



ÉCOLE
CENTRALELYON

ÉCOLE CENTRALE LYON

PROJET D'APPLICATION RAPPORT

Rapport PA n°253

Elèves :

Robin CLAMENS
Josselin KIEFEL
Yohan REGUIAI
Michele ROMANELLI
Andrea POSSAMAI
Agostino CEMBALO

Enseignant :

Sebastien CECILLON
Patrick SERRAFERO

3 mai 2019

Table des matières

Remerciements	5
Introduction	6
1 Présentation de l'association	7
1.1 Histoire de l'écurie	7
1.2 Présentation du Formula Student	7
1.2.1 Une compétition d'envergure internationale	7
1.2.2 Les épreuves statiques	8
1.2.2.1 Acceleration (100 points)	8
1.2.2.2 Skid-pad (75 points)	8
1.2.2.3 Autocross (125 points)	8
1.2.2.4 Endurance (275 points)	9
1.2.2.5 Efficiency (100 points)	9
1.2.3 L'EPSA au Formula Student	9
1.3 Partenaires	10
1.3.1 L'école de production de Boisard	10
1.3.2 L'école de production La Mache	10
1.3.3 Les ateliers d'apprentissage de La Giraudière	11
1.3.4 Le lycée professionnel Emile-Béjuit	11
1.4 Sponsors	11
1.4.1 Les différents types de soutien	12
1.4.1.1 Le versement de la taxe d'apprentissage	12
1.4.1.2 Les dons	12
1.4.1.3 Préserver les sponsors et démarcher	13
2 Présentation du projet	14
2.1 Présentation équipe et répartitions dans les pôles	14
2.2 Objectifs	14
2.2.1 Choix de la compétition	14
2.2.2 Performances prévisionnelles	14
2.2.3 Définition du cahier des charges général du véhicule	15
3 Présentation du PA	16
3.1 Cahier des charges	16
3.2 Responsabilités de chaque membre	16
3.2.1 Le châssis équipé, CLAMENS Robin	16
3.2.2 La carrosserie et le fond plat, KIEFEL Josselin	17
3.2.3 L'ergonomie du véhicule, REGUIAI Yohan	17
3.2.4 L'aérodynamisme, La Team ITALIA (CEMBALO Agostino, ROMANELLI Michele, POSSAMAI Andrea)	17

4 Travail réalisé : descente et remontée du cycle en V	18
4.1 Châssis	18
4.1.1 Conception	18
4.1.2 Fabrication	19
4.1.3 Analyse de rigidité et masse	20
4.2 Équipements	21
4.2.1 Conception	21
4.2.2 Fabrication	21
4.2.3 Intégration	22
4.3 L'ergonomie du cockpit	22
4.3.1 Philosophie	22
4.3.2 Conception	24
4.4 Carrosserie et fond plat	24
4.4.1 Conception de la carrosserie	24
4.4.2 Fabrication de la carrosserie	25
4.4.3 Conception du fond plat	26
4.4.4 Fabrication du fond plat	27
4.5 Développement aérodynamique	27
4.5.1 Analyse de référence sur la voiture pour la saison 2019	28
4.5.2 Diffuseur	29
4.5.3 Aile Arrière	32
4.5.4 Aile antérieure	36
4.5.5 Voiture complète	38
4.5.6 Objectifs futurs	41
5 Conclusion	43
6 Bibliographie	44
7 Annexes	45
7.1 Historique des véhicules EPSA	45
7.2 Performances des différents véhicules	46

Table des figures

1 Les véhicules de l'écurie conçus pour le Formula Student jusqu'à aujourd'hui	6
2 Logo de l'EPSA	7
3 Répartition des points sur les différentes épreuves statiques (en bleu) et dynamique (en rouge)	8
4 Circuit du skidpad	8
5 Atomix lors de l'épreuve d'autocross en 2016 au FSUK	9
6 Lycée Boisard avec A. Perdereau, M. Chetibi et M. Passalacqua	10
7 Châssis d'Optimus, Alexis(à droite), Thibaud(à gauche), R.Vernay (au centre)	11
8 Réalisation de l'admission par ARRK	12
9 Réalisation des inserts côté porte-moyeu par la société Alpentech	13
10 Cahier des charges du châssis	16

11	Cahier des charges de la carrosserie	16
12	Maquette numérique de la structure tubulaire du châssis	18
13	Soudure du châssis à la Giraudière	20
14	Simulation numérique du test en torsion de la structure tubulaire	20
15	Test en torsion expérimentale de la cellule avant	21
16	Gabarit pour fixation des chapes moteur	22
17	Position du pilote installé dans Optimus	23
18	Simulation de la vue du pilote à bord de la maquette Catia	24
19	Rendu 3D du nez (en rouge) et des plaques latérales (en noir)	25
20	Fraisage d'un bloc de polyester pour la réalisation du moule	26
21	Maquette 3D du fond plat	27
22	Optimus sans appendices aérodynamiques	29
23	Cadre conceptuel du fonctionnement d'un diffuseur	30
24	Maquette du premier diffuseur réalisé	30
25	Maquette du premier diffuseur réalisé sur CATI (vue latérale)	30
26	Maquette diffuseur	31
27	Maquette définitive diffuseur	31
28	Champ de pression développé par le diffuseur (partie en gris ne génère pas de déportance)	31
29	Stream line diffuseur	32
30	Différence entre un profil d'un avion et celui d'une voiture	33
31	Champ de vitesse autour de la première version de l'aile arrière - Simulation 2D	34
32	Streamline première aile arrière	34
33	Première aile arrière terminée	34
34	Procédé d'optimisation	35
35	Procédé d'optimisation - Évolution d'un paramètre	35
36	Profils dernière maquette	35
37	Simulation numérique profils	35
38	Aile arrière finale	36
39	Stream line aile arrière finale	36
40	Aile antérieure, première configuration	36
41	Petite appendices au dessous de l'aile	37
42	Parties aérodynamiques endplates	37
43	Tableau résultats Aile antérieure	37
44	Schéma d'amélioration de l'aile antérieure	37
45	Stream-line aile antérieure	38
46	Maquette finale de la voiture complète (Vue antérieure)	38
47	Maquette finale de la voiture complète (Vue arrière)	39
48	Stream line maquette complète	39
49	Stream line maquette complète	40
50	Pression statique voiture complète	40
51	Pression statique voiture complète	40
52	Exemple du FSAE Design Spec Sheet - Partie Aérodynamique	41
53	Historique des véhicules de l'Ecurie Piston Sport Auto	45
54	Performances comparées des différents véhicules de l'écurie	46

Résumé

Le projet Optimus, au sein de l'Ecurie Piston Sport Auto (EPSA), regroupe 3 Projets d'application industriels, qui font suite aux Projets d'études. Chaque PAi est responsable de la conception, fabrication et intégration d'un système de la voiture de compétition Optimus, qui participera au Formula Student Netherlands et Italy, compétition étudiante d'ingénierie qui rassemble des équipes du monde entier.

Notre groupe de PAi est responsable du châssis équipé et carrossé, véritable squelette et enveloppe du véhicule.

Ce rapport présente la démarche d'ingénierie mise en place au cours de l'année pour le châssis équipé et carrossé, ce qui correspond à une structure tubulaire et ses équipements, à la carrosserie et aux équipements aérodynamiques. Afin d'aboutir à un prototype dans les temps, nous commençons par la phase de conception de chaque système, puis la production et l'achat des pièces. Une fois l'approvisionnement terminé, l'intégration du véhicule peut commencer pour être prêt à rouler début avril 2019.

Abstract

The Optimus' project within the EPSA Team includes students in 3 Application Projects from the previous Studies Projects. Each Application Project is in charge of the conception, fabrication and integration of one system in the Optimus race car which will participate in the Formula Student Netherlands and Italy this summer. The Formula Student is an international student engineering competition. Our Application Project's team is in charge of the equipped chassis and aerodynamics. This report presents the continuity of the engineering approach started in the Study Project last year for the chassis. Furthermore, the project is broken down in several stages : first of all, the conception of each subsystem, then the production and supplying of every part. When the supplying is over, the integration of the car can start, for a first roll-out early April 2019. This report mainly focuses around each of the engineering stages encountered throughout the year.

Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement les équipiers EPSAMen qui ont participé, d'une façon ou d'une autre, au déroulement du projet Optimus. Les Première années ont apporté leur soutien dans la conception de notre véhicule et l'ont fait avec brio. Nos camarades de deuxième année des autres départements ont fait un travail remarquable, certains sont même partis de rien en intégrant le projet en cours de route en septembre. Les troisième années, en particulier Aurélien Biennet, Antoine Maros, Arthur Perdereau, Guillaume Touzé, Antoine Elain, Benjamin Delalande, Brice Roblot, Guillaume Tsilefski et Jacques Moulin nous ont largement épaulés et ont été de très bon conseil.

Nous remercions également Nicolas Gameiro et Maxime Proriol nos directeurs qui nous ont permis d'avancer sereinement dans le projet. Ils ont su nous motiver et nous diriger pendant deux ans, nous en sommes reconnaissants.

Nos remerciements s'adressent également à Patrick Serrafero qui a permis que trois générations avancent ensemble sur un même projet. Cela permettra aux actuels première années d'entamer encore plus rapidement leur propre véhicule Invictus, forts des savoirs et savoir faire que nous aurons essayé de leur transmettre. Nous tenons aussi à remercier Pierre-Louis Jaeger dont l'aide a été précieuse pour la conception des cartes électroniques et plus généralement l'ensemble du faisceau électrique.

Nous remercions Sébastien Cécillion, qui a pris le temps de nous aiguiller au cours des RVPs, ainsi que Christophe Corre qui a apporté de précieux conseils à notre équipe aérodynamique. Merci également à Béatrice Chervet et Isabelle Tixier qui se sont occupées de toutes nos commandes.

Nous remercions ensuite nos partenaires, les élèves des lycées La Giraudière, Boisard, La Mache, du lycée automobile Émile Béjuit. Cette année encore, ils ont fourni un travail exceptionnel produisant des pièces d'une grande qualité. Un grand merci particulier à La Giraudière, et en particulier aux élèves soudeurs Alexis et Thibaud qui, sous la supervision patiente et efficace de Roland VERNAY ont réalisé le châssis équipé.

Nous remercions nos sponsors : Total, Alten, AlpenTech... Ils nous fournissent un soutien financier sans lequel le projet Optimus n'aurait sûrement jamais vu le jour.

Enfin, nous remercions particulièrement M. Debouck, Mme. Galland et l'équipe financière de l'ECL qui ont cru en notre projet.

Introduction

L'Ecurie Piston Sport Auto, ou EPSA, est une association d'élèves-ingénieurs de l'Ecole Centrale de Lyon qui conçoit et produit des prototypes de compétition avec le concours de certains lycées professionnels du bassin lyonnais.

Fondée en 2002, l'Écurie a commencé par participer pendant onze ans au trophée SIA, compétition nationale tournée vers l'efficacité énergétique, avant de se consacrer au Formula Student à partir de 2014. Celui-ci se distingue du trophée SIA par un niveau technologique beaucoup plus poussé, semblable à la Formule 1 pour les meilleures écuries, son envergure internationale et le fait qu'il insiste, en outre des performances pures des véhicules, sur la justification de la démarche de conception.

L'Ecurie a connu l'année dernière une transformation profonde de son mode de fonctionnement. En effet, jusqu'à présent, les projets de l'Ecurie étaient réalisés chaque année par une vingtaine d'élèves-ingénieurs de l'École en première puis en deuxième année, tandis que dorénavant, les élèves de première année sont impliqués, là où, selon l'ancien modèle de management, ils auraient commencé un projet séparé à leur entrée à l'École. Ce travail en commun, entre deux générations de Centraliens, a pour vocation d'accélérer l'apprentissage technique des nouveaux membres de l'écurie, afin que ceux-ci puissent progresser, sur le long terme, dans la maîtrise des technologies, des process et de la justification des choix de conception.

Par ailleurs, l'écurie peut également compter, pour la soutenir tout au long du projet, sur une "Académie", constituée d'anciens membres de l'écurie, aujourd'hui diplômés, qui apportent énormément chaque année, que ce soit par les formations qu'ils peuvent nous dispenser, les conseils continus donnés au cours de nos échanges et l'expérience qu'ils ont retiré des compétitions auxquelles ils ont participé.



FIGURE 1 – Les véhicules de l'écurie conçus pour le Formula Student jusqu'à aujourd'hui

1 Présentation de l'association

L'EPSA (Ecurie Piston Sport Auto) est une association loi 1901 d'élèves-ingénieurs de l'École Centrale Lyon, ayant pour objectif de former les élèves à l'ingénierie automobile en leur proposant chaque année de concevoir, de produire et d'intégrer un véhicule de compétition.

1.1 Histoire de l'écurie

Chaque véhicule est développé pendant deux ans par la même équipe, qui réalise la conception lors de la première année, et la production lors de la deuxième, à l'aide des lycées techniques partenaires de l'écurie. Depuis sa création en 2002 par M. Serrafero, l'Ecurie a réalisé déjà 16 véhicules (cf annexe n°2) : 7 prototypes thermiques conçus pour le challenge SIA, 5 prototypes hybrides pour le trophée SIA, et 4 prototypes pour la participation au Formula Student.



FIGURE 2 – Logo de l'EPSA

L'écurie, créée en 2002 par M. SERRAFERO a d'abord participé au trophée SIA, compétition organisée par la Société des Ingénieurs de l'Automobile et destinée aux étudiants de l'enseignement supérieur. Ce Trophée visait à faire concourir des véhicules prototypes écologiques de compétition. La particularité de ce Trophée était l'obligation pour tous les concurrents de disposer d'un mode « Zéro Emission », c'est-à-dire que les véhicules devaient disposer d'une motorisation non thermique. Le règlement mettait également l'accent sur l'innovation afin de stimuler l'imagination des futurs ingénieurs. L'EPSA a au total remporté 12 trophées au cours des 10 années où l'écurie a participé à la compétition. A partir de 2014 et suite à la fin du trophée SIA, l'écurie s'engage au sein d'une nouvelle compétition : le Formula Student.

1.2 Présentation du Formula Student

1.2.1 Une compétition d'envergure internationale

Organisé par la Society of Automotive Engineers (SAE), le Formula Student (ou FS) est une compétition ouverte aux étudiants du monde entier. Des éditions s'organisent chaque année dans de nombreux pays (Etats-Unis, Allemagne, Asie, FS ATA en Italie, Espagne, FS UK en Angleterre...). La compétition est soumise à un règlement très strict qu'il est impératif de respecter [2]. L'EPSA participera à la compétition aux Pays-Bas du 8 au 11 juillet, et en Italie du 24 au 28 juillet 2019, et prendra alors part à différentes épreuves, à l'issue desquelles le véhicule sera classé (cf Figure 3).

