



MIG F1 -Aéro

Remerciements

Nos remerciements vont en premier lieu à Pierre-Olivier Bouchard et Élie Hachem, pour nous avoir guidés et conseillés durant ces trois semaines. Leur attention patiente et leur savoir-faire y sont pour beaucoup dans le succès de ce projet. Nous remercions également les chercheurs et les doctorants qui nous ont aidés et conseillés : Lucas Sardo, Daniel Pino Munoz, Jean-Luc Bouvard, Christophe Pradille, Corentin Perderiset. Enfin, nous remercions de manière générale tout le personnel du Centre de Mise en Forme des Matériaux, et tous ceux qui ont contribué au succès de ce projet.

Table des matières

I. Contexte économique et social	8
A. Economie de la F1	8
1. De l'organisation de la F1	8
2. Les opérations marketing	9
3. Les enjeux pour les constructeurs	11
4. L'aspect social	11
B. La Formule 1, un sport mécanique	13
1. Bilan carbone	13
2. Pilotes	13
C. La FIA et son rôle	14
II. Technique	14
A. Dimensionnement	15
1. Choix des matériaux	15
2. Dimensionnement	16
B. Matériaux	19
1. Tests mécaniques et mesure des champs de déformations	19
2. Identification d'une loi de comportement	20
3. Validation des paramètres grâce au logiciel Abaqus	21
C. Aérodynamisme du halo	22
1. Déroulement de l'étude	22
2. Analyse de l'impact des différents modèles de halo sur l'écoulement	23
3. Améliorations : ajouts d'appendices	23
4. Le Choix	24
D. Aérodynamisme de la Formule 1	25
1. Contexte de l'étude	25
2. Premières analyses et influence du halo	25
3. Création d'appendices	26
4. Présentation et analyse des résultats	27
5. Conclusion	28
E. Les extensions aux projets	28
III. Avenir de la Formule 1	30
A. La Formule E	30
1. Performances	30
2. Considérations écologiques	31
3. Impact social	31
B. Ouverture vers l'avenir de l'automobile	32
1. Une fenêtre sur la Formule 1	32
a. La Formule 1, un modèle d'innovation	32
b. Passage à l'électrique	32
c. Une transition frileuse	33
2. Les transferts dans la Formule 1	33
3. Le marché de demain	34

IV. ANNEXE	36
A. Dimensionnement et structure	36
1. Normes de la FIA	36
2. Choix des matériaux	39
3. Le halo D	43
4. Le halo E	44
5. Le halo F	45
6. Le halo G	47
B. Matériaux	48
1. Identification d'une loi de comportement du TA6V	48
2. Influence de l'anisotropie	53
3. Influence du traitement thermique	55
C. Aérodynamisme du halo	59
1. Simulations numériques	59
a. Génération de maillage anisotrope par couche pour des simulations RANS	60
b. Etude	61
2. Simulations expérimentales	62
3. Etude des halos et des appendices	64
a. Déroulé de l'étude	64
b. Critère de l'analyse	65
4. Comparaison Casque / halo A / halo B	70
5. Dialogue avec le groupe dimensionnement et structure	76
6. Comparaison des différents appendices	79
a. Aileron simple	80
b. Aileron triple	82
c. Générateur de vortex	84
7. Conclusion	86
D. Aérodynamisme de la F1	87
1. Contexte de l'étude	87
2. Premières analyse et influence du halo	89
3. Présentation des appendices	92
4. Présentation des résultats	99
5. Interprétation des résultats	102
6. Conclusion	104
E. Compte-rendu des visites et conférences	105
1. Séminaire innovation et stratégie automobile	105
a. Marché	105
b. Stratégie de conception	106
c. Innovation	107
d. Synergie F1/voiture de série	108
e. Conclusion	108
2. F1 Renault Sport	109
a. Renault Sport	109
b. F1 aerodynamics	109
c. Design analysis and validation processes in F1	111
d. Aerospace and formula 1	113
e. The halo	114
3. Interview	115
4. La F1 et l'aéronautique (visioconférence)	120
a. Des défis partagés	120
b. Focus sur la F1 : de 1950 à nos jours	122
c. Deux domaines tournés vers l'avenir	124

Introduction

La Formule 1

La Formule 1 est une discipline qui naît en 1950 et domine le milieu des sports automobiles. Elle a petit à petit pris une dimension mondiale et bénéficie, avec la coupe du monde de Football et les Jeux Olympiques, d'une couverture médiatique des plus importantes parmi les événements sportifs. D'après la généalogie qu'a pu nous dresser Dominique Madier, fondateur de De Vinci Engineering et ancien ingénieur aéronautique et automobile, elle reste jusqu'aux années 70 un travail de force brute, où l'accent est mis sur le moteur. Les voitures ont alors une forme allongée et aplatie qui limite la force de traînée, mais rien de très performant. L'arrivée des grands constructeurs automobiles qui cherchent à profiter de la forte médiatisation de ce sport va bouleverser les méthodes de travail des écuries. On voit alors apparaître sur les voitures de course quelques « appendices aérodynamiques » qui ont pour rôle de maximiser la déportance, c'est-à-dire la force qui plaque la voiture au sol, tout en minimisant la force de traînée, responsable de pertes énergétiques limitant les performances du véhicule.

Ainsi, l'évolution des véhicules, en seulement 60 ans, est considérable. Les véhicules se sont transformés et sont de véritables bijoux de conception et de technologie. En effet, la concurrence est telle que les constructeurs se battent aujourd'hui pour quelques fractions de seconde. De ce fait, ce domaine constitue actuellement un secteur pionnier en terme d'innovation technique, comme nous avons pu le constater lors de la visite du centre Formule 1 de Renault à Enstone, près de Londres.

