une étude aérodynamique complète, sur un modèle 3D de F1 complet est à envisager dans le futur. Du côté mécanique, il s'agirait d'utiliser un modèle à deux essieux, avec les effets aérodynamiques de l'assiette de la F1. Dans ce cas, on fait correspondre le comportement mécanique de la F1 à une cartographie aérodynamique. Dans l'avenir, l'étude du phénomène de marsouinage implique de réduire les oscillations et donc l'écrasement du véhicule sur le sol afin de réduire les pertes aérodynamiques ce qui engendre également des pertes énergétiques.

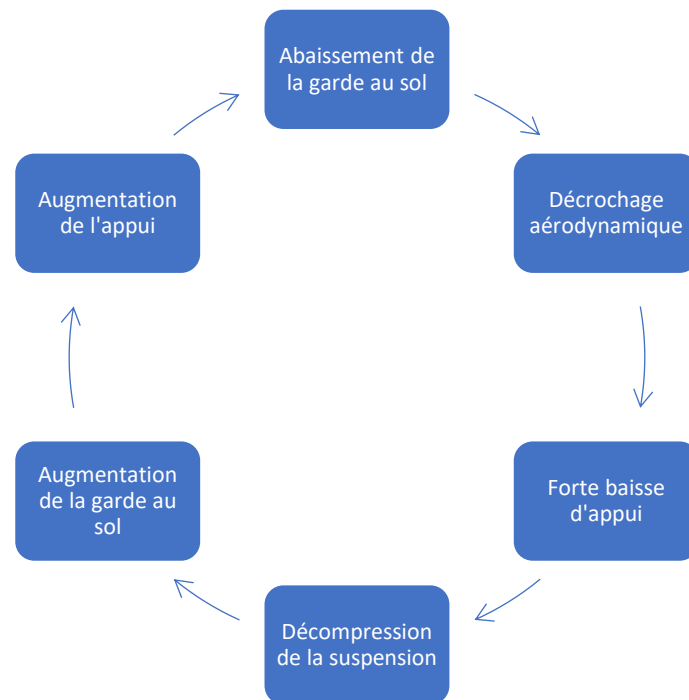


Figure 60 : Schéma du cycle de marsouinage

D'après nos résultats, il y a trois solutions possibles pour s'affranchir du marsouinage : Utiliser des suspensions pilotées, ce qui est interdit par le règlement technique, augmenter la raideur et l'amortissement de la suspension, ce qui nuit à la tenue de route, ou bien résoudre le problème concernant la séparation de la couche limite, générant des vortex faisant chuter l'appui aérodynamique généré par le fond plat.

IX. Bilan personnel

Ce PJT nous a permis d'approfondir nos connaissances à plusieurs échelles. En tant que passionnés d'automobile, nous voulions nous attaquer à ce phénomène ambitieux qui fait encore aujourd'hui l'objet de recherches approfondies et aux enjeux financiers importants. Nous nous sommes également autoformés sur des logiciels très usités en industrie, comme Star CCM+ pour l'aérodynamique, ou Simulink pour la modélisation de systèmes multiphysique. Ce PJT a été un vrai challenge, puisque peu de ressources documentaires fiables en lien avec ce phénomène sont disponibles.

Nous avons également mis à l'épreuve nos capacités d'organisation et de gestion de projet pour mener à bien le PJT et maximiser la portée de cette étude au travers des ressources disponibles et du temps imparti.

X. Bibliographie

Airfoil Tools. (s.d.). *GOE 801 (MVA 301) AIRFOIL (goe801-il)*. Récupéré sur Airfoil Tools:
<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=goe801-il>

Granier, O. (s.d.). *Cours effet venturi*. Récupéré sur olivier.granier.free.fr:
<http://olivier.granier.free.fr/ci/bernoulli/co/rappels-de-cours-meca-fluide-effet-venturi.html>

Granier, O. (s.d.). *Le théorème de Bernoulli et ses applications ("Classe inversée", PC*)*.
Récupéré sur olivier.granier.free.fr: <http://olivier.granier.free.fr/ci/bernoulli/co/rappels-de-cours-meca-fluide-tube-pitot.html>

Katz, J. (s.d.). *Race Car Aerodynamics Design for speed*. Bentley Publishers.

Ravelet, H. N. (2013, Septembre 2013). Introduction à la simulation numérique des écoulements. Application au transfert thermique sur plaque plane avec StarCCM+. Paris, France: Arts et Metiers ParisTech.

Timoteo Briet Blanes ; *On the influence of transient aerodynamic heave vibrations on racing car suspension parameters: aero post rig in a quarter car test* ; Aerodynamics Research Group ; 11/09/2018 (<https://vixra.org/pdf/1809.0192v1.pdf>)

Gadola M., Chindamo D., Magri P., Sandrini G. ; *Analyzing porpoising on high downforce race cars : causes and possible setup adjustments to avoid it* ; Energies 2022 ; 13/09/2022 (<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/18/6677>)

Samuel Gosselin-Brisson , *Étude d'un système de contrôle pour suspension automobile*, Mémoire à l'Université du Québec, Avril 2006
(<https://constellation.uqac.ca/id/eprint/507/1/24625893.pdf>)

Nacho Suarez-PhD, Timoteo Briet and Enrique Scalabroni ; *Tech Explained: Simulating Porpoising on a quarter-car suspension model*, 09/2022 (<https://www.racecar-engineering.com/news/simulating-porpoising-on-a-quarter-car-suspension-model/>)

KYLE.ENGINEERS ; *How Does Porpoising Work ? - F1 Aero Explained* ; Youtube ; 20/05/2022