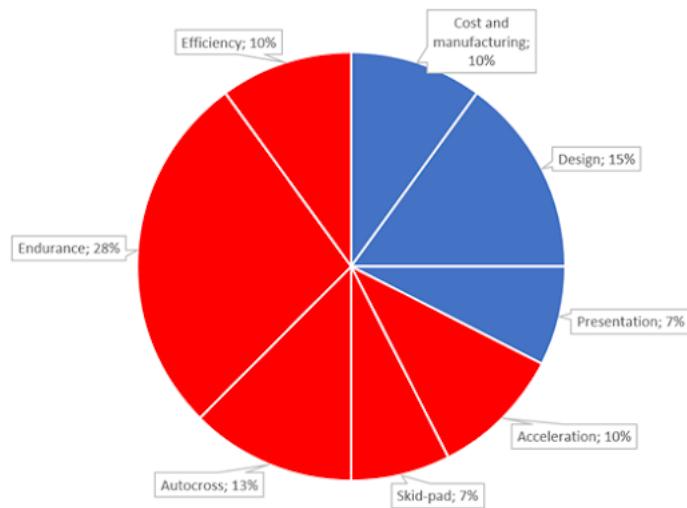


FIGURE 3 – Répartition des points sur les différentes épreuves statiques (en bleu) et dynamique (en rouge)

1.2.2 Les épreuves statiques

1.2.2.1 Acceleration (100 points)

Le véhicule doit réaliser 75 m, départ arrêté, le plus vite possible. Pour cela, chaque équipe peut faire rouler 2 pilotes avec pour chaque pilote 2 essais soit 4 essais au total. Le meilleur temps effectué permet de noter le véhicule.

1.2.2.2 Skid-pad (75 points)

Le véhicule doit parcourir le circuit en Figure 4 le plus rapidement possible. On teste ici la tenue de route du véhicule. Cette fois encore, chaque équipe peut faire rouler 2 pilotes, avec 2 essais par pilotes.

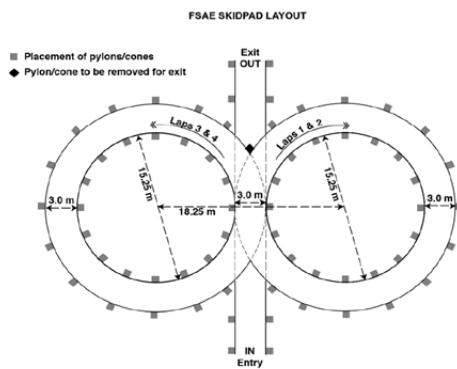


FIGURE 4 – Circuit du skidpad

1.2.2.3 Autocross (125 points)

Sur un circuit contenant des épingle, des chicanes, des slaloms, et des lignes d'accélération, de diamètres et longueurs définis différemment pour chaque compétition, le

pilote effectue un tour d'environ 1 km (cf Figure 5). Il doit le réaliser le plus rapidement possible. Chaque équipe peut faire courir 2 pilotes avec un essai par pilote.



FIGURE 5 – Atomix lors de l'épreuve d'autocross en 2016 au FSUK

1.2.2.4 Endurance (275 points)

Sur le même circuit que pour l'épreuve d'autocross, chaque véhicule doit cette fois-ci réaliser 22 km en changeant de pilote soit 11 km par pilote. C'est majoritairement la fiabilité du véhicule qui est évalué ici.

1.2.2.5 Efficiency (100 points)

Au cours de l'épreuve d'endurance, la consommation en carburant du véhicule est calculé et en fonction de la consommation des autres véhicules, un score est attribué à chaque équipe.

1.2.3 L'EPSA au Formula Student

Après 5 saisons effectuées pour le Formula Student, l'EPSA a déjà pu réaliser de belles performances au cours des compétitions. Pour pouvoir comparer les classements entre le FS ATA et le FSUK, il est important de garder en tête la différence de niveau entre les deux compétitions : une 10ème place au FS ATA égale à une 25ème place au FSUK est un bon ordre d'idée.

C'est en 2015 que l'écurie s'illustre particulièrement avec l'obtention par l'équipe de Dynamix du prix du Best newcomer, prix récompensant la meilleure équipe parmi les nouvelles équipes participant au FSUK.

Parmi les points forts de l'écurie, on peut citer une maîtrise en constante amélioration du Cost event. Cette épreuve, où l'écurie a terminé 5ème l'année dernière au FS ATA, est maintenant devenu un des gros points forts de l'EPSA. La réussite à l'épreuve de Design est quant à elle conditionnée en partie par la préparation de l'équipe en amont de la compétition, préparation mal anticipée lorsque l'équipe fait face en parallèle à d'autres soucis sur le véhicule. Enfin, l'épreuve de Présentation est généralement mal préparée par l'écurie car elle intéresse moins les membres des équipes.

Sur les épreuves dynamiques, c'est l'endurance qui conditionne la réussite de la compétition. Cependant, sa difficulté est principalement amenée par le manque de fiabilité des voitures. Ainsi, une majorité des véhicules n'arrive pas au bout des 22 km et ne peut donc engranger que 22 points sur au total 275 points. C'est dans cet objectif de fiabilisation

que nous sortons Optimus tôt et que nous participerons à deux compétitions cette années.

1.3 Partenaires

L'EPSA est une association qui fonctionne en collaboration avec des lycées professionnels et des écoles de production de la région lyonnaise. Ces Lycées, en échange d'un financement de la part de Total dans le cadre du projet, vont réaliser une majorité de la production du véhicule.

A la différence d'une entreprise, les lycées et principalement le personnel enseignant va également apporter au projet une expertise technique ainsi qu'un soutien dans les situations d'urgence. Le but est également pour les élèves de ces lycées de pouvoir apprendre leur métier dans le cadre d'un projet stimulant. Cela fait maintenant plus de 10 ans que ces partenaires suivent l'écurie et font partie intégrante du projet.

1.3.1 L'école de production de Boisard

Boisard est une école de production situé à Vaulx-en-Velin qui forme chaque année des CAP et des lycées professionnels dans les domaines de la métallurgie, de la mécanique automobile, de l'usinage, ... Dans le cadre du projet, ce sont essentiellement avec l'atelier d'usinage que les membres du projet sont en interaction.

Pour la saison 2019, l'école de production de Boisard a réalisé, comme chaque année, l'ensemble des pièces de la roue équipée du véhicule Optimus ainsi que d'autres pièces intégrées sur la voiture (inserts de triangles, transmission secondaire, ...).



FIGURE 6 – Lycée Boisard avec A. Perdereau, M. Chetibi et M. Passalacqua

1.3.2 L'école de production La Mache

L'école de production de La Mache, situé dans Lyon, réalise chaque année pour le projet toute la découpe laser et le pliage du véhicule ainsi que l'usinage d'autres pièces. Cette année, La Mache a notamment réalisé l'ensemble des pièces composant le pédalier.

1.3.3 Les ateliers d'apprentissage de La Giraudière

La Giraudière est en charge chaque année de la réalisation de la soudure du châssis et des équipements (sur lesquels viendront s'attacher les autres sous-systèmes). Chaque année, deux élèves de La Giraudière s'occupent, sous la supervision de M. Vernay, de souder l'intégralité du châssis. Cette année, ce sont Alexis et Thibaud qui se sont chargés de souder Optimus (cf figure 10).



FIGURE 7 – Châssis d’Optimus, Alexis(à droite), Thibaud(à gauche), R.Vernay (au centre)

1.3.4 Le lycée professionnel Emile-Béjuit

Le lycée Emile-Béjuit situé à Bron est un lycée professionnel sur les métiers de l’automobile. Chaque année, le lycée apporte son expertise dans le domaine de la mécanique automobile à l’association. Ils mettent également à disposition des élèves leur matériel : banc de réglages statique 3D du véhicule, déjantage et rejantage des pneus... Ils réalisent également généralement la décoration de la carrosserie.

C'est également dans l'enceinte du lycée que se trouve la plateforme d'intégration de l'EPSA (cf figure 11). Cette année, la plateforme a d'ailleurs été remise à neuf et réorganisée.

1.4 Sponsors

En plus des partenaires, l'association peut également compter sur le soutien de nombreux sponsors. Cette année, le nombre total de sponsors s'est encore agrandi et ce-dernier

devrait continuer d'augmenter d'ici la fin de l'année. Tous les sponsors se trouvent sur la page internet de l'EPSA [1].

1.4.1 Les différents types de soutien

Ces sponsors se regroupent principalement autour de 2 types : le versement de la taxe d'apprentissage et les dons en matériel, matières premières, services.

1.4.1.1 Le versement de la taxe d'apprentissage

Chaque année, l'Ecole Centrale de Lyon met à disposition du projet un budget contrôlé. En échange de cela, l'écurie doit démarcher des entreprises pour qu'elles donnent leur taxe d'apprentissage à l'ECL. En fonction de la taxe d'apprentissage récolté chaque année, le budget peut être réévalué à la hausse ou à la baisse.

C'est encore de ce type de soutien et de ce budget que l'écurie est principalement dépendante. Chaque année, Total verse à Centrale environ 30 000 euros, sans compter le financement des partenaires, ce qui fait de lui le plus important sponsor de l'écurie et ce depuis 2002 et les débuts de l'EPSA. Alten également soutien de manière importante le projet, tout comme Alpentech ou Volvo.

1.4.1.2 Les dons

C'est vers ce type de financement que l'association cherche à se tourner maintenant et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord car cela représente moins de frais pour les entreprises qui sont donc plus aptes à accepter et de plus car ces dons seront ensuite en général directement intégrés sur le véhicule, ce qui représente une vitrine idéale pour l'entreprise.

Les dons comprennent les dons de pièces (SKF pour les roulements, Souriau pour les connecteurs, ARRK pour l'admission imprimé en 3D (cf Figure 8)), les dons de matière première (Textreme pour de la fibre carbone) mais également les dons de services (PSEP industrie pour la réalisation de la peinture).



FIGURE 8 – Réalisation de l'admission par ARRK

On peut également noter que certaines entreprises réalisent à la fois du versement de TA et des dons comme par exemple Alpentech qui a réalisé les inserts doubles des triangles (cf Figure 9) ou encore Volvo Truck qui prête à l'EPSA sa piste à Saint-Priest lors de la période des essais.



FIGURE 9 – Réalisation des inserts côté porte-moyeu par la société Alpentech

1.4.1.3 Préserver les sponsors et démarcher

Préserver les sponsors représente une partie du travail de l'association afin d'assurer la pérennité de l'EPSA. Cela passe par la réalisation d'événements sur mesure (journée Total, Epsalten), par la communication autour des entreprises (sur les réseaux sociaux, sur la newsletter), par la mise en avant des entreprises lors de forums (salon Carnot, salon de l'industrie), ...

Le démarchage est lui aussi partie prenante du projet. Lors de la réalisation des devis pour les commandes, chaque équipier du projet cherche à démarcher les entreprises pour obtenir des réductions voir des dons. Lors des salons également, les personnes représentant l'association cherchent à obtenir des contacts, à démarcher les entreprises, ...

2 Présentation du projet

Chaque année, l'EPSA permet à un projet de se concrétiser. Pour la saison 2018, une équipe d'élèves-ingénieurs de deuxième année et de première année se sont chargés de la réalisation du véhicule Optimus, le 18ème de l'écurie.

2.1 Présentation équipe et répartitions dans les pôles

L'équipe est composée d'étudiants en deuxième année de l'Ecole Centrale de Lyon, répartis sur 3 PA différents concernant la liaison au sol, le châssis équipé et carrossé, la motorisation et faisceau électrique.

En réalité, la répartition entre PA ne correspond pas exactement à la répartition exacte de l'équipe. L'équipe se répartit en 4 pôles qui sont le pôle Châssis équipé et carrosserie, le pôle Liaison au sol, le pôle Électronique ainsi que le pôle Motorisation. Chaque pôle possède un chef de pôle qui est l'intermédiaire principal de l'équipe de direction. L'équipe de direction est composée quant à elle du directeur de projet et du directeur de projet durant la phase de conception et du directeur logistique, du directeur financier, du directeur intégration et du directeur essais pendant la phase remontante du cycle en V.

Cette année, l'équipe a également bénéficié du soutien d'élèves de première année faisant partie de l'EPSA. L'intergénérationnel a été mis en place afin de faciliter le transfert de connaissances entre chaque projet. Durant toute l'année, ces membres novices ont pu participer à la conception et fabrication du véhicule Optimus tout en étant encadré par les deuxièmes années.

2.2 Objectifs

En tout début de projet, l'équipe a défini les objectifs d'Optimus à la compétition, c'est-à-dire la place visée ainsi que la répartition des points sur les différentes épreuves.

2.2.1 Choix de la compétition

Plusieurs points ont guidé cette réflexion : rigueur de l'organisation, difficulté de la compétition, distance par rapport à la France, dates de compétition, disponibilités des membres de l'équipe... .

Après considération de l'ensemble des point, c'est finalement le FS ATA et le FSN qui ont été retenus, malgré une qualification au FS Germany, compétition la plus prestigieuse.

2.2.2 Performances prévisionnelles

Une fois le choix de la compétition effectué, l'équipe a, après un état de l'art de la concurrence, défini la place qu'elle visait : le Top 5. Avec ce choix, l'équipe a ensuite réalisé la répartition du total de points dans les différentes épreuves (en se basant principalement sur les résultats des années précédentes), ce qui conditionne les performances à atteindre.

Même si le score exact est donné, ce qui est le plus important reste la comparaison par rapport au top 15, 10 et 5 et par rapport aux précédents véhicules. Comme il n'y a environ qu'une dizaine d'équipes qui termine l'endurance à la compétition, terminer l'endurance assure donc de manière systématique un bon classement. Il est important de noter que

réaliser un top 5 ne signifie pas réaliser un top 5 systématiquement à chaque épreuve. Cette première répartition de points a déjà permis d'établir les lignes directrices du projet. Tout d'abord, finir l'endurance impose d'avoir un véhicule fiable (c'est-à-dire du temps passé à rouler), qui puisse répondre aux avaries envisageables (mise en place systématique de plan B si possible). De plus, l'homogénéité recherché pour le véhicule correspond en fait à ne pas avoir de disparités de complexité entre les pièces : par exemple une pièce qui pèse lourd mais facile à usiner d'un côté et une pièce légère mais extrêmement coûteuse en usinage d'un autre côté.

A cela s'est rajouté d'autres lignes directrices comme capitaliser sur certaines pièces réalisées par les équipes précédentes à faible valeur ajoutée (circuit d'essence) ou déjà fortement optimisé (inserts triangles, frette de freins).

2.2.3 Définition du cahier des charges général du véhicule

Une fois les scores prévisionnels choisis, à l'aide de modélisation diverses, l'équipe a pu définir en fin d'année dernière le cahier des charges du véhicule global (cf figure 15 et 16). A partir de ce cahier des charges, un cahier des charges concernant la liaison au sol a pu être défini. Comme ce point-là représente essentiellement le travail de PE, il ne sera pas développé ici.

3 Présentation du PA

3.1 Cahier des charges

Fonction	Sous-fonctions	Sous-sous fonctions	Critères	Niveau	Flexibilité
1 : Cohérence de la voiture	1.1 : Supporter le pilote	1.1.1 : Supporter des efforts en flexion	Rigidité en flexion pour cas de charge		
	1.2 : Supporter la LAS	1.2.1: Supporter des efforts en torsion	Rigidité en torsion	> 5x plus rigide que la LAS	aucune
	1.3 : Supporter le moteur		Supporter cas de charge	9600 N	+/- 500 N
	1.4 : Supporter les composants aérodynamiques		Rigidité liaisons pour cas de charge	1200 N	+2000/-1000
2 : Sécurité du pilote	2.1 : Permettre au pilote de sortir en 5s		Dimensions réglementées		
	2.2 : Protéger le pilote des chocs		Dimensions réglementées		
	2.3 : Protéger le pilote en cas de retournement		Dimensions réglementées		
3 : Performance	3.1 : Optimisation de la masse de la structure tubulaire		Masse	32 kg	+/- 2 kg
4 : Respecter le règlement (contrainte)	4.1 : Vérification du règlement		Charges du règlement		
5 : Respecter le budget (contrainte)			Prix	10 000 euros	+/- 1000 euros

FIGURE 10 – Cahier des charges du châssis

Fonction principale	Fonction contrainte	Critères	Niveau	Flexibilité
FP1 : Améliorer les qualités dynamiques	Orienter les flux d'air pour le refroidissement	débit d'air dans les ouïes	1,9 m^3/s	+0,5/-0,2
FP2 : Fermer la voiture	Protéger les sous-systèmes	Aucun		
FP3 : Respecter le règlement				
FP4 : Optimiser la masse		masse	7 kg	+/- 1 kg
FP5 : Assurer la visibilité de l'école, des sponsors, de l'écurie		Visibilité	Tous les sponsors importants	Aucune
FP6 : Respecter le budget		Prix	10 000 euros	+/- 2000 euros

FIGURE 11 – Cahier des charges de la carrosserie

3.2 Responsabilités de chaque membre

Afin de diviser le travail, chaque équipier se voit attribuer un ou plusieurs systèmes dont il est responsable.