Synergie

Outre la vitrine qu'elle constitue pour les différents constructeurs, la Formule 1 est, comme nous l'avons déjà soulevé, un domaine précieux d'expérimentation de nouvelles technologies. Les ressources y sont colossales, ce qui permet aux équipes d'implémenter leurs découvertes sans se soucier autant que dans l'industrie publique des retombées économiques sur l'entreprise. Par exemple, la masse d'une Formule 1 provient aujourd'hui à environ 85% de matériaux composites, contre une portion inférieure à 30% dans les voitures de série, une différence qui s'explique par des facteurs de coût et d'impacts environnementaux différents dans les deux milieux.

Pourtant, les découvertes techniques de la Formule 1 sont bien souvent réutilisées pour les véhicules de série. Une véritable synergie existe entre ces deux domaines qui coexistent. Le plus grand transfert technologique est réalisé lorsque les ingénieurs se déplacent eux-mêmes de la F1 vers l'industrie civile.

Sécurité

La Formule 1 est régulée par la Fédération Internationale de l'Automobile (FIA), chargée des décisions en matière de limitation sur l'impact écologique des courses, mais aussi et surtout de la sécurité des pilotes et des spectateurs (son premier but restant de garder la F1 attractive pour les investisseurs et le public). Tout au cours de l'histoire de la Formule 1, la FIA a en effet, de manière préventive ou bien postérieure aux innovations, modifié les règles concernant les technologies autorisées, interdites ou obligatoires sur le véhicule. Suite à certains accidents, mortels (Jules Bianchi, décédé en 2015 à Nice) ou non, l'organisation a pris la décision en 2017 d'inclure une pièce permettant de protéger le pilote : le halo. Celui-ci encadre le pilote dans sa cabine, et suit un lourd cahier des charges en terme de résistance et de forme. C'est un composant au centre des attentions ces derniers temps tant pour sa technique poussée que pour les débats qu'il provoque parmi les amateurs de F1. Ce constituant a fait l'objet d'une étude poussée dans le cadre de notre MIG autour de 3 principaux thèmes : les matériaux, le dimensionnement et l'aérodynamisme.

I. Contexte économique et social

A. Economie de la F1

1. De l'organisation de la F1

À la naissance des sports automobiles, au début du XXème siècle, seule la Fédération Internationale des Sports Automobiles (FISA) existait (fondation en 1904). Par la suite, la Formula One Constructors Association voit le jour en 1974. Les deux entrent en concurrence pour les droits commerciaux de la formule 1. A l'origine, la FOCA est créée pour organiser le fonctionnement des écuries et des acteurs financiers. Après une période de dispute entre ces deux institutions, les Concorde Agreement sont établis sous plusieurs étapes (1981, 1987, 1992...). Ces différentes versions accordent de plus en plus de droits à la FOCA qui devient la Formula One Management (FOM). Aujourd'hui, toutes les administrations commerciales de la Formule 1 sont regroupées sous le nom de Formula One Group (FOG) qui est chargé par la FIA du business model régissant ce sport automobile. La FIA, quant à elle, a préservé l'autorité et ne fait que déléguer aux différentes institutions.

De la FOG dépendent le budget des écuries et le salaire des pilotes, c'est-à-dire que ces derniers reposent essentiellement sur les droits de retransmission télévisés qui sont traditionnellement la base de l'économie de la F1. Le budget total de la Formule 1 est issu de divers acteurs :

- pouvoirs publics
- industriels impliqués
- circuits organisateurs de Grand prix
- droits de retransmission télé
- sponsors

Les recettes représentent environ 2 milliards de dollars pour une année. Celles-ci sont distribuées aux $\frac{2}{3}$ aux écuries, le partage entre celles-ci se faisant sur des critères historiques et de résultats.

Pour ce qui est de la construction des circuits, ce sont les pouvoirs publics de chaque pays qui interviennent en premier lieu. Les Grand prix, très médiatisés dans le monde entier, offrent un retour sur investissement intéressant grâce à la notoriété qu'ils confèrent aux pays organisateurs. Ainsi, ce ne sont pas moins de 70 circuits qui ont été construits ou aménagés depuis la mise en place du championnat du monde de Formule 1 en 1950.

Par ailleurs, les écuries elles-mêmes n'ont pas toutes le même budget. Les principales sont Mercedes GP avec 1,5 milliards dépassant de loin le 2ème du podium, Ferrari, et ses 350 millions, ainsi que Red Bull avec 320 millions d'euros investis sur une année. Évidemment, l'investissement de départ est souvent corrélé avec les résultats de chacune des écuries. Par conséquent, celles-ci récupèrent souvent une partie de leur mise de départ en se plaçant dans les premières places mondiales et en récupérant par là la plus grosse partie des recettes. En effet, par leur investissement, les grandes écuries réussissent à créer des appendices aérodynamiques [Fig.I.A.1.a] qui font gagner de précieuses fractions de secondes: entre les déflecteurs qui écartent l'air sale sur les côtés de la Formule 1 et la déportance qui atteint quatre fois celle du poids du véhicule, les ingénieurs se surpassent.

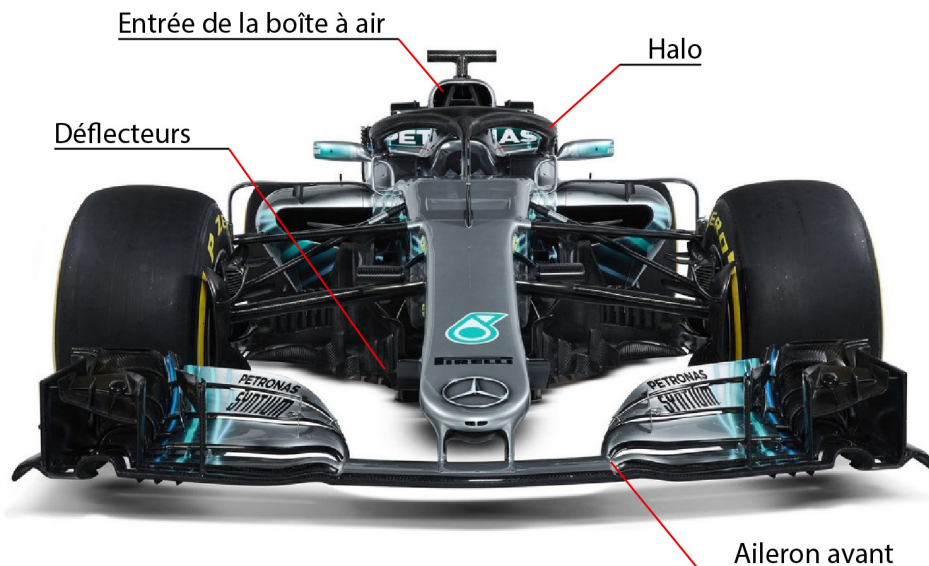


Fig.I.A.1.a Exemples d'ajouts

D'autre part, les investissements en Formule 1 ont pour but de procurer aux écuries une image de marque sans précédent, surtout pour celles qui sont les plus couronnées.

En outre, les prix d'entrée de chaque pays aux championnats mondiaux sont estimés entre 15 et 20 millions d'euros, ce qui a poussé l'Allemagne à se retirer des courses en 2015 et la France à ne pas véritablement envisager de rejoindre ces championnats. Ces honoraires, extrêmement élevés, représenteraient en 2011 près de 500 millions de dollars, constituant une des premières ressources financières pour la FOM, l'autre étant les droits de retransmission télévisés, dont le montant est sensiblement le même. Ceci s'explique par le nombre de spectateurs dans le monde : 450 millions de téléspectateurs en 2014 selon le journal Formula Money, sans compter les millions de personnes suivant la Formule 1 sur les réseaux sociaux, une nouveauté depuis le départ de Bernie Ecclestone de la tête de la FOM.

Enfin, la dernière source de recettes pour la FOM provient des sponsors. En effet, le taux de médiatisation de ce sport automobile attire les plus grandes marques qui mènent une concurrence rude pour pouvoir avoir leur nom sur une voiture. Ainsi, ce secteur représenterait environ 250 millions de dollars pour la FIA. A titre d'exemple, ING a dépensé près de 50 millions de dollars pour s'afficher sur la carrosserie d'un monoplace Renault F1 Team. Les écuries reçoivent des sommes colossales de la part de sponsors habituels (télécoms, automobile, mode, boissons...) et de nouveaux, apportés bien souvent par un pilote prêt à acheter sa place dans une de ces voitures. Ainsi, il y a d'un côté les pilotes payés des dizaines de millions d'euros par an, et de l'autre ceux qui paient pour être aux côtés des premiers : un paradoxe de la Formule 1.

2. Les opérations marketing

La F1 a traditionnellement été financée par la télévision, que ce soit pour les droits de diffusion ou la couverture médiatique apportée. Cependant depuis 2011, il semblerait que l'audience soit sur le déclin : 530 millions de téléspectateurs ayant regardé au moins une course à l'époque contre 350 millions en 2018 d'après auto-moto. Les contrats avec Canal+

ramènent peut-être plus d'argent mais ne promettent qu'un tiers de l'audimat possible avec TF1. Il semblerait cependant que les audiences ont augmenté de 6% depuis 2016 avec 1,4 milliards de téléspectateurs sur toute la saison. Ceci signifie que le public acquis est sans cesse plus impliqué, notamment en Chine avec une hausse de 42% d'audience, mais aussi que de moins en moins de personnes regardent.