3.2.1 Le châssis équipé, CLAMENS Robin

La structure tubulaire du châssis permet d'offrir une ossature au véhicule et de faire le lien entre chaque sous-système qui le compose. Cette structure doit aussi permettre la sécurité du pilote. C'est pour cela qu'elle est soumise à un règlement très strict. Enfin, le châssis est un vecteur de performance via le pourcentage de masse qu'il occupe dans le véhicule et son comportement soumis à une torsion via la rigidité. On cherche donc à optimiser le rapport masse/rigidité. La réalisation de la structure tubulaire se fait dans l'atelier de production de la Giraudière, où deux élèves sont en charge de la soudure du châssis (près de 100 tubes sont concernés), sous la supervision d'un professeur et du responsable châssis.

Les chapes et équipements sont les instruments soudés à la structure tubulaire du châssis (plus d'une centaine) et qui permettent d'y rattacher les différents sous-systèmes. Leur placement est critique puisqu'il conditionnera le bon déroulement de l'intégration.

3.2.2 La carrosserie et le fond plat, KIEFEL Josselin

La carrosserie a pour objectif de permettre un bon refroidissement du moteur, de protéger les sous-systèmes du véhicule et de promouvoir les sponsors et partenaires. Le fond plat recouvre le bas du châssis pour protéger le pilote et les sous-systèmes du véhicule de l'intrusion d'éléments extérieurs.

La carrosserie n'a alors pas de fonction mécanique, mais doit quand même assurer une certaine rigidité pour éviter la déformation lorsque le véhicule est en mouvement. De même, le fond plat doit assurer une certaine rigidité dans le cas où le pilote serait amené à poser le pied sur celui-ci.

3.2.3 L'ergonomie du véhicule, REGUIAI Yohan

Importante pour les performances sur piste, mais souvent reléguée derrière la conception mécanique, l'ergonomie du cockpit a été davantage étudiée cette année que les années précédentes. On entend dans le cadre de notre projet, l'ergonomie comme la facilité de pilotage de Vulcanix.

Outre le choix des pièces directement en contact avec le pilote (volant, palettes, siège...) trois points d'ergonomie ont été développés cette année :

- le placement du pilote ;
- la visibilité sur la route ;
- le couple à transmettre au volant.

3.2.4 L'aérodynamisme, La Team ITALIA (CEMBALO Agostino, ROMA-NELLI Michele, POSSAMAI Andrea)

Compétences absentes à l'écurie depuis des années, nous avons décidé de lancer une équipe sur de la recherche dans le domaine afin de pouvoir implanter des éléments aérodynamiques sur nos prochains véhicules. Leur rôle est donc essentiel pour la suite de l'écurie à la compétition, dont les connaissances sont jugées hétérogènes par les juges de la compétition.

4 Travail réalisé : descente et remontée du cycle en V

Dans cette section, les phases de conception et d'intégration sont expliquées pour chaque système dans notre périmètre de responsabilités.

4.1 Châssis

4.1.1 Conception

Pour la conception du châssis équipé, il est important de garder à l'esprit qu'il doit être facilement modifiable. En effet, le châssis fait office d'ossature de la voiture et doit donc maintenir chaque sous-système en place, il doit donc être capable de s'adapter à chacun des sous systèmes, que ce soit pour les points d'attaches des triangles sur les cellules avant et arrière ou encore pour les barres de fixation du moteur. La décision a donc été prise de paramétriser au maximum la structure tubulaire pour que, quel que soit le réglage demandé, la structure soit aisément modulable.

La conception, qui se fait sur le logiciel CATIA V5, commence par l'établissement d'une structure filaire possédant grossièrement la forme d'un châssis, puis en faisant référence à la réglementation imposée et à la géométrie des structures d'autres sous-systèmes, il est possible grâce à la paramétrisation de la structure filaire d'affiner la forme du châssis qui se précise et se rapproche rapidement de sa forme finale (cf Figure 12).

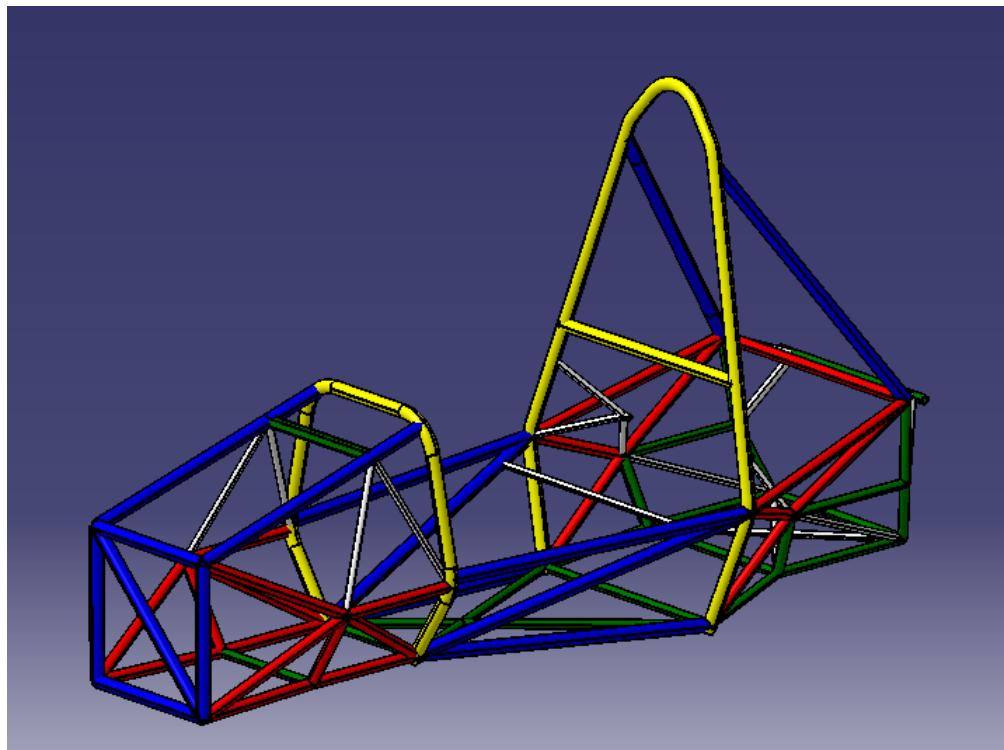


FIGURE 12 – Maquette numérique de la structure tubulaire du châssis

Le but de la conception est d'obtenir un châssis léger et rigide. En effet, le châssis étant l'un des systèmes les plus lourds du véhicule, il a une grande influence sur le positionnement de son centre de gravité. De plus, l'ensemble des calculs faits par le pôle de

la liaison au sol se font dans l'hypothèse d'un châssis infiniment rigide. On montre dans une première approximation que cette hypothèse est vérifiée pour une rigidité du châssis quatre à cinq fois supérieure à celle des suspensions du véhicule.

Les principales innovations apportées cette année sont une forme de châssis qui priviliege le positionnement de la liaison au sol et la position du pilote, tout en éliminant les erreurs des années passées. Le pilote dans le cockpit est plus allongé que les années précédentes. De plus, on optimise le châssis de l'an dernier en se basant sur ces faiblesses, dans un objectif de gain de masse et rigidité conservée. Le système d'appareillage des suspensions sur la cellule arrière permet de ne faire travailler la structure tubulaire qu'en traction-compression et ainsi améliorer la fiabilité du système. Et enfin, le choix a été fait de rendre un tube amovible, appelés Bracing, faisant le lien entre l'arceau arrière et la cellule arrière, dans le but de faciliter la mise en place du moteur qui se fait maintenant par le haut.

4.1.2 Fabrication

La fabrication de la structure tubulaire du châssis fait appel à trois prestataires : L'atelier de production de la Giraudière, Noël Métal et Flash Cintrage.

Les tubes sont fournis par notre partenaire, l'atelier de production de la Giraudière, sous forme de barres de six mètres de long d'acier 25CD4S. Les barres de 30x2 sont envoyés à Flash Cintrage avec les plans en échelle 1 :1 des arceaux avant et arrière pour être cintrées. Le délai de cette opération est d'environ une semaine. Le reste des barres est envoyées chez Noël Métal, entreprise spécialisée dans la découpe laser, pour y faire dessiner l'ensemble des gueules de loup. Cette fois-ci le temps que prend la découpe est plus conséquent, avec un délai de trois semaines à partir de la validation du devis fait par Noël Métal.

Enfin, l'ensemble des tubes cintrés et découpés est amené à l'atelier de production de la Giraudière où deux élèves soudeurs s'occupent d'assembler la structure tubulaire du châssis sous la supervision d'un professeur et du responsable châssis de l'EPSA. Le processus de soudure se fait en deux temps. Un premier passage, appelé le pointage, permet le positionnement des tubes les uns par rapport aux autres en les liant avec un point de soudure. Cette méthode permet un ajustement précis au millimètre, essentiel pour la mise en position de certains systèmes. Les soudeurs passent ensuite une deuxième fois pour appliquer un cordon de soudure tout autour de la jonction entre les tubes. Les soudeurs ont aussi une méthode précise pour la mise en place des tubes. Ils commencent par le fond de la structure qui est mise en position grâce à un dessin en échelle 1 :1. Ils placent ensuite les deux arceaux et l'ensemble des tubes structurant du châssis. Enfin ils peuvent compléter avec le reste des tubes (figure 4.3).

Le châssis, une fois équipé, est peint chez un de nos sponsors, PSEP, entreprise spécialisée dans la peinture par thermolaquage.



FIGURE 13 – Soudure du châssis à la Giraudière

4.1.3 Analyse de rigidité et masse

La rigidité est un paramètre clé dans la conception du châssis. En effet, un châssis performant est un châssis qui minimise le ratio masse/rigidité. Il est donc essentiel de pouvoir avoir une estimation de cette rigidité suivant les différentes géométries décrivant la structure tubulaire.

C'est pour cela qu'il est nécessaire dans un premier temps de suivre numériquement cette rigidité. Les simulations numériques sont faites sur le logiciel CATIA V5 et ANSYS sur le modèle filaire du châssis. Le processus de simulation est le suivant, on impose le blocage de l'arrière de la cellule arrière et on applique un moment à la cellule avant du véhicule. On mesure ainsi la rigidité de l'intégralité de la structure en divisant le moment appliqué à la cellule avant par l'angle dont se déforme le châssis. La valeur obtenue pour les derniers modèles numériques est de 1114 N.m/deg (cf Figure 14).

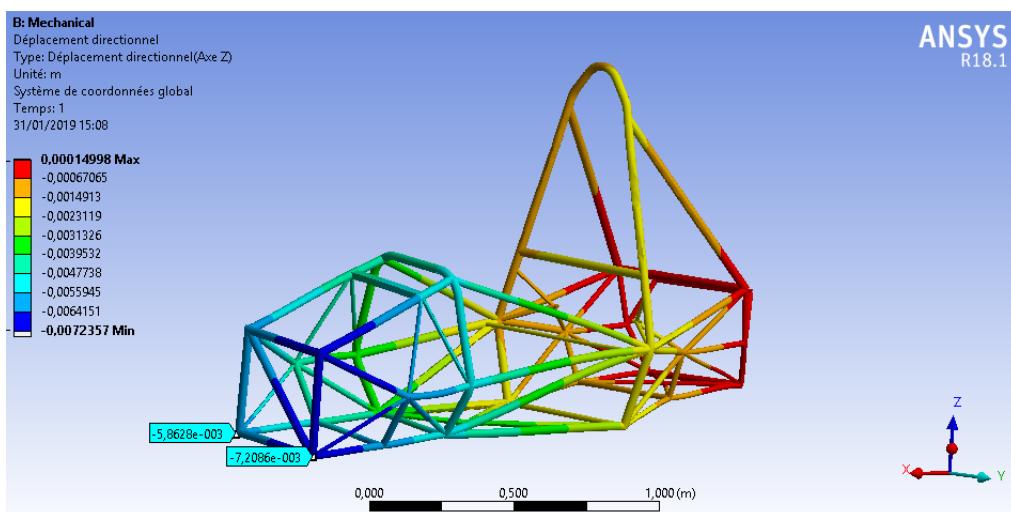


FIGURE 14 – Simulation numérique du test en torsion de la structure tubulaire

Puis une fois la fabrication de la structure achevée, il est important de vérifier que la valeur simulée numériquement est proche de la valeur mesurée expérimentalement. Dans un premier temps l'ensemble de la cellule arrière est bloquée. On applique un effort en

torsion à la cellule avant et au cockpit à l'aide de poids placés sur une barre en métal. On répète la même opération en bloquant la cellule avant et la cockpit pour obtenir uniquement la rigidité de la cellule arrière. La déformation est mesurée à l'aide d'un inclinomètre. A titre d'exemple, le cas de charge imposé à la cellule arrière dans la figure 15 est d'environ 1000 N.m, soit un moment supérieur à ceux que connaîtra le véhicule en compétition, pour une déformation résultante de seulement 1,05 degré. La rigidité totale est obtenue en faisant la moyenne des deux rigidités pondérée par la longueur de chaque cellule. La valeur obtenue par le test expérimental est de 1169 N.m/deg.

Enfin, la dernière mesure à effectuer est la masse que fait le châssis équipé et peint. Pour cela, le châssis est placé à la verticale sur une balance. La valeur relevée est 37kg, soit plus de 6 kg de moins que l'an passé. Une partie de la masse gagnée sur les précédents véhicules provient de la gestion des équipements, mais surtout d'un meilleur dimensionnement de la structure.



FIGURE 15 – Test en torsion expérimentale de la cellule avant

4.2 Équipements

4.2.1 Conception

Les équipements sont les pièces soudées sur la structure tubulaire du châssis, et constituent pour la grande majorité des pièces des châssis : des pièces qui permettent de fixer tous les différents sous-systèmes sur le châssis par le passage de vis et écrous. La conception se fait également sur le logiciel CATIA V5. Chacune est conçue par la personne responsable du système associé. Cela permet une meilleure optimisation, un meilleur design que si leur conception était centralisée.

4.2.2 Fabrication

Les châssis ont été fabriquées chez un de nos partenaires, le Lycée professionnel La Mache, dans deux ateliers différents. Les pièces présentant une géométrie plus simple ont

été produites en découpe laser, sur des plaques d'acier S235 ou S500 d'épaisseur 1.5, 3 ou 5mm, achetés chez le fournisseur par le Lycée même. Pour ce qui est des pièces présentant une géométrie plus complexe (celles de la liaison au sol notamment), elles ont été produites dans un autre atelier, en usinage à partir de bruts d'acier S235 ou S500.