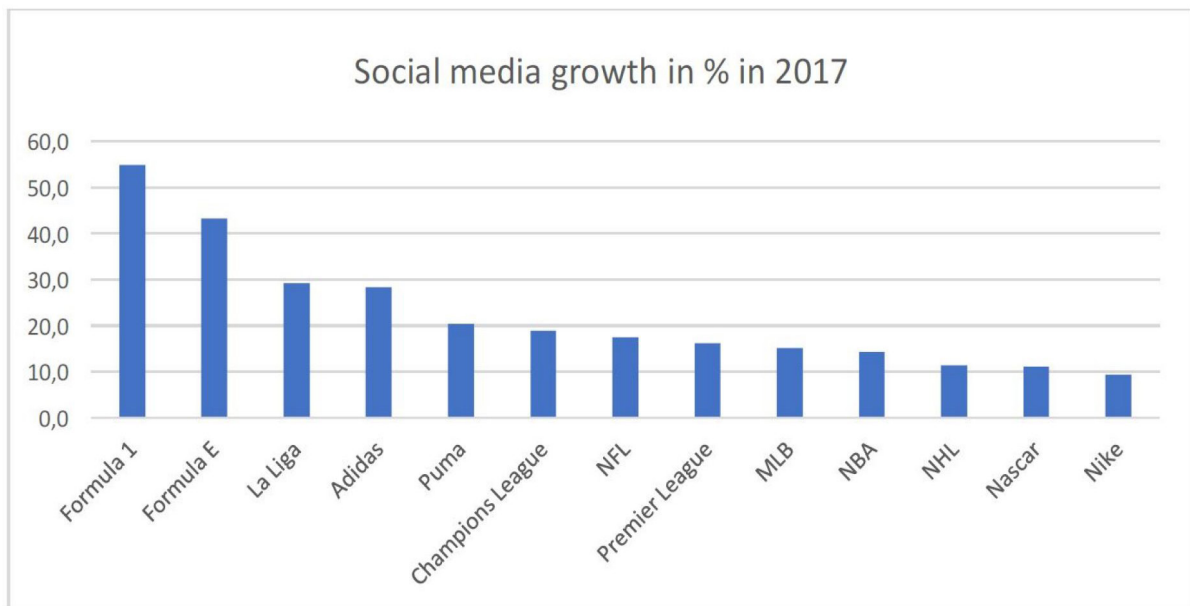


Fig.I.A.2.a

L'actualité est plus à la consommation internet, ce que [Fig.I.A.2.b] montre. La télévision reste donc un acteur majeur, mais déclinant, à cause peut-être des nouvelles réglementations de la FIA qui rendent la Formule 1 moins bruyante, moins dangereuse et plus uniformisée. En effet, quand bien même le halo est capable de supporter le poids d'un bus, c'est à dire 12 tonnes, pour moins de 7kg de masse propre grâce à un bon choix de matériaux et de dimensionnement, que nous avons étudiés, il ne fait pas l'unanimité, que ce soit pour les téléspectateurs qui le jugent peu esthétique, ou les pilotes qui critiquent l'impact sur la visibilité et le confort. L'envie de la FIA est aussi peut-être de séduire une nouvelle génération de spectateurs, plus "numérique", et plus "verte" aussi. Même s'ils gonflent un peu les chiffres en cumulant les plateformes, on estime une augmentation de 50% d'audience sur les réseaux sociaux en 2017, première année de compétition sans Bernie Ecclestone, ancien patron de la FOG dont le dédain pour ces nouvelles méthodes de partage était connu de tous. On peut donc penser que les beaux jours de la F1 ne sont pas terminés, et ce grâce à un public présent à la fois devant les écrans de télévisions, et d'ordinateurs.

Pour ce qui est des courses en elles-mêmes, une refonte de forme a été réalisée par Liberty Media, nouveaux propriétaires en 2017 : des visuels plus immersifs et des horaires moins contraignants en milieu d'après-midi, le dimanche. Pour reconquérir une partie de son public, la Formule 1 se voit offrir en 2018 quatre courses diffusées en direct sur TF1 après 5 ans d'absence sur la chaîne. Liberty Media ne cache d'ailleurs pas son envie d'investir de plus en plus dans la promotion du sport, une stratégie déplaisante pour les écuries qui verraient certainement leur cachet diminuer. Dans cette veine apparaissent des shows urbains, des projets de cérémonie d'ouverture mais aussi des rapprochements au monde de la gastronomie et de la mode.

L'évolution des méthodes de communication, plus intrusives, était inévitable pour assurer la prospérité du sport devant une FIA et des groupes de militants qui imposent des changements. Le halo, le nouveau logo et la disparition des grid girls ne sont pas au

goût de tout le monde, surtout parmi les amateurs de F1. Chose surprenante en 2017, les constructeurs ont eux aussi apporté leur pierre à l'édifice puisqu'avec les améliorations aérodynamiques nouvellement introduites les véhicules ont gagné en vitesse mais l'air déplacé par un véhicule est perturbé ce qui rend la poursuite et le dépassement difficiles. Ainsi, moitié moins de dépassements cette fois que l'année précédente.

D'un autre côté, sans présumer des goûts des spectateurs, les amateurs de la première heure sont vieillissants. Cela se ressent avec la disparition des téléspectateurs et le succès grandissant de la Formule E, dont le grand prix se veut plus proche des nouvelles technologies et d'un avenir propre, sujet sensible de nos générations.

3. Les enjeux pour les constructeurs

Renault a signé son grand retour dans la Formule 1 en 2016 avec le rachat de l'écurie Lotus. Les raisons d'une telle décision ne sont pas évidentes, mais l'intérêt grandissant de la Chine pour ce sport peut nous en donner une idée. En effet le pays au marché le plus attractif dans l'automobile aujourd'hui est le même qui ferme ses portes aux constructeurs étrangers. Nous l'avons vu lors du séminaire de Sophie Hooge (Annexe ...), la Chine est le graal pour une entreprise comme Renault qui refuse de s'insérer sur le marché au prix de la majorité de ses parts. Le constructeur a déjà réussi à mettre un pied en Asie avec l'alliance Renault-Nissan dont Carlos Ghosn est le président (même si l'actualité peut nous faire douter de cette réussite) et il compte bien continuer de gagner des parts de marché : la F1 devient la vitrine parfaite.

En 2017 le logo Infiniti apparaît pour la première fois sur le véhicule de l'écurie Renault. Cette filiale de Nissan avait déjà fait son apparition avec l'équipe Red Bull-Renault en 2011, déjà 12 ans après les débuts de l'alliance. Le but à l'époque était de faire connaître la marque et cela a fonctionné, mais c'est seulement depuis 2017 que les objectifs de Renault-Nissan-Mitsubishi se dessinent clairement avec l'Alliance 2022, axée sur le partage de technologies vertes, connectées, et autonomes. Un sport mécanique comme la Formule 1 est le banc d'essai idéal. La technologie que Infinity convoitait lors de cette dernière édition était le MGU-H, un système de récupération de la chaleur de sortie du moteur dont le développement avait un certain prix. Les systèmes de contrôle aussi intéressaient la marque qui compte sortir une voiture à double hybridation, MGU-H et MGU-K, du jamais vu dans les véhicules de série mais mis à l'épreuve sur les F1.

Un constructeur comme Renault, qui n'est pas l'un des vainqueurs, ou même participants, classiques de la F1 doit trouver de l'intérêt dans les développements techniques vers lesquels la compétition le dirige. Comme évoqué plus haut, il reste des technologies à approfondir, cependant on sent la discipline s'essouffler quand une grosse partie des compétiteurs se dirige vers la soeur électrique de la Formule 1. Des investissements 15 fois inférieurs, des technologies méconnues et très prometteuses, c'est tout ce que la Formule E offre et ce n'est pas le bruit des voitures, moins agressif, qui va faire fuir les constructeurs.

4. L'aspect social

Un sport élitiste ?

La Formule 1 est souvent associée à un sport de nantis. Ceci est justifié à bien des égards : coût d'une saison de Kart (entre 120 000 et 150 000 €) lors de la formation des futurs

pilotes, des pilotes sont forcés de payer une écurie pour participer aux championnats... Le public, lui, est multiple : les téléspectateurs sont à priori issus de tout type de milieu social ; les initiés en revanche sont bien souvent des personnes aisées, comme peuvent le démontrer certaines villes hôtes des évènements, ou même le prix d'une place pour un grand prix.

Un sport masculin

La Formule 1 reste, encore aujourd'hui, un sport dans lequel concourent principalement des hommes. Si les femmes tentent désespérément de rejoindre la compétition, les problématiques restent multiples :

- adaptabilité de la cabine: Tatiana Calderon se plaint d'un manque de flexibilité dans la réglementation qui aboutit à des problèmes de confort et de manoeuvrabilité qui limitent ses performances.
- sexisme : il s'agit d'un milieu très macho dans lequel une ascension féminine est difficile. Certains pilotes de Formule 3 sont prêts à créer un accident plutôt que de se faire doubler par une femme...
- résistance physique : nombreux sont ceux qui décrivent les capacités physiques des femmes, qui seraient par exemple moins résistante que les hommes aux accélérations ou moins endurante durant la course, rumeurs qui ont été démontrées fausses.

La tendance est néanmoins au progrès grâce à des personnalités comme Tatiana Calderon, qui est parvenue à convaincre son écurie de l'influence de son confort sur ses performances, mais aussi de Michèle Mouton, directrice des championnats du monde de rallye, qui fait progresser la place des femmes au sein des sports automobiles.

Un générateur de rêve

Depuis bientôt 70 ans, la Formule 1 a fait rêver une succession de générations. Si l'automobile est aujourd'hui monnaie courante, il n'en est pas moins que la Formule 1 reste une projection de l'innovation, sans cesse en quête de renouvellement et d'innovation, et souvent bien en avance sur l'industrie des véhicules de série. Cet incubateur de nouvelles technologies peut également susciter de nombreuses vocations, que ce soit dans les veines du sport actuel, ou bien dans les perspectives d'avenir qu'il offre : voitures full electric, autonomes...

Dans la conduite des pilotes certains voient le but à viser, et dans leur comportement en dehors des courses un modèle à suivre. Ils représentent le succès, et surtout l'audace quand devant des millions de personnes ils mettent leur vie en jeu et dépassent les limites du spectateur moyen à la vitesse d'une balle.

Cet aspect culturel et artistique de la Formule 1 est extrêmement précieux et constitue même la pierre angulaire de tout son système économique : faire rêver pour continuer à innover et surprendre, tel est l'apanage de ce sport.

B. La Formule 1, un sport mécanique

1. Bilan carbone

Tout d'abord, il est à noter que la catégorie des compétitions automobiles est souvent, dans le monde du sport, décriée comme la plus polluante. Quoi de plus normal que de voir dans la Formule 1 une source colossale de gaz à effets de serre : des bolides qui foncent à 350 km/h dans un bruit tonitruant, ça ne sonne pas vraiment écolo.

Mais qu'en est-il du vrai impact écologique de ce sport ?

Premier point de ce bilan : une consommation record avec 75L/100km (2221g CO₂/km), c'est 7 à 8 fois plus que la plupart des voitures de série que nous connaissons. Ainsi, en 2007, un chercheur belge, Pierre Ozé, aurait estimé les émissions au cours des 90 minutes de course du Grand Prix de Formule 1 à Spa-Francorchamps à 8400 tonnes de CO₂, soit 5 aller-retour Paris-New York. Voici quelques chiffres à titre d'exemple (sont pris en compte les déplacements des spectateurs, les rejets des engins qui permettent la mise en place de l'événement et bien sûr les véhicules en eux-mêmes) :

Événement sportif	Rejet de CO ₂ (en tonnes)
Un jour du Rallye Dakar	42 000
Un tournoi Roland Garros	160 000
Une saison de F1 (21 courses)	500 000
Une coupe du monde de football	2 700 000

Fig.I.B.1.a

2. Pilotes

Par ailleurs, l'importance des pilotes en Formule 1 est sujette à controverse. En effet, si certains considèrent que la voiture développée dans les écuries est responsable à 90% de l'issue du championnat, d'autres ne se privent pas de louer les performances de tel ou tel pilote. Peut-être s'agit-il finalement d'une question d'échelle. Pour ainsi dire, les pilotes des écuries les moins performantes n'ont évidemment que très peu de chances d'atteindre des podiums, et ce, quel que soit le talent dudit pilote, comme en témoigne Fernando Alonso et ses 4 dernières années pour McLaren. Ce pilote de génie, détenteur de 2 prix mondiaux, décrit par Lewis Hamilton lui-même comme "a multiple world champion, with his pure talent the highest I've experienced of all those I've raced against", n'a en effet reçu aucun prix mondial sur les quatre dernières années, victime des performances erratiques du constructeur, qui n'a pas été capable de fournir une voiture en mesure de concourir à toutes les courses.

Pourtant, lorsqu'il est question des principales écuries, les talents du pilote sont d'une grande importance. Entre Ferrari, Mercedes et Red Bull, les performances techniques des véhicules sont telles que l'écart est minime : c'est là que le pilote prend toute son importance. En effet, l'écurie Mercedes elle-même reconnaît que "We had times when the car was good enough to win and times when the car was not good enough to win. But he [Lewis Hamilton, pilote Mercedes] was very stable". Ainsi, en 2018, il a été reconnu que le modèle Ferrari était le meilleur de la compétition. Pourtant, Sebastian Vettel (pilote numéro 1 Ferrari, et 2^e

pilote mondial) a lui-même reconnu que Hamilton a su faire la différence. Il est d'ailleurs surnommé "the differentiator" par Toto Wolff, chef du staff Mercedes Motorsport.