4.2.3 Intégration

Ensuite, une fois les chapes produites, il a fallu les intégrer au véhicule, donc les souder au châssis. Cela a été fait chez notre partenaire, l'École de production de la Giraudière, au cours de diverses séances de pointage. A chaque séance, certains responsables des sous-systèmes concernés allaient chez le partenaire, pour s'assurer du positionnement correct de leurs chapes, pour que le soudeur puisse les fixer sur le châssis.

Pour aider le membres du projet lors de cette étape, plusieurs gabarits en bois ont été construits au Fablab de l'École Centrale Lyon. Ils ont été utilisés pour placer les chapes en position et en angle. La Figure 16 présente un de ces gabarits. Ils sont conçus avec des formes qui permettent d'épouser la forme des tubes du châssis pour permettre le placement relatif des chapes par rapport à celui-ci.



FIGURE 16 – Gabarit pour fixation des chapes moteur

4.3 L'ergonomie du cockpit

4.3.1 Philosophie

Comme mentionné dans la partie 3.2.3, trois lignes directrices d'études ergonomiques ont été suivies.

D'abord la position du pilote, parce qu'un pilote bien installé n'est pas préoccupé par son bien-être et est entièrement concentré sur le pilotage. Le placement du pilote est effectué grâce à un croisement de données fournies par certaines écuries, qui recensent leur position de pilotage favorite. Finalement, le cahier des charges pour la position du pilote se traduit par des angles naturels détaillés sur la Figure 17 avec une tolérance de plus ou moins 5 degrés par angle. À cette exigence du cahier des charges s'ajoutent des contraintes de respect du règlement. Un exemple marquant est le suivant : une personne fictive de dimensions au 95ème centile (c'est-à-dire que 95% des personnes sur Terre ont des dimensions inférieures) doit être capable de rentrer dans le cockpit et piloter le véhicule. Il a donc fallu itérer plusieurs fois avec le responsable du châssis pour concevoir une structure qui optimise la position du pilote, qui soit assez grande pour une personne au 95ème centile mais assez petite pour des raisons de masse, aérodynamisme, centre de gravité...

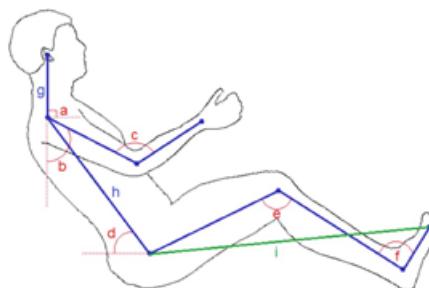


FIGURE 17 – Position du pilote installé dans Optimus

Ensuite, la vision du pilote a joué un rôle important dans les dimensions du tableau de bord. Si aucun cahier des charges formel n'a été écrit, le pilote doit cependant avoir une excellente visibilité sur la route et sur les éléments principaux du tableau de bord. C'est pourquoi la hauteur du front hoop ainsi que ses angles, arceau derrière le tableau de bord, ont été plusieurs fois diminuée afin d'améliorer la visibilité sur la route. Ces études ont été menées grâce au module Ergonomics du logiciel Catia qui permet de modéliser la vision d'un humain dans un environnement 3D. La Figure 18 présente une vue simulée jugée acceptable.

Enfin, un dernier axe a été suivi. Suite aux retours d'expériences des générations précédentes (en particulier Dynamix, qui a concouru en 2014) certains pilotes avaient du mal à tourner le volant sur la piste car il présentait un couple résistant trop important. Un sujet de PEX mené par deux équipiers a permis de construire un modèle[6]. Celui-ci prédit le couple à fournir au volant en fonction de plusieurs paramètres, notamment l'angle entre la colonne de direction et le volant. Appliqué à notre projet, les résultats qualitatifs montrent une diminution de ce couple résistant de l'ordre de 25% par rapport au véhicule Dynamix avec un angle de 105 degrés.

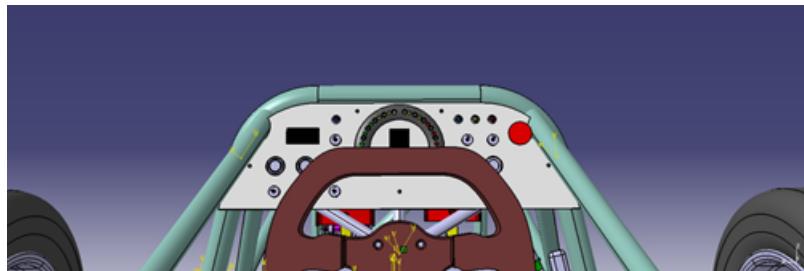


FIGURE 18 – Simulation de la vue du pilote à bord de la maquette Catia

4.3.2 Conception

Une fois ces trois aspects étudiés, les pièces directement en contact avec le pilote ont pu être déterminées :

- le volant acheté de diamètre 27 cm conformément au cahier des charges ;
- les palettes pour passage de vitesse ;
- le siège baquet de taille 6 conformément au règlement et pioché dans les réserves de Bron ;
- la poignée d'embrayage, conçue par un élève de première année afin d'améliorer la prise en main (avant, frein de moto), et la masse.

4.4 Carrosserie et fond plat

4.4.1 Conception de la carrosserie

Pour la conception de la carrosserie, les deux critères principaux à considérer sont la masse et l'esthétique. Nous avons décidé cette année de concevoir une carrosserie au plus juste, c'est-à-dire proche du châssis afin de gagner de la masse et en supprimant les éléments inutiles (non requis par le règlement). Pour se faire, nous avons travaillé sur le logiciel Catia V5, directement sur le châssis avec le module Generative Shape Design.

La première partie, le nez, doit s'adapter au châssis tout en laissant l'espace nécessaire pour les suspensions et la barre anti-roulis. Bien évidemment, cette conception doit se faire en accord avec les règles du Formula Student Germany (trou maximal dans la carrosserie, rayon et diamètre du nez, ...). La fixation de cette carrosserie sur le châssis se fait à l'aide de push-clips (vis avec un embout sphérique qui permet d'actionner un bouton afin de la décrocher) qui sont installées dans 4 chapes différentes. Cela permet de retirer aisément la carrosserie et donc de faciliter le transport.

Ensuite, les plaques latérales ont une fonction différente du nez puisqu'elles ne sont pas réglementées vis-à-vis de leur rigidité. On peut alors considérer une épaisseur plus fine qui va permettre au matériau de conserver une certaine souplesse qui sera pratique pour l'installation sur le châssis. La fixation au châssis se fait avec du velcro à double face, car la masse des plaques le permet et car cela permet d'économiser de l'argent et de la masse tout en permettant de retirer les retirer rapidement.

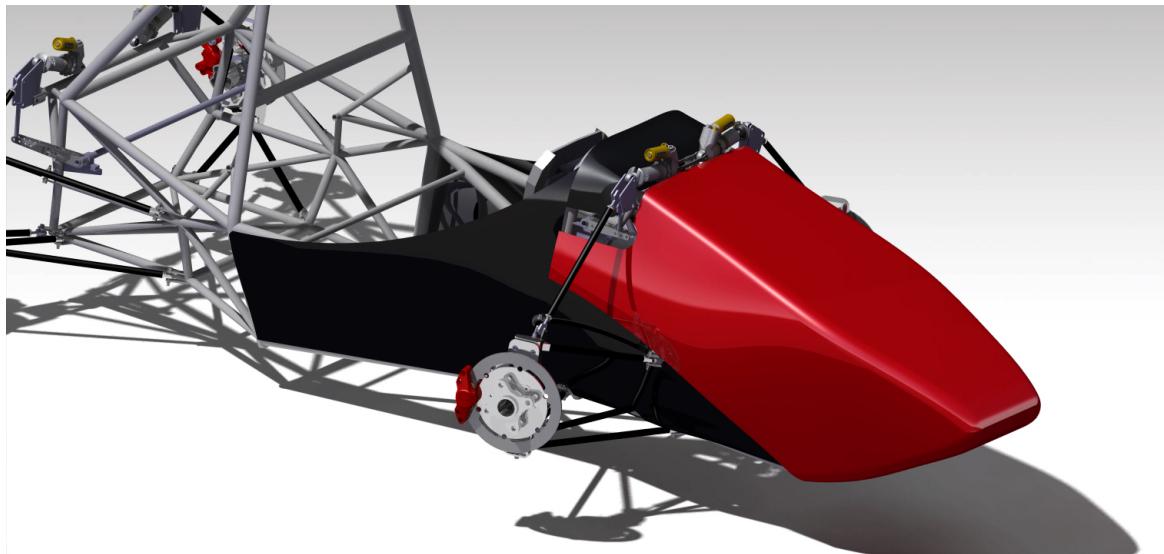


FIGURE 19 – Rendu 3D du nez (en rouge) et des plaques latérales (en noir)

4.4.2 Fabrication de la carrosserie

Cette année, le gros défi pour la fabrication a été de trouver un nouveau fournisseur compétitif et peu onéreux afin d'éviter les problèmes ayant eu lieu l'année dernière avec le précédent fournisseur. Nous avons pu rentrer en contact avec S2MA, qui propose des prix plus attractifs et une expertise dans le domaine.

Nous avons décidé de passer dans un modèle tout carbone afin de gagner de la masse, et car les prix proposés par ce nouveau fournisseur permettent de ne pas dépasser le budget considéré pour ce système.

Pour fabriquer le nez, il faut réaliser un moule monobloc en polyester à l'aide d'une fraiseuse 3 axes et lui appliquer une cire sur la surface. Une fois celui-ci réalisé, il faut appliquer les différentes couches de plaque de carbone, en incorporant une matrice entre chaque couche. Il faut finalement passer le tout sous autoclave en faisant le vide pendant 6h afin de lier les différents éléments. La dernière étape consiste en la pose d'un gel coat permettant en rendu plus net et une protection du nez aux intempéries.

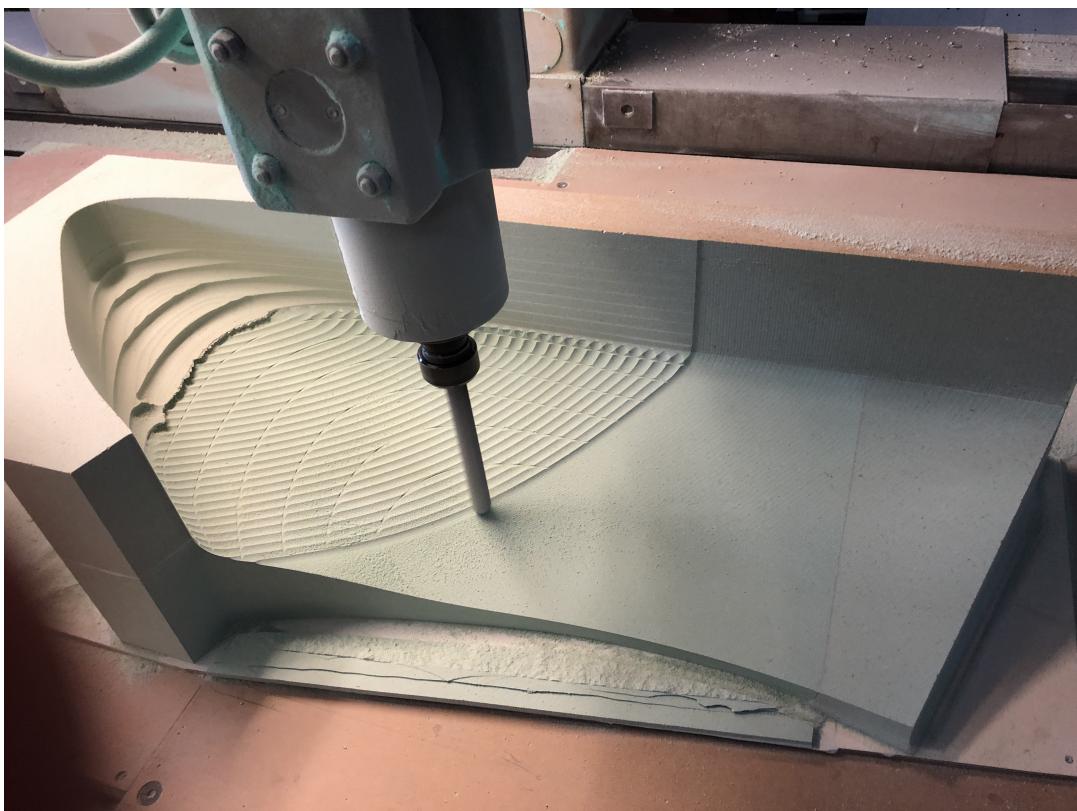


FIGURE 20 – Fraisage d'un bloc de polyester pour la réalisation du moule

Pour les plaques latérales, nous avons pu bénéficier du partenariat avec TeXtreme qui nous a offert $10m^2$ de fibre de carbone. Il faut alors réaliser les plaques de la même manière que pour le nez mais sans moule car leur souplesse ne nécessite pas de formes particulière. La dernière étape consiste en la découpe afin de correspondre aux dimensions du châssis.

4.4.3 Conception du fond plat

Pour le fond plat, la conception est plutôt simple car il faut suivre le fond du châssis en épousant les formes des tubes seulement sur la partie avant du pilote, puisque le règlement l'impose seulement sur cette partie. Étant donné que le châssis présente un angle, nous avons décidé de le réaliser en deux parties, une avant et après le front hoop. Chaque plaque est fixée au châssis à l'aide de 4 chapes dans chacun des coins afin d'assurer une bonne fixation.

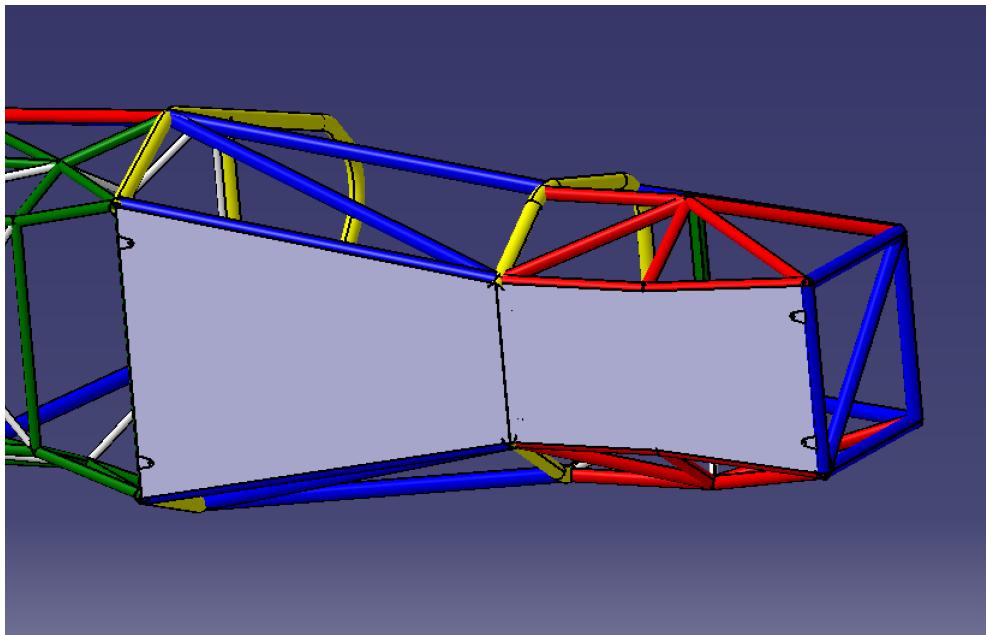


FIGURE 21 – Maquette 3D du fond plat

4.4.4 Fabrication du fond plat

Le fournisseur utilisé pour la réalisation du fond plat est le même que pour le nez, mais les matériaux utilisés sont différents. Afin d'assurer une rigidité qui peut supporter le poids du pilote, nous avons opté pour une épaisseur de 6mm sous forme de 'sandwich' de différents matériaux composites. Deux plaques de fibre de carbone viennent entourer de la fibre de verre, cela a pour avantage de ne pas trop gagner de masse et d'assurer une bonne rigidité à bas coup. Une fois ces plaques réalisées, il ne reste plus qu'à les découper suivant les bonnes dimensions du châssis.