Le niveau d'exigence et la concurrence dans ce domaine extrêmement compétitif en sont un gage du talent des pilotes. Alonso qualifie ainsi le milieu de la Formule 1 comme "une bulle, quelque chose d'irréel" lorsqu'il décrit le parcours qui l'a mené aux sommets de ce sport. Sacrifices, dévouement ultime, absence de vie familiale sont au rendez-vous de ce métier au paroxysme de l'excellence en tout genre.

C. La FIA et son rôle

C'est la FIA qui édite l'ensemble des règles ayant pour but d'assurer la sécurité du pilote lors des grands prix de Formule 1, discipline phare de cette organisation. Cependant, elle ne que le premier maillon dans la chaîne organisationnelle de la Formule 1, qui peut être schématisée en 3 familles :

- les organismes officiels dont fait partie la FIA qui régule les éléments techniques et sportifs.
- les promoteurs et organisateurs d'évènements qui louent les circuits, contacte les différents acteurs et mettent en place les grands prix.
- tous les participants c'est-à-dire les écuries, les pilotes...

L'organisation interne de la FIA diffère en revanche de celle des écuries. Chez les constructeurs automobiles, en effet, le budget dans la recherche et développement est telle qu'ils puissent se permettre d'avoir des ingénieurs extrêmement spécialisés dans un domaine. Par contraste, dans la FIA, les ingénieurs sont bien souvent pluri-disciplinaires. Ils sont spécialisés dans un domaine particulier, par exemple l'aérodynamisme des véhicules, ou les moteurs, mais exercent dans divers domaines et sur plusieurs pièces (ce qui n'est pas toujours le cas des ingénieurs en écurie).

II. Technique

L'idée d'ajouter un halo sur les formules 1 a vu le jour en 2015 et la FIA l'a imposé comme pièce de sécurité pour la saison 2018. Comme la plupart des procédés dans le domaine de la F1, le développement du halo a donc été réalisé dans délais très brefs. Ceci laisse imaginer que cet appendice peut encore être optimisé.

Comme pour une écurie qui cherche à optimiser une pièce de véhicule, nous nous sommes réparti le travail entre 4 groupes, représentant des pôles de la R&D. Le groupe dimensionnement en charge de repenser la géométrie du halo a dessiné différentes formes possibles sur ordinateur puis en a testé la résistance par simulation numérique. Il a fallu pour cela déterminer la loi de comportement du matériau utilisé, ce dont s'est chargé le groupe matériau en réalisant des essais mécaniques au laboratoire. Enfin deux groupes ont étudié l'aérodynamisme des différents halos proposés et de la formule 1 dans son intégralité. Ces études menées conjointement sur ordinateur et à la soufflerie ont permis de déterminer des formes à privilégier pour optimiser l'écoulement d'air autour de la voiture. Leurs résultats ont été précieux au groupe dimensionnement dans le choix du "meilleur halo".

A. Dimensionnement

Le halo doit résister à des efforts de compression, de flexion et de cisaillement et doit ainsi présenter des propriétés plastiques avec cependant une forte ténacité. Pour garantir cela la FIA impose 2 essais quasi-statiques d'une force de 125 kN, un vertical (essai 1), l'autre latéral (essai 2) (voir annexe A.1- Normes de la FIA). La pièce ne doit pas se rompre et rester sous certains seuils de déformation. Afin de ne pas trop impacter la structure globale de la Formule 1, ni d'augmenter le besoin de carburant, le halo ne doit pas peser plus de 7kg.

Dans le but de modéliser une pièce conforme au cahier des charges, et la plus optimale dans une perspective aérodynamique il est possible de jouer sur deux aspects : les matériaux et le dimensionnement.

1. Choix des matériaux

Afin d'optimiser l'indice de performance, le diagramme contrainte à rupture-densité [Fig.II.A.1.a] invite à utiliser le titane, l'aluminium ou des matériaux composites pour fabriquer le halo (voir annexe A.2- Choix des matériaux).

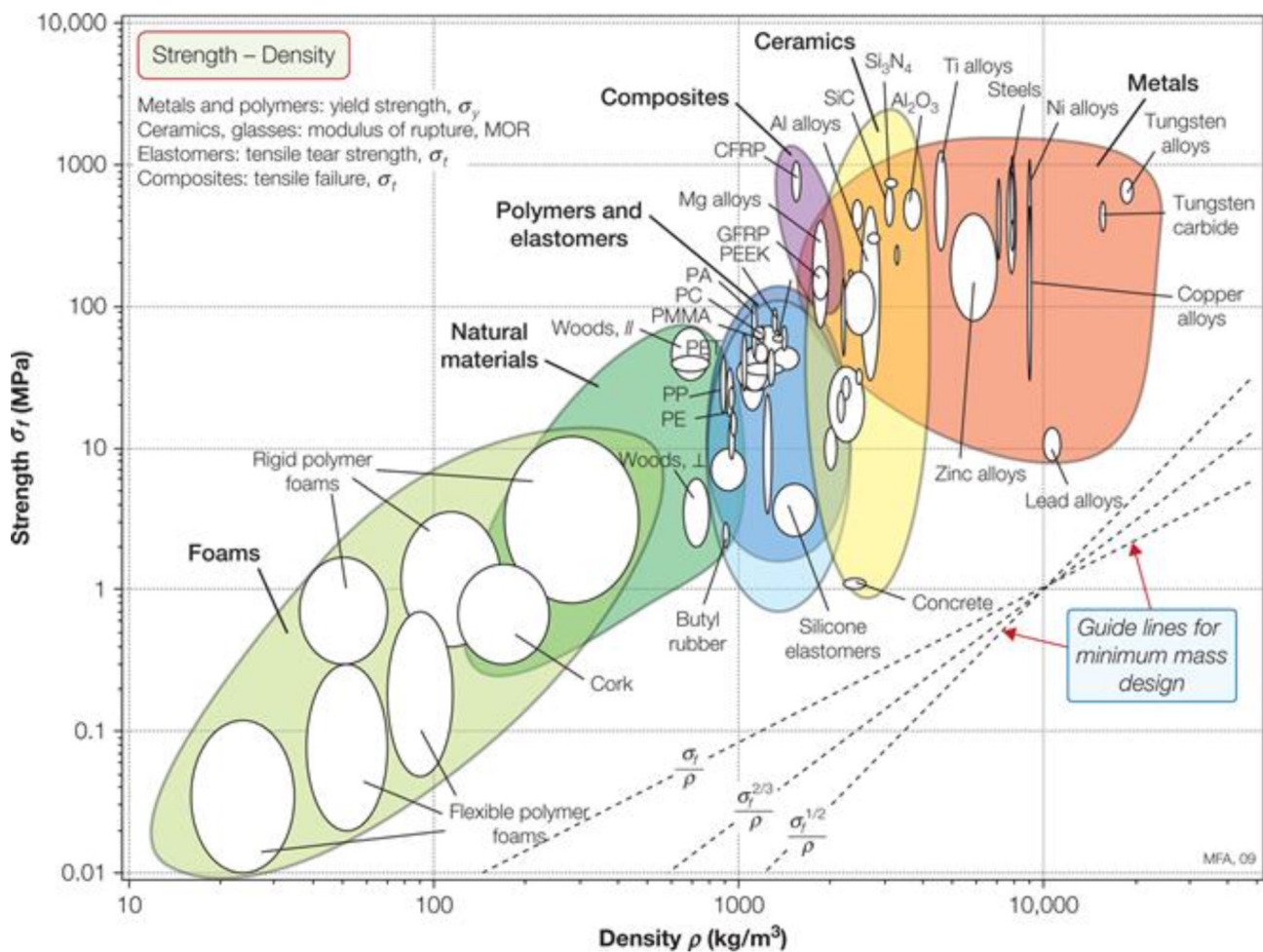


Fig.II.A.1.a Diagramme représentant la contrainte à rupture de différents matériaux en fonction de leur densité

Compte tenu de la complexité des chargements que peut subir le halo ainsi que de problèmes de sécurité (fibres composites en fibre de carbone coupantes après rupture), les matériaux composites sont écartés.

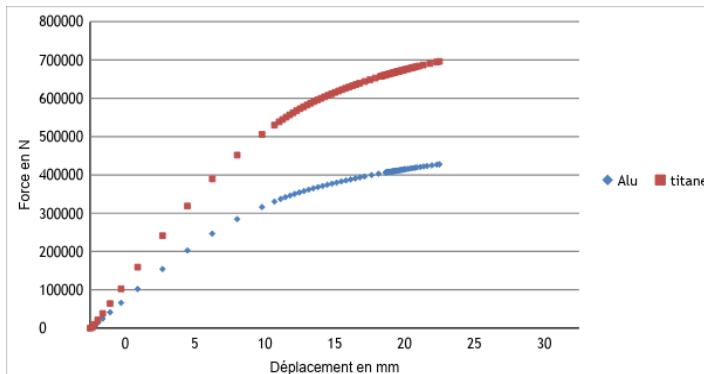


Fig.II.A.1.b Comparaison des courbes force/déplacement obtenues à l'issue d'une simulation de l'essai 1 sur ABAQUS pour de l'aluminium et du titane

Finalement, en croisant ces études il semble que seuls le titane et l'aluminium puissent répondre aux exigences du halo. La réponse à différentes contraintes pour un même halo en aluminium et en titane a été étudiée afin de choisir le matériau le plus adapté.

Pour un même chargement les zones déformées sont rigoureusement les mêmes. Toutefois l'aluminium se déforme bien plus que le titane. En effet à 125kN, efforts des essais quasi-statiques de la FIA, le déplacement maximum observé sur la structure est de 3mm pour le titane contre 5mm pour l'aluminium [Fig.II.A.1.b].

En outre, la contrainte à rupture de l'aluminium étant plus basse, le halo Aluminium casserait plus tôt. La réalisation d'un halo en aluminium nécessiterait une structure plus volumineuse que la structure actuelle ce qui conduirait à réduire les performances aérodynamiques et accroître le problème de visibilité pour le pilote. Le titane est donc préconisé pour la fabrication du halo, c'est d'ailleurs le matériau choisi par la FIA et plus précisément l'alliage TA6V.

Jusqu'à présent les simulations étaient menées en renseignant le logiciel avec la loi de comportement (voir lexique) de la littérature. Pour simuler au mieux les essais il convient d'établir précisément la loi de comportement du TA6V grâce à des essais mécaniques en laboratoire.

Les résultats obtenus au laboratoire diffèrent de ceux de la littérature d'où l'importance des essais mécaniques pour affiner la simulation (voir II.B - Matériaux).

Il convient désormais de choisir le meilleur dimensionnement pour répondre aux demandes de la FIA tout en impactant le moins l'aérodynamisme de la voiture.

2. Dimensionnement

En premier lieu, la FIA a imaginé 3 structures très différentes.



Fig.II.A.2.a Trois modèles de halo proposés initialement

Le design C a été très vite écarté car sa structure tubulaire fine le rendait fragile et gênait la vision latérale du pilote. Le design A a été retenu par la FIA, mais le design B offre des perspectives intéressantes en terme d'aérodynamisme et de résistance aux efforts imposés par la FIA [Fig.II.A.2.a]. C'est la raison pour laquelle nous avons travaillé à la conception et au dimensionnement d'un halo qui s'inspirerait à la fois des halos A et B (voir Annexe A.4 - Le halo D).

Ce halo devait remplir les charges suivantes :

- Répondre aux normes de la FIA en terme de résistance et de déformée maximale ;
- Peser moins de 7 kg ;
- Avoir des dimensions permettant sa fixation sur la voiture ;
- Être le moins encombrant possible pour ne pas gêner le pilote.