4.5 Développement aérodynamique

Cette année, nous avons commencé à explorer un nouveau domaine pour l'équipe EPSA qui n'a jamais eu la possibilité de développer des appendices aérodynamiques pour ses prototypes. Cette nouvelle étude ayant pour but de créer une base solide pour l'année prochain et les suivantes qui probablement verront l'intégration d'une partie aérodynamique sur les véhicules de compétition. L'étude est centrée sur 3 éléments principaux :

- Aile antérieure
- Aile arrière
- Diffuseur

Ces éléments ont été développés avec pour but de produire déportance, une force vers le bas qui pousse la voiture et surtout les roues sur le sol en augmentant le grip généré par la voiture. Cela produit une nette amélioration de la performance de la voiture en courbe, surtout dans celles à haute vitesse. En fait, cette force est proportionnelle au carré de la vitesse du véhicule.

Malheureusement avec la génération de portance, augmente également la génération de traînée qui s'oppose à l'avancement du véhicule, mais, comme on le verra par la suite,

dans les applications liées aux voitures de Formula Student, nous ne sommes pas concerné de façon très importante par cette force, grâce aux relativement faibles vitesses atteintes par rapport à autres applications où le développement des appendices aérodynamique impose une optimisation déportance-traînée.

On appelle la déportance L^- , la traînée D et on utilise dans le simulations, et pour les résultats, un repère qui voit l'axe Z, long laquelle ces deux force sont produites, orientée vers le bas pour que la déportance ait signe positif.

Déportance et traînée répondent à ces deux formules.

$$L^- = \frac{1}{2} \rho C_L^- A_{ref} V^2$$

$$D = \frac{1}{2} \rho C_X A_{ref} V^2$$

où ρ est la masse volumique du fluide, l'air dans ce cas, A_{ref} est l'aire de référence qui pour le cas automobile est prise égale à l'aire frontale de la voiture et C_L^- et C_X sont respectivement le coefficient de déportance et le coefficient de traînée.

Pendant notre étude, nous avons utilisé le logiciel *CATIA V5* pour la création des maquettes 3D et les logiciels *ANSYS Fluent* et *STAR-CCM+* pour les simulations, en particulier le premier pour celles 2D et le deuxième pour celles 3D. Un procédé d'optimisation de la géométrie a été accompli pour l'aile arrière en utilisant également le logiciel *ANSYS*.

Toutes les simulations ont été faites pour une vitesse de $13.8 \frac{m}{s}$ ($50 Kph$), prise environ comme vitesse moyenne pour les essais de la voiture, puis une dernière simulation à $80 Kph$ est demandée pour remplir le "FSAE Design Spec Sheet" nécessaire pendant l'inscription à une compétitions et qui, dans nos cas, nous sert comme point d'arrivée pour cette étude et comme point de départ pour l'année prochaine.

4.5.1 Analyse de référence sur la voiture pour la saison 2019

Notre étude a pris comme son point de départ l'analyse de la voiture qui l'équipe EPSA emmènera aux compétitions de la saison 2019, appelée Optimus, laquelle est dépourvue d'appendices aérodynamiques. Cette simulation et ses résultat nous fournissent des valeurs de référence qui sont à améliorer.

Afin d'exploiter toute la puissance fournie de la voiture on a effectué, grâce à la formule suivante, le calcul pour le C_X maximale réalisable afin que la vitesse maximale de la voiture ne diminue pas au dessous des vitesses maximales atteintes pendant les compétitions de Formula Student.

$$P = D_{max} \cdot V_{max}$$

$$P = \frac{1}{2} \rho C_X A_{ref} V_{max}^3$$

$$C_X = \frac{2 P}{V_{max}^3 \rho A_{ref}}$$

où P est la puissance fournie par le moteur, D_{max} est la traînée maximale qui peut être générée, V_{max} est la vitesse maximale que l'on veut atteindre, égale à $130 Kph$ et A_{ref} est

l'aire de référence moyenne pour une voiture disposant de appendices aérodynamiques, environ $1.15 m^2$. En sachant la puissance du moteur, laquelle est égale à $64 kW$, on peut calculer le C_X maximale réalisable, le quel est égale à $C_{Xmax} = 1.93$.

Par conséquence, toutes les configurations du paquet aérodynamique qui produisent un C_X inférieure au C_X maximale représentent des configurations réalisables. De plus, on note que le C_{Xmax} a une valeur relativement très élevée qui nous laisse beaucoup de liberté dans le projet du paquet aérodynamique en laissant nous concentrer presque exclusivement sur la génération de déportance.

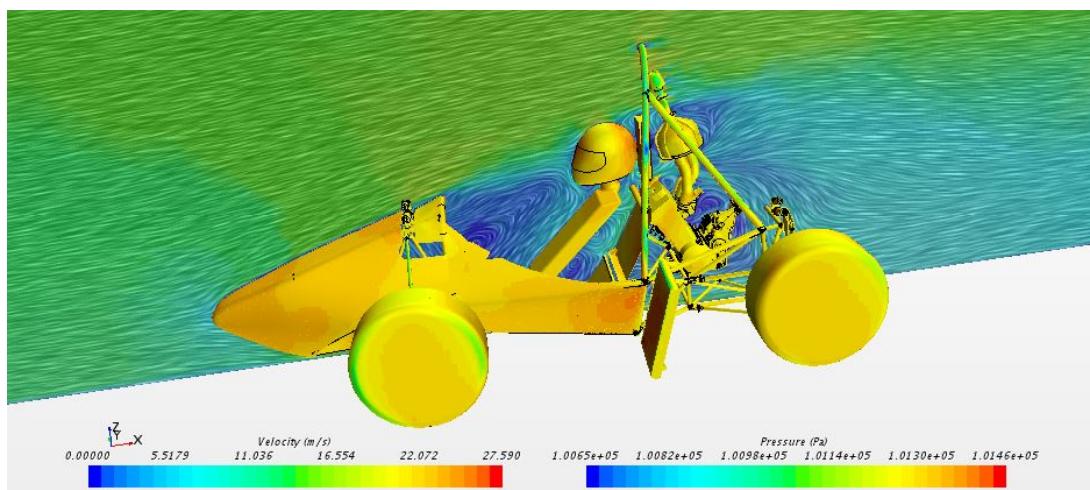


FIGURE 22 – Optimus sans appendices aérodynamiques

Frontal Area	$0.8437 m^2$
C_L^-	-0.2014
C_X	0.8393
$Lift^-$	-20 N
<i>Drag</i>	80 N

Grâce à cette simulation, il est possible observer que le C_X est presque égal à la moitié du maximum et que la force de déportance est négative, c'est-à-dire que la voiture perd 20 N d'appui sur les roues.

4.5.2 Diffuseur

Comme indiqué plus haut, une des parties conçues au cours de cette année est le diffuseur. Il s'agit d'un élément aérodynamique situé au dessous de la voiture exploitant l'effet Venturi, une manifestation du principe de conservation de la masse qui voit une certaine quantité de matière passer par un orifice. Si l'orifice voit sa taille réduite et le débit reste constant la vitesse du fluide augmente pour permettre à la même quantité de matière de circuler en totalité pendant la même unité de temps.

Cette augmentation de vitesse amène à son tour une baisse de pression, du fait de la conservation de l'énergie (c'est le Théorème de Bernoulli : l'augmentation d'énergie cinétique se traduit par une diminution d'énergie élastique, c'est-à-dire une dépression).

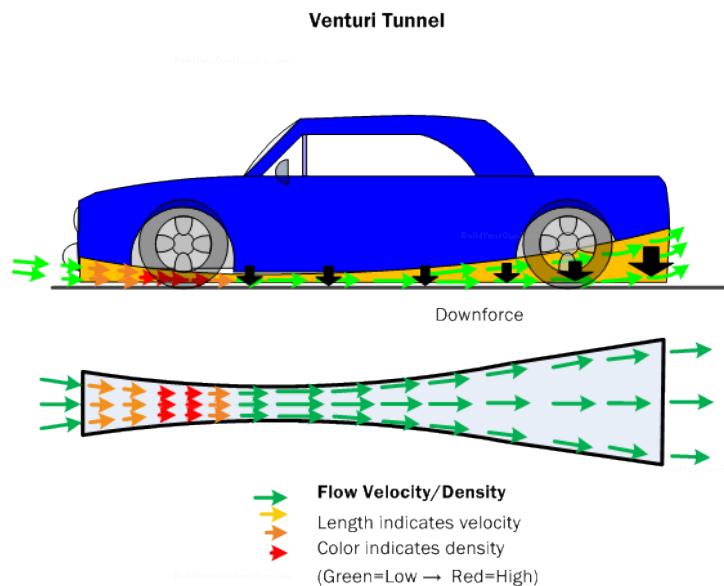


FIGURE 23 – Cadre conceptuel du fonctionnement d'un diffuseur

La maquette d'un diffuseur a été créée via le logiciel *Catia* : la forme particulière de ce dispositif aérodynamique, présentant une rampe jusqu'à son extrémité arrière, permet d'obtenir une expansion du fluide au dessous de la voiture et une conséquente déportance.

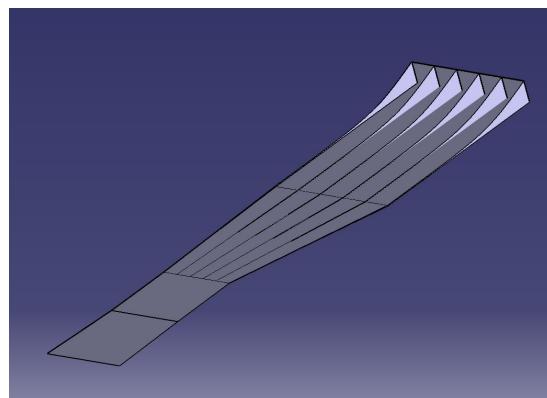


FIGURE 24 – Maquette du premier diffuseur réalisé

Après avoir crée une première version (Figure 24) de cette composante et avoir réalisé qu'il faudrait y apporter des perfectionnements pour améliorer la contribution du diffuseur à la dynamique du véhicule, nous avons décidé de l'élargir, de sorte d'augmenter la quantité d'air intéressée par les effets de cette pièce aérodynamique.

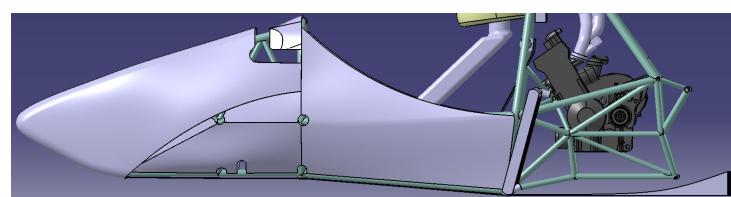


FIGURE 25 – Maquette du premier diffuseur réalisé sur CATI (vue latérale)

Il a fallu faire attention à la présence du support pour la pushbar, c'est à dire un tube orange à l'arrière qui, évidemment, ne doit pas être touché par le diffuseur et en même temps ce dernier ne doit pas empêcher à la pushbar d'atteindre le support. Ensuite, pour vérifier le fonctionnement du diffuseur et les forces développées plusieurs simulations ont été lancées, sur les logiciels *ANSYS* et *Star CCM*.

Ici nous nous sommes aperçus du fait qu'il nous restait toujours une certaine marge de manœuvre en ce qui concerne la surface du diffuseur, puisque nous n'avions pas exploité toute la longueur permise par le règlement jusqu'à ce moment-là. En réalisant un diffuseur plus long nous pourrons obtenir une expansion beaucoup plus significative, à savoir une downforce plus considérable. Deux versions de la maquette sont donc affichées ci-dessous, l'une à côté de l'autre : la première est celle obtenue en augmentant la longueur, la deuxième est une version "2.0" réalisée à partir de cela à gauche toujours en visant à maximiser la surface.

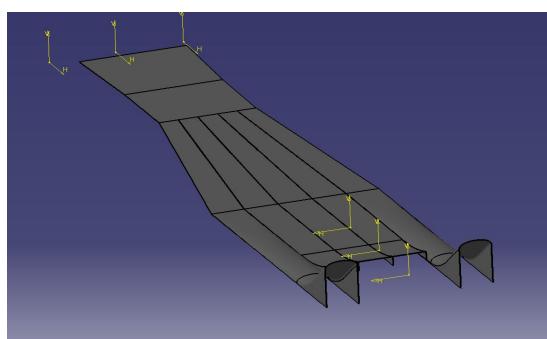


FIGURE 26 – Maquette diffuseur

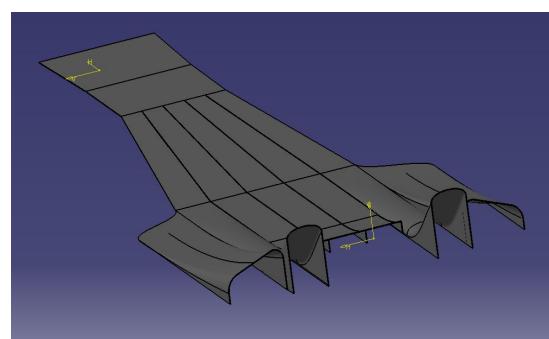


FIGURE 27 – Maquette définitive diffuseur

Les simulations n'ont jamais été effectuées sur le seul diffuseur, puisque l'écoulement qu'on aurait étudié dans ce cas n'aurait eu aucun sens physique. Nous avons donc démarré ces simulations sur le complexe voiture + diffuseur.

Le graphe d'une de ces simulations est affiché ci-dessous, et il montre le champ de pression développé par la pièce aérodynamique.

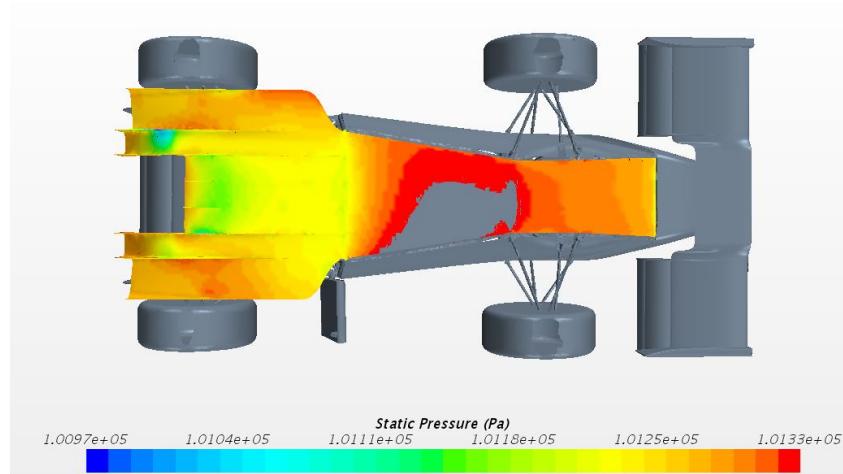


FIGURE 28 – Champ de pression développé par le diffuseur (partie en gris ne génère pas de déportance)

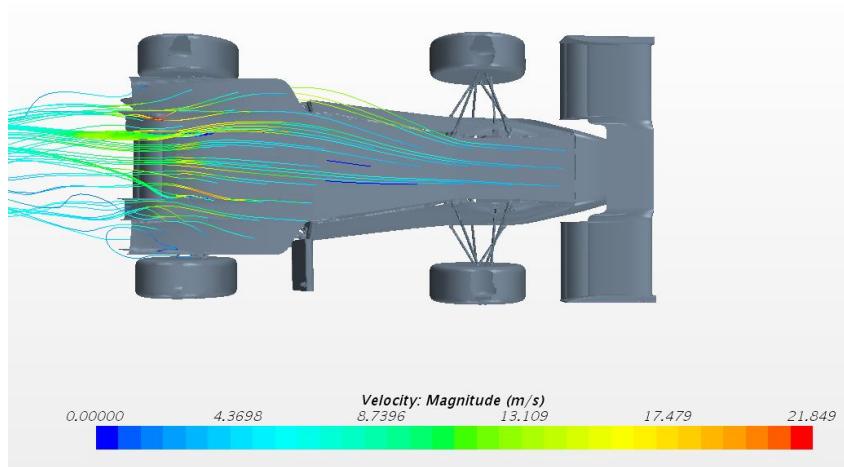


FIGURE 29 – Stream line diffuseur

Grâce à ces images est possible comprendre les parties du diffuseur (avec un pression inférieure à celle ambiante) qui génèrent déportance. Il est aussi évident comme le radiateur influe sur l'écoulement de façon que ce dernier n'est pas symétrique et dans la coté libre le diffuseur génère plus de déportance, c'est pour cela que dans le chapitre 4.5.6 on analysera la possibilité de déplacer le radiateur même. Tout compte fait, l'addition du diffuseur à la voiture nous a permis de gagner 28.82 N de déportance.

4.5.3 Aile Arrière

L'aile arrière est conçue pour générer la partie la plus grande de déportance, mais, malheureusement, l'utilisation des appendice aérodynamiques n'était pas prise en compte au début de l'année. Pour cela dans la modélisation du châssis nos camarades n'ont pas pris en compte les contraintes aérodynamiques et, donc, nous avons du nous adapter à ce qu'était le châssis déjà modélisé, raison pour laquelle, même si l'aile arrière produit la plus grande partie de déportance, les résultats ne sont pas les meilleurs que nous auront pu obtenir. Cela veut être un conseil pour l'année prochain afin que ils puissent trouver un compromis pour mieux optimiser la voiture globalement.

Le fonctionnement d'une aile est le même que celui des ailes des avions, on a un profil aérodynamique avec lequel on génère une force. Sur les avions la force est vers le haut, par contre ici on tourne le profil pour obtenir la force vers le bas comme illustré dans la figure suivante.

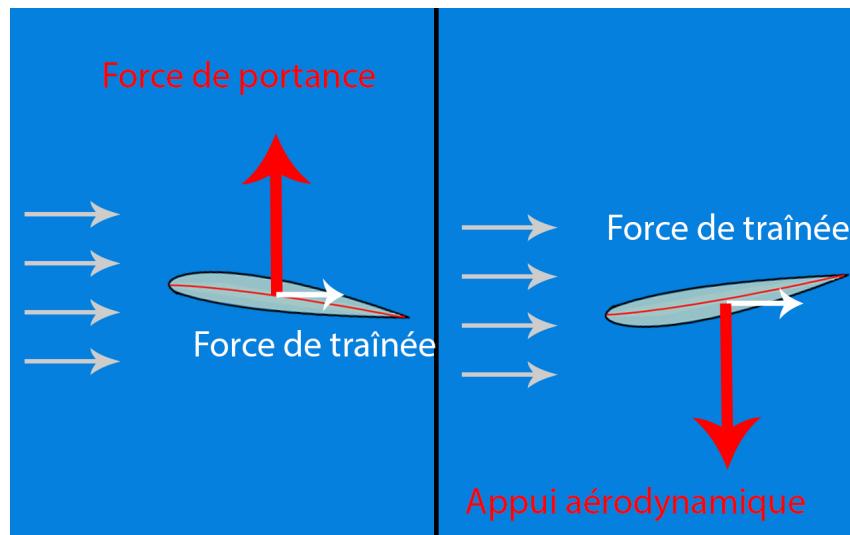


FIGURE 30 – Différence entre un profil d'un avion et celui d'une voiture

Nous avons étudié plusieurs configurations, nous avons commencé l'étude avec un mono-profil. Nous avons immédiatement compris que cela n'était pas la bonne configuration car l'écoulement se séparait du profil entraînant une perte d'efficacité aérodynamique. Nous avons donc essayé une configuration avec deux profils, car cela est particulièrement l'effet énergisant qui joue le écart entre les profils, qui emmène le fluide à accélérer, aidant l'écoulement à mieux suivre la géométrie de l'aile en tendant à se séparer. Notre configuration définitive est une aile avec trois profils, car en considérant les simulations numériques effectuées et les contraintes, cela semble être la meilleure solution qui nous permet d'obtenir angles d'attaque plutôt élevés sans séparation du profil en maximisant la génération de déportance.

Le choix des profils est fondamental. Finalement nous avons choisi un profil dont l'épaisseur présente un maximum en proximité du bord d'attaque, cela produit une rapide accélération du fluide avec comme conséquence une génération de déportance à partir de la partie antérieure de l'aile. Cela peut produire des séparations anticipées du fluide mais elles sont empêchées par l'utilisation d'une géométrie multi-profil. Le résultat final est celui montré dans la figure ci-dessous.

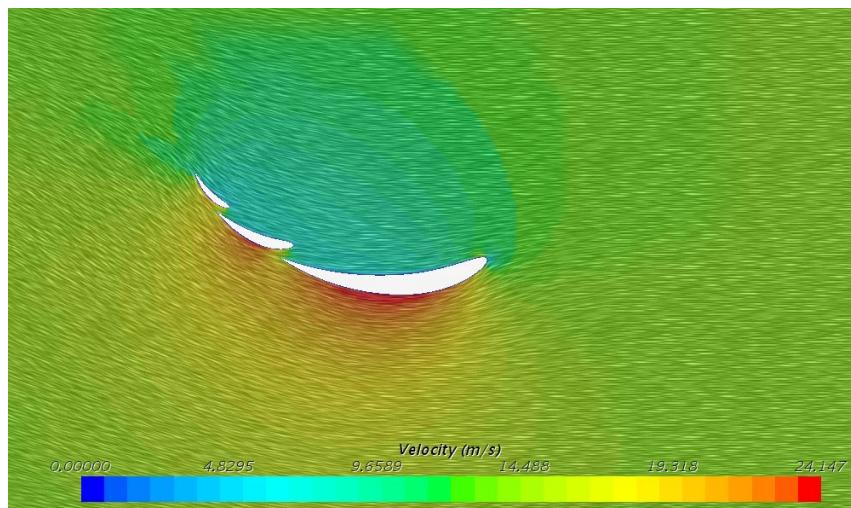


FIGURE 31 – Champ de vitesse autour de la première version de l'aile arrière -
Simulation 2D

La partie en bleu dans laquelle on a une vitesse faible et donc une pression élevée, tandis que au dessous de l'aile on a une vitesse élevée avec une conséquente dépression, laquelle est une condition caractéristique des profils des voitures en ligne avec la figure 30. Après avoir fait le choix des profils nous nous sommes concentrés sur l'angle d'attaque du écoulement. Nous nous sommes servi de plusieurs simulations numériques afin d'avoir une de les meilleures solutions. Finalement pour compléter cette partie du projet nous avons pensé aussi à une forme avantageuse pour ce qui concerne les endplates (les deux parties à coté des profils).

Globalement les résultats sont ceux montrés dans la figure ci-dessous avec aussi une table avec les résultats numériques affichés.

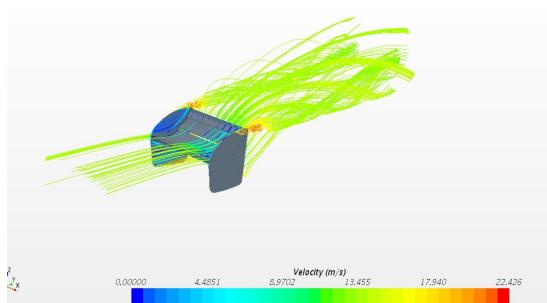


FIGURE 32 – Streamline première aile arrière

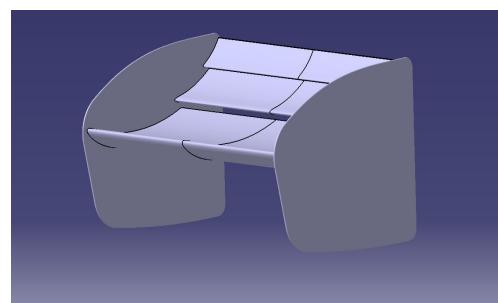


FIGURE 33 – Première aile arrière terminée

<i>Lift</i>	-	157.77 N
<i>Drag</i>		41.33 N

TABLE 1 – Résultats de la première aile arrière. (Simulation aile seule)

Ces images représentent la première maquette de l'aile arrière, elle était la première maquette que l'on a construit et pour cela, après avoir étudié l'aile antérieure et le diffuseur

on a décidé de la changer pour ce que sera expliqué dans le chapitre 4.5.5. La nouvelle maquette a été étudié au travers d'un procédé d'optimisation 2D sur le logiciel *ANSYS*, avec les 3 différents profils, cela a conduit à la définition des positions réciproques des profils et de leur incidence, afin d'optimiser les interactions réciproques entre les trois profils. Nous avons réalisé une version 3D de l'aile optimisée, et nous l'avons placé sur la maquette de la voiture complète, les résultats sont montrés dans les figures suivantes.

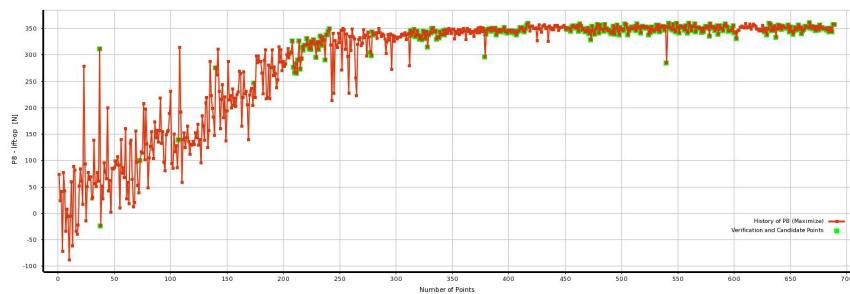


FIGURE 34 – Procédé d'optimisation

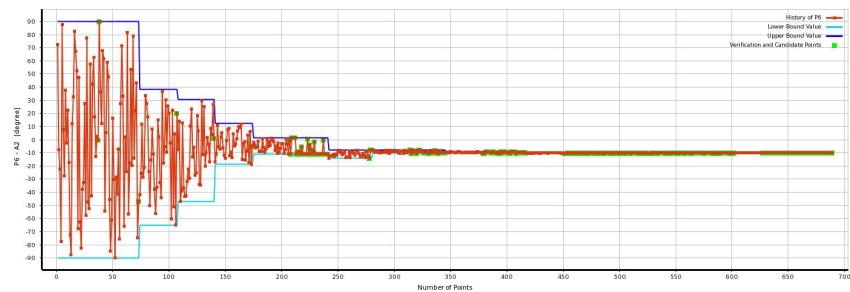


FIGURE 35 – Procédé d'optimisation - Évolution d'un paramètre

Pour ce qui concerne le procédé d'optimisation nous avons donné, comme paramètres, l'angle d'attaque des trois profils et la position relative du deuxième et troisième profil par rapport au premier. Le dernier profil a aussi un *Gurney Flap*, c'est-à-dire une extension perpendiculaire à lui même qui permet de retarder la séparation de l'écoulement.

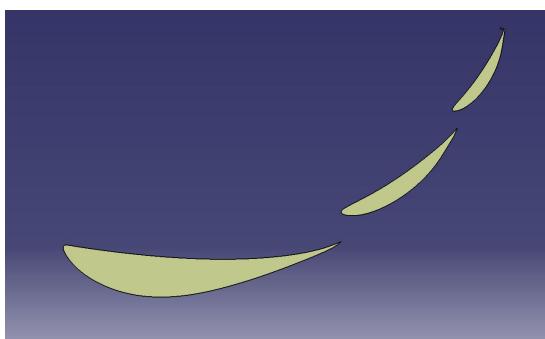


FIGURE 36 – Profils dernière maquette

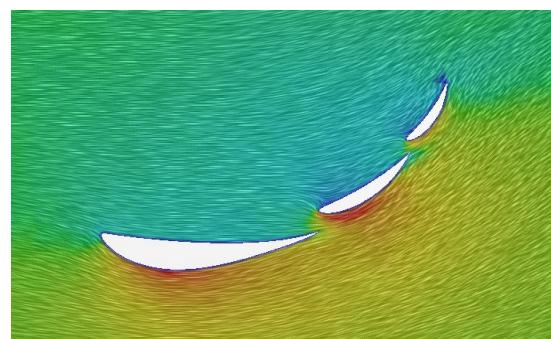


FIGURE 37 – Simulation numérique profils

Les résultats du procédé d'optimisation sont montrés dans la Figure 39, on peut regarder que au niveau du troisième profil l'écoulement est attaché et une ligne bleue représente le *Gurney Flap*.

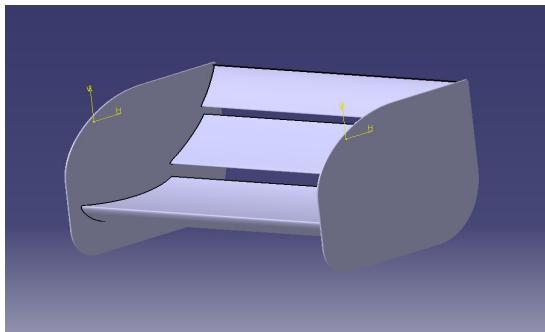


FIGURE 38 – Aile arrière finale

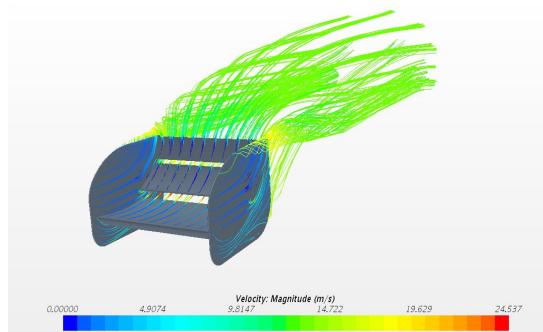


FIGURE 39 – Stream line aile arrière finale

Ici on a, donc, la maquette définitive de l'aile, on peut bien voir que l'écoulement est beaucoup plus dévié par rapport à la maquette précédente, cela signifie que on a plus traînée mais aussi plus déportance.

<i>Lift</i>	175.16 N
<i>Drag</i>	65.71 N

TABLE 2 – Résultats de l'aile arrière finale. (Simulation aile seule)

4.5.4 Aile antérieure

Pour ce qui concerne l'aile antérieure les seules contraintes sont données par le règlement FSAE car le châssis n'en impose pas. On dispose d'un écoulement propre vu que cela est la première partie de la voiture qui le perturbe. Plusieurs configurations ont été étudiées. En profitant de l'expérience faite avec l'aile arrière, nous avons commencé l'étude avec une aile disposant de trois profils. La géométrie de ces derniers est plus complexe que celles dont on a parlé dans la section précédente, car on veut que l'écoulement tourne autour des roues et au même temps il passe au dessous de la voiture pour profiter, le plus possible, de le diffuseur. Pour autant la configuration choisie est la suivante, laquelle profite de trois profils différents pour le deux parties latérales et un quatrième profil pour la partie centrale. Cette dernière est placée à un niveau plus bas que ce des profils et est aussi symétrique pour favoriser l'admission de l'écoulement au dessous de la voiture, c'est-à-dire pour mieux profiter du diffuseur. De plus vue la hauteur par rapport au sol, elle augmente aussi la déportance grâce à l'effet sol.

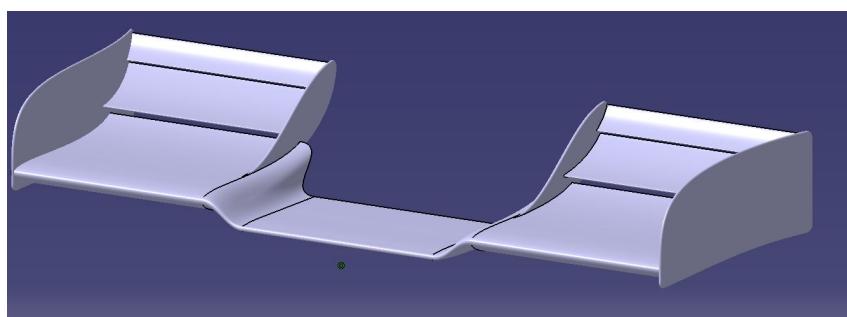


FIGURE 40 – Aile antérieure, première configuration

Nous avons également étudié des endplates qui permettent de minimiser les tourbillons

d'extrémité afin de minimiser aussi la traînée et maximiser la déportance. Après quelque simulation numérique on était satisfait, mais au but d'améliorer encore l'aile on a pensé à autres solutions.

Nous avons pensé d'ajouter des parties au dessous de l'aile qui dévient les tourbillons à l'extérieur des roues. De plus on a aussi pensé d'ajouter des petites parties aérodynamiques à côté des endplates, tout cela encore pour ajouter déportance. Les résultats sont montrées ci-dessous avec tout le développement.

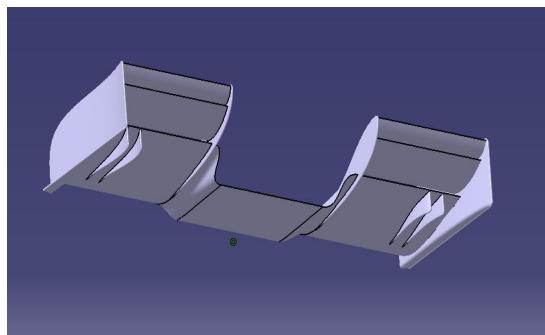


FIGURE 41 – Petite appendices au dessous de l'aile

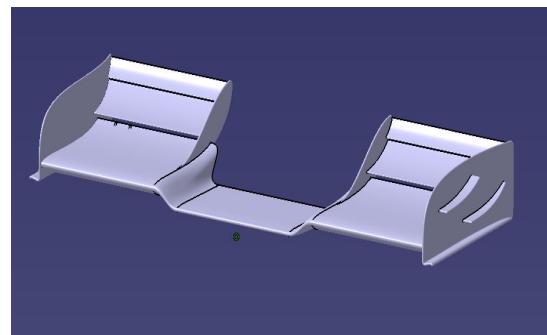


FIGURE 42 – Parties aérodynamiques endplates

Malheureusement, pour ce qui sera expliqué dans le prochain chapitre, nous avons du faire des petites modifications, même si les parties produisaient une augmentation des prestations. Finalement l'aile utilisée pour la maquette finale est la première version créée (Figure 40). En suite sont reportés tous les résultats avec l'amélioration pas à pas de l'aile.

Description	(-)Lift [N]	Drag [N]	$\Delta(-)Lift [\%]$	$\Delta Drag [\%]$	E
Aile antérieure 2 (Référence)	123,6	23,4	-	-	5,282
Aile antérieure 3 (Footplate)	135,9	24,1	10,0	3,0	5,639
Aile antérieure 4 (Footplate+Ailette)	143,2	25,8	15,9	10,3	5,550
Aile antérieure 5 (Footplate+Ailette_modifiées+Ailette_Endp.)	147,6	26,2	19,4	12,0	5,634

FIGURE 43 – Tableau résultats Aile antérieure

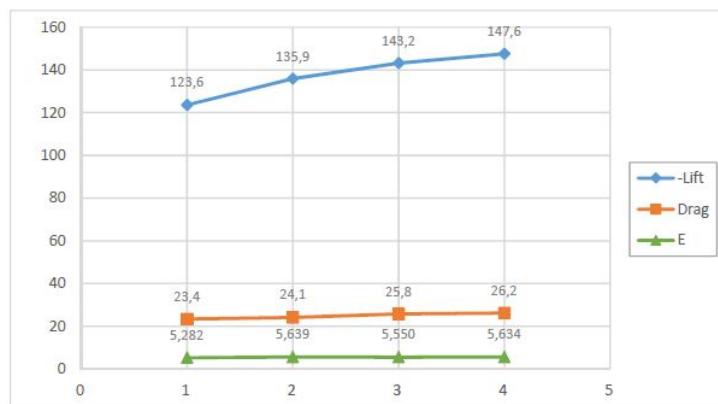


FIGURE 44 – Schéma d'amélioration de l'aile antérieure

Soit le tableau soit le graphe montrent l'amélioration due à l'ajout des petites pièces aérodynamiques.

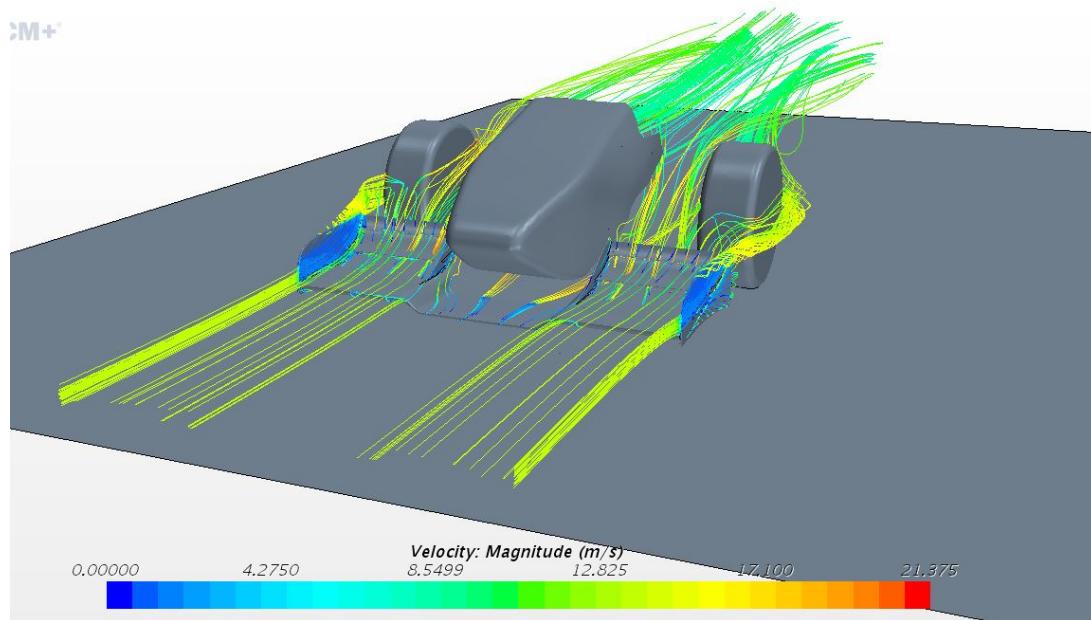


FIGURE 45 – Stream-line aile antérieure

C'est bien évident ce qu'a été expliqué avant, c'est-à-dire que la vitesse au dessus de l'aile est faible, les lignes du écoulement sont bleu, cela signifie que la pression est haute et donc la déportance l'est aussi. De plus, le flux est dévié soit au dessous de la voiture, pour profiter du diffuseur, soit à l'extérieure des roues, pour minimiser la traînée.

4.5.5 Voiture complète

Ici sont affichées les images de la voiture complète finale ainsi que les résultats obtenus avec les simulations numériques.

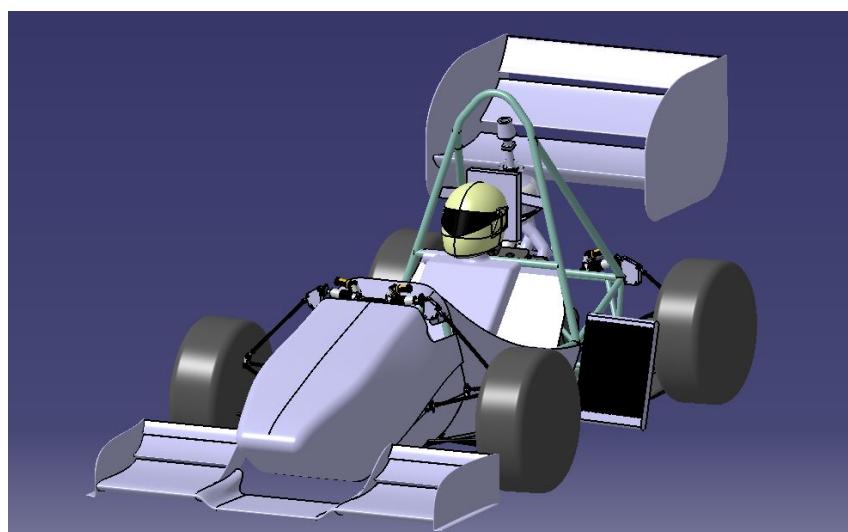


FIGURE 46 – Maquette finale de la voiture complète (Vue antérieure)

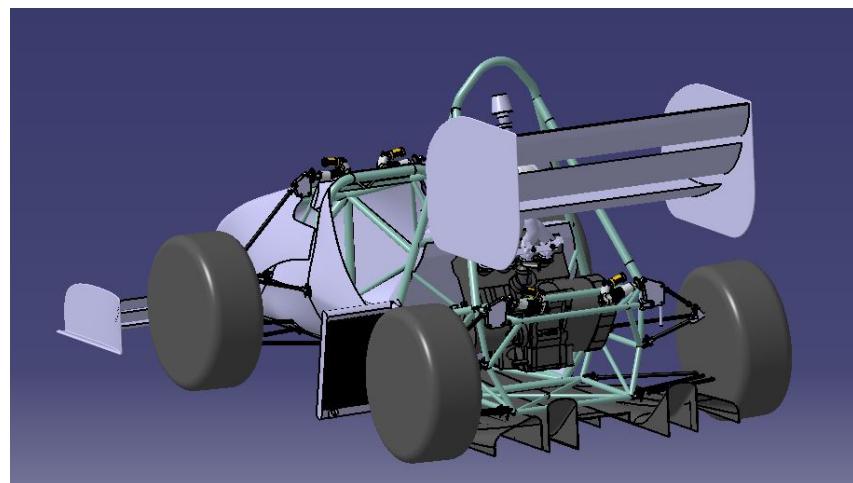


FIGURE 47 – Maquette finale de la voiture complète (Vue arrière)

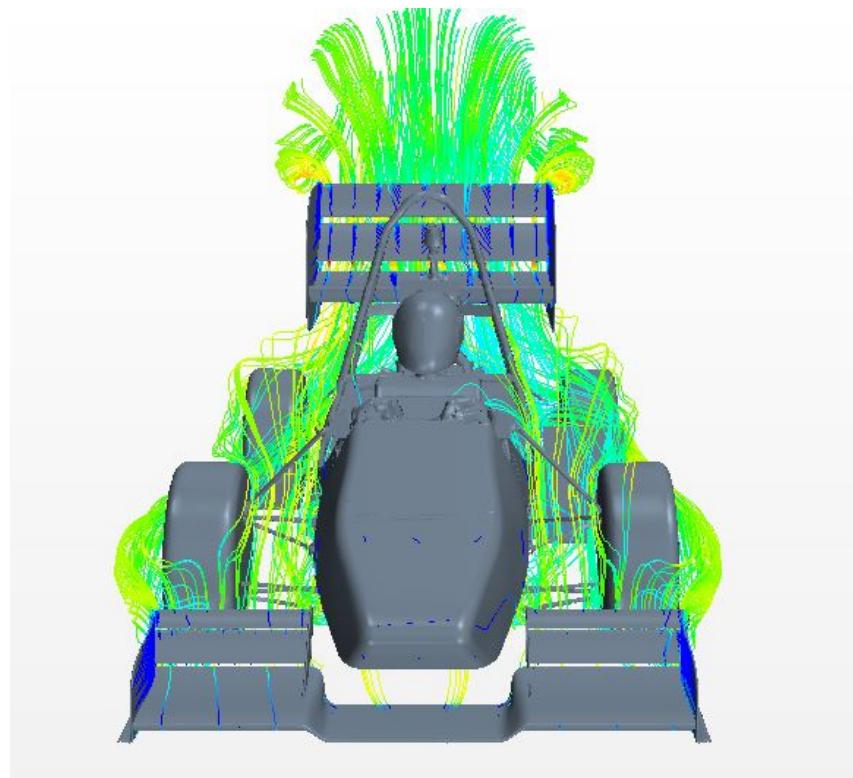


FIGURE 48 – Stream line maquette complète

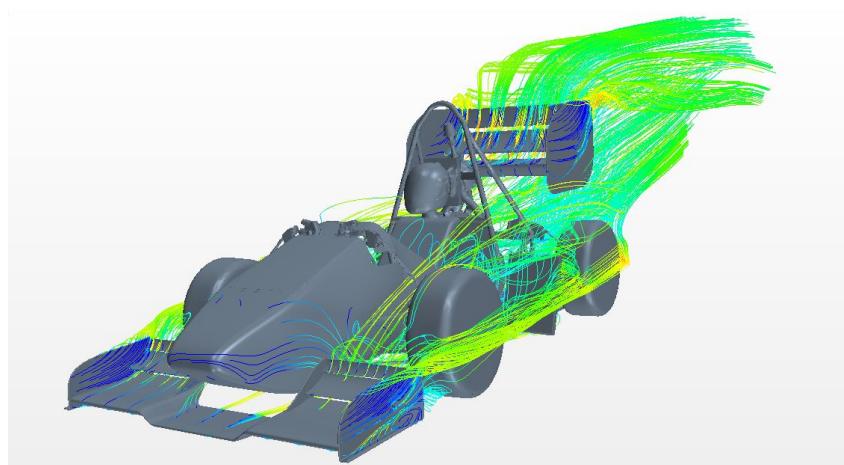


FIGURE 49 – Stream line maquette complète

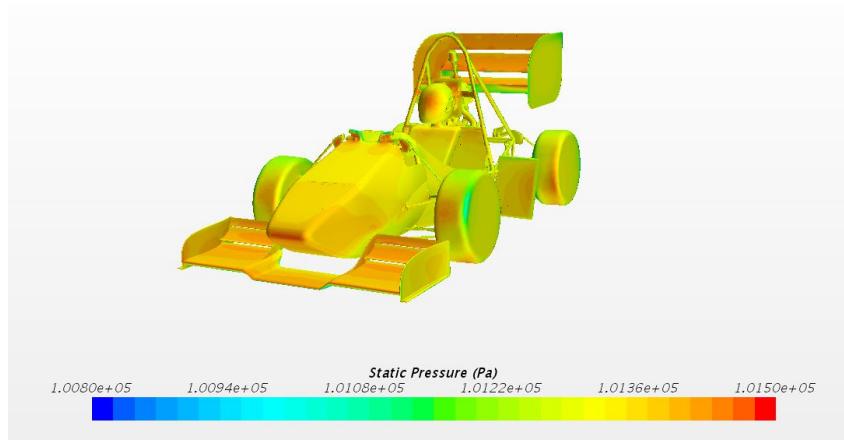


FIGURE 50 – Pression statique voiture complète

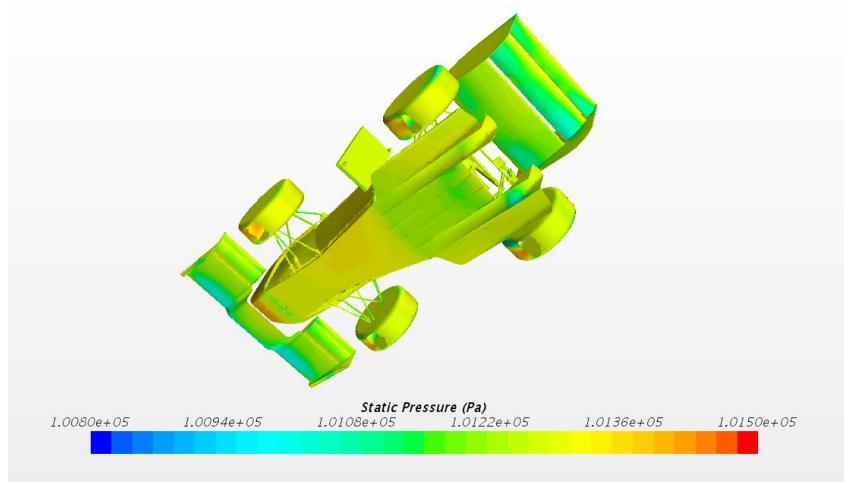


FIGURE 51 – Pression statique voiture complète

Toutes les simulations que nous avons fait nous ont amené à modifier toutes les appendices aérodynamiques. Cela parce que on a pu calculer les balancement des forces

aérodynamiques et donc l'appui généré soit sur l'axe des roues antérieures soit sur l'axe des roues arrières. Avant d'effectuer ces modifications on avait 63.5 % devant et par conséquent 36.5 % derrière. Ce calcul a été fait en calculant le moment généré par les forces aérodynamiques autour soit de l'axe antérieur soit de celui postérieur. Finalement en sachant la distance entre les axes, on utilise le moment autour de l'axe antérieure pour calculer l'appui sur l'axe arrière et vice versa. Ce mauvais balancement de la voiture nous a obligé de procéder à une amélioration de l'aile arrière et en même temps à la choix d'une aile antérieure qui produit moins de déportance. Ce choix était la seule possible puisque produire déportance à l'arrière apparaît plus complexe à cause du fait que dans cette zone l'écoulement est 'sale' par rapport à celui qui touche l'aile antérieure, laquelle de plus bénéficie aussi de l'effet sol qui en augmente l'efficacité. Après avoir enlevé les petites appendices de l'aile antérieure, en choisissant la première version, et après avoir modifié l'aile arrière, le balancement résultant est 53.6 % devant et 46.4 % derrière. Donc les modifications étaient nécessaires pour mieux balancer l'appui.

Le diffuseur a du être modifié car il empêchait l'accès au support de la pushbar, et donc il a la forme définitive illustrée dans le chapitre 4.5.2

$Lift^-$	286.79 N
$Drag$	162.34 N
Aire de référence	$1.138 m^2$
C_L^-	2.23
C_X	1.26
% $Lift^-$ Front	53.6 %
$Lift^-$ Aile Antérieure	124.70 N
$Lift^-$ Aile Arrière	132.50 N
$Lift^-$ Diffuseur	28.82 N

TABLE 3 – Résultats de la maquette finale à 50 Kph

Finalement on peut bien souligner que le C_X n'a une valeur pas assez haute, et donc loin du maximum.

Ensuite on montre le *Design Specification Sheet* que doit être montré aux compétitions.

Aerodynamics (if applicable)	Units						
Type / Configuration		Front Wing, Rear wing, Diffuser					
Forces (at 80 kph, $\rho = 1.162$ kg/m ³)		Downforce (N):	731,346	% Front:	53,600	Drag (N):	414,973
Coefficients & Reference Area		Cl:	-2,238	Ref. Area (m ²):	1,139	Cd:	1,270
Noteable Features (active, etc)	N/A						

FIGURE 52 – Exemple du FSAE Design Spec Sheet - Partie Aérodynamique

4.5.6 Objectifs futurs

Du point de vue de la réalisation des appendices étudiées, il faudrait un calcul précis des poids de chaque appendice qui est pour l'instant seulement estimé autour de 14 Kg (environ 5 Kg soit l'aile arrière que le diffuseur et 4 Kg pour l'aile antérieure en utilisant CFRP pour les surfaces et Mousse en polyuréthane expansive pour l'intérieur). De plus il faudrait évaluer, ensemble avec l'équipe du châssis, comment attacher les appendices sans que l'efficacité aérodynamique soit dégradée.

En outre il faudrait améliorer la géométrie des ailes de façon qu'elles soient réglables en prévoyant des guides qui permettent de changer l'angle d'attaque des profils directement en piste, soit pour adapter l'appui, et par conséquent la traînée, selon les besoins demandés par chaque éprouve, soit pour gérer le balancement de la voiture selon le feed-back du pilote.

Cette année l'équipe a choisi d'enlever les ouïes afin de gagner de la masse, et de plus aucune étude aérodynamique n'a été menée auparavant. Cependant, si correctement projetées, les ouïes peuvent contribuer directement soit à la génération de déportance soit à l'augmentation de la surface du diffuseur de façon qu'il génère plus de déportance.

L'étude aérodynamique peut aussi souligner la possibilité de déplacer, ou éventuellement redimensionner, le radiateur pour la réfrigération du moteur. Cela soit pour laisser plus d'espace pour les appendices aérodynamiques, soit pour améliorer la voiture d'un point de vue esthétique. De plus une meilleure coopération de toute l'équipe peut permettre d'optimiser le fonctionnement des surfaces aérodynamiques en concevant les autres éléments de la voiture, par exemple le châssis et le filtre de l'air, de façon aérodynamique.

Finalement pendant nos études nous avons constaté beaucoup de difficultés pour ce qui concerne les simulations numériques, soit à cause de la puissance de calcul très limitée dont on disposait, soit pour le manque des licences des logiciels, sauf quelque licence étudiante. Pour cela nous conseillons à l'équipe d'investir de l'argent soit pour des stations de calcul soit pour les licences des logiciels utilisés si on veut vraiment progresser dans l'étude aérodynamique.

5 Conclusion

Ce projet d'ingénierie complexe entre dans sa phase finale. Toute la conception est terminée, et les équipiers s'affairent à monter leurs pièces sur le véhicule. Grâce à une constante motivation de l'équipe et à un soutien salvateur des élèves de premières années, le prototype voit le jour dans les meilleures conditions qui lui sont permises. L'intégration n'est malheureusement pas assez avancée pour pouvoir la documenter suffisamment dans ce rapport, mais le véhicule Optimus est en bonne voie pour participer cet été au Formula Student et tenir ses promesses.

6 Bibliographie

- [1] L'Écurie Piston Sport Auto : <http://www.epsa-team.com/l-ecurie>
- [2] Le partage de connaissance intergénérationnel : <https://epsabox.kad-office.com/w/Accueil>
- [3] Competition Car Aerodynamics, Simon McBeath, 2006
- [4] Aerodynamic Study of a Formula SAE Car, Sneh Hetawala, Mandar Gophaneb, B.K.Ajayb, Yagnavalkya Mukkamalab
- [5] Auteurs non nommés, Formula Student Rules 2018, Version : 1.1. Disponible sur <https://www.formulastudent.de/>
- [6] Les composites dans l'industrie automobile, Nicolas Piccirelli et Alain Giocosca, 2011

7 Annexes

7.1 Historique des véhicules EPSA

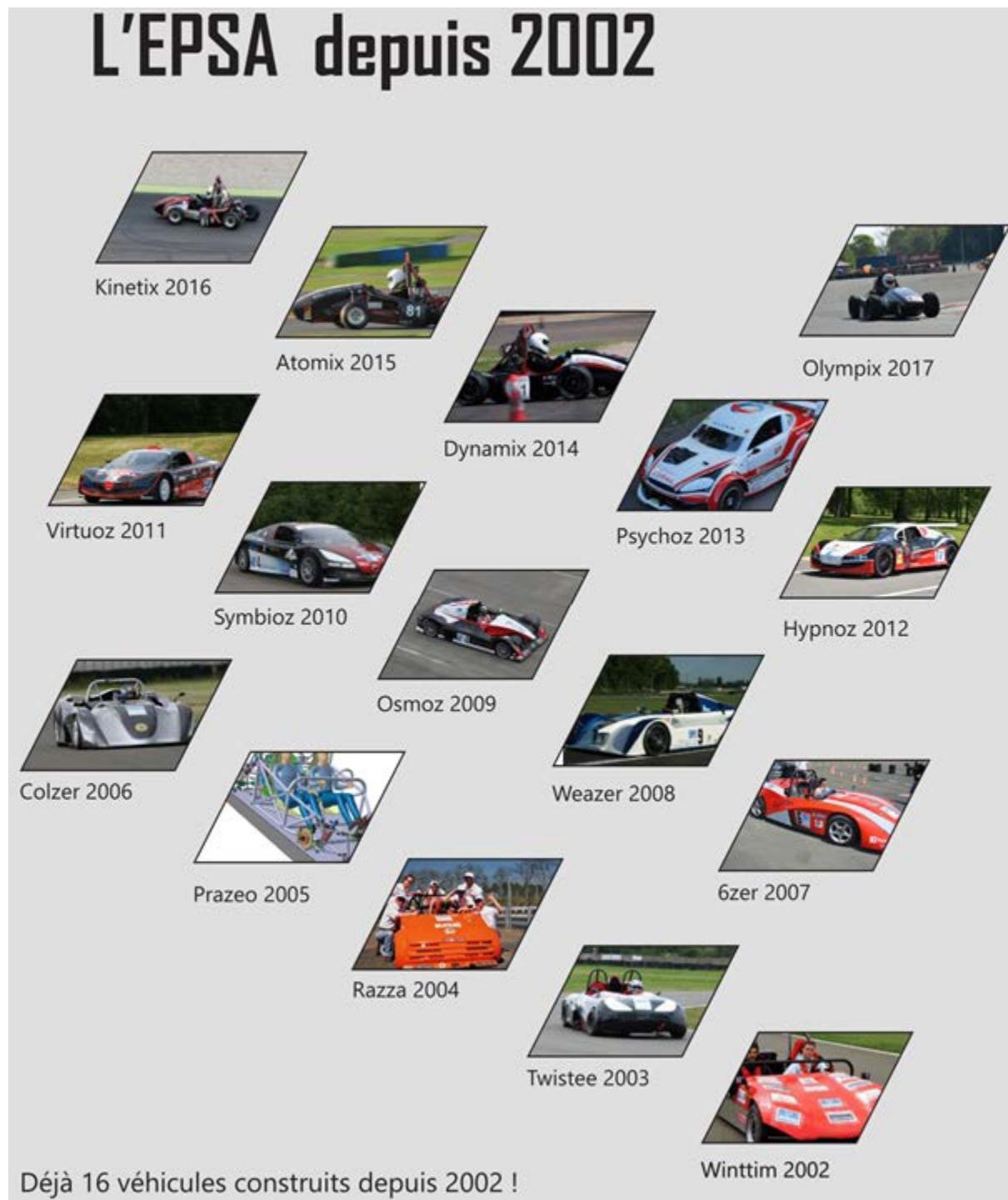


FIGURE 53 – Historique des véhicules de l'Ecurie Piston Sport Auto

7.2 Performances des différents véhicules

Version véhicule	STUF'2014-Dynamix v1.0	STUF'2015-Atomix v1.0	STUF'2016-Kinetix v1.0	STUF'2017-Olympix v1.0	STUF'2014-Dynamix v2.0	STUF'2015-Atomix v2.0
Prévisionnel Perfo STUF	Dynamix v1.0	Atomix v1.0	Kinetix v1.0	Olympix v1.0	Dynamix v2.0	Atomix v2.0
REX Compétition	à Parme	à Parme	à Parme	à Parme	à Silverstone	à Silverstone
Date	Août 2014	Sept 2015	Juillet 2016	Juillet 2017	Juillet 2015	Juillet 2016
Point d'expérience PEME	EPSA'2014.8	EPSA'2015.9	EPSA'2016.72	EPSA'2017.71	EPSA'2015.7	EPSA'2016.71
Performance économique :						
Coût ISYRUN - (en €TTC)	70 540 €	60 478 €	51 462 €	59 643 €	tba	tba
Coût EPSA - (en €TTC) [3]	tba	1400 €	0 €	tba	tba	tba
Coût Total - (en €TTC)	tba	tba	tba	tba	tba	tba
Performance statique :						
Pesée FS	260 kg	221 kg	224 kg	239 kg	255 kg	217 kg
Design	106/150	93/150	79/150	55,9/150	95/150	100/150
Cost	59/100	71/100	80/100	86,9/100	46/100	61/100
Business	49/75	63/75	52/75	29,1/75	52/75	42/75
Sous-Total Statique	214/325	227/325	211/325	171,9/325	193/325	203/325
Performance dynamique :						
Accélération	49/75	44/75	8/75	4,5/100	50/75 (4.226s)	24/75 (4.921s)
Skid Pad	18/50	3/50	30/50	20/75	18/50 (5.324s)	19/50 (5.407s)
Autocross	36/150	45/150	8/150	6,5/125	44/150 (63.728s)	50/150 (60.207s)
Endurance	28/300	21/300	5/300	0/275	175/300 (1756.430s)	130/300 (1611.680s)
Efficiency	0/100	6/100	0/100	0/100	0/100	0/100
Sous-Total Dynamique	131/675	119/675	51/675	31/675	287/675	223/675
Penalty	0	0	0	50	0	0
Performance Totale FS :	346/1000	346/1000	262/1000	153/1000	479/1000	426/1000
Classement formel FS	24 ^{ème} /44	24 ^{ème} /43	23 ^{ème} /39	35 ^{ème} /51	20 ^{ème} /96	31 ^{ème} /108
Classement base 100	Top 55%	Top 56%	Top 59%	Top 68%	Top 21%	Top 29%
Performance Saison EPSA :						
Progression absolue - (en points)	base 100	base 100	base 75	base 44	base 100	base 89
Progression annuelle - (en points)	-	+0%	-25%	-56%	-	-11%
WRP (World Ranking Performance)	222 ^{ème}	192 ^{ème}	226 ^{ème}	310 ^{ème} /551	161 ^{ème}	177 ^{ème}

FIGURE 54 – Performances comparées des différents véhicules de l'écurie