Cette modélisation a été réalisée sur le logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) SolidWorks.

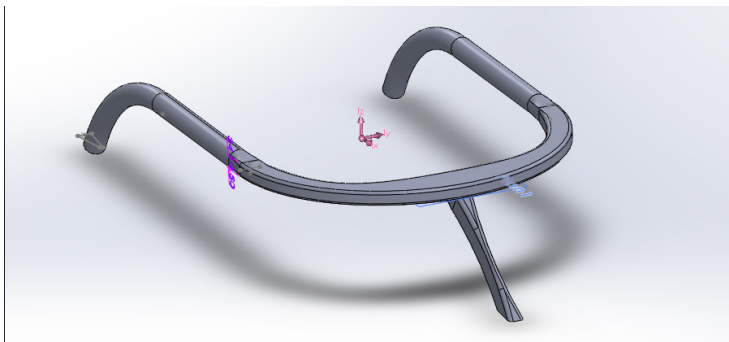


Fig.II.A.2.b Modélisation du halo D sur Solidworks

Pour réduire la masse totale du halo, l'arceau principal a été évidé. Toutefois la masse résultante ($m_D = 21,8 \text{ kg}$), demeure bien trop grande. Cette pièce présentait d'autres défauts : l'arceau principal était trop long et la jonction entre la structure parallélépipédique et le prolongement tubulaire aurait été difficile à réaliser et fragile.

Un nouveau halo, de structure proche de celle au halo B [Fig.II.A.2.b] [Fig.II.A.2.c], mais avec des pieds de section rectangulaire a été modélisé. Afin d'alléger la pièce, l'arceau principal a été évidé. Cela a permis une nette réduction de la masse jusqu'à atteindre $m_E = 8,7 \text{ kg}$.

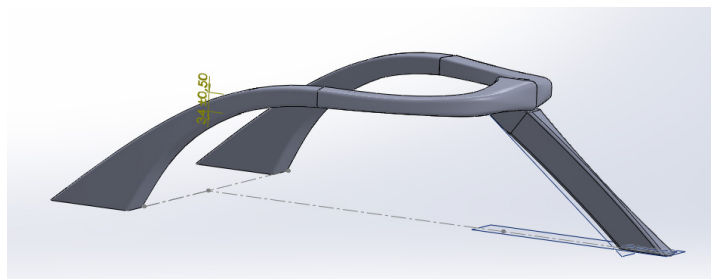
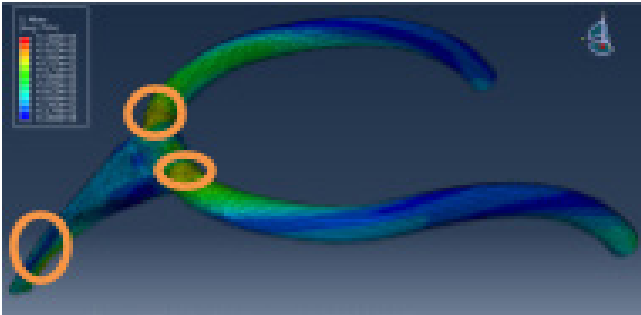


Fig.II.A.2.c Modélisation du halo E sur Solidworks

Cette pièce et le halo A ont été soumis au groupe aérodynamique. Les résultats (voir Aérodynamisme du halo) ont mis en évidence la meilleure performance aérodynamique du halo A, grâce à sa forme plus lisse et la pente plus douce de la transition en V.

Ces résultats ont orienté le dimensionnement d'un nouveau halo, appelé halo F, en s'appliquant à ce qu'il ne présente pas d'angle vif, et dont la jointure entre l'arceau principal et la transition en V soit douce. Pour ce faire, les parties tubulaires ont été fixées sur les côtés de la transition en V, et non plus au-dessus (voir annexe A.6-Le halo F).

La masse de ce halo est de $m_F = 5,5$ kg. Elle vérifie donc les normes imposées par la FIA. Cependant, la modélisation des essais quasi-statiques par le logiciel ABAQUS, révèle des fragilités au niveau de la pointe de la pièce inférieure, ainsi qu'au niveau de la jointure des deux pièces [Fig.II.A.2.d].



Connaissant la position exacte des points de faiblesse de ce halo, un dernier modèle, le halo G, a été proposé en comblant la pointe avec de la matière et en renforçant la jonction entre les 2 pièces (voir annexe A.7- le halo G)

Fig.II.A.2.d Champ de contrainte sur le halo F à l'issue de l'essai 1

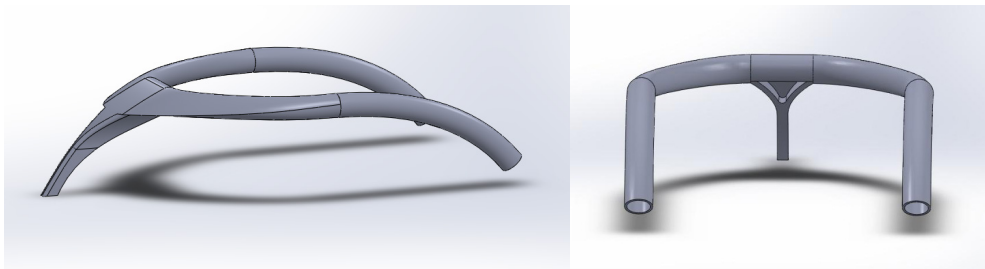


Fig.II.A.2.e Images de la modélisation du halo G sur SolidWorks

Le champ de contraintes à l'issue de la simulation ainsi que les courbes force/déplacement des essais quasi-statiques 1 et 2 attestent de la plus grande résistance du halo G, et sa conformité aux normes de la FIA [Fig.II.A.2.e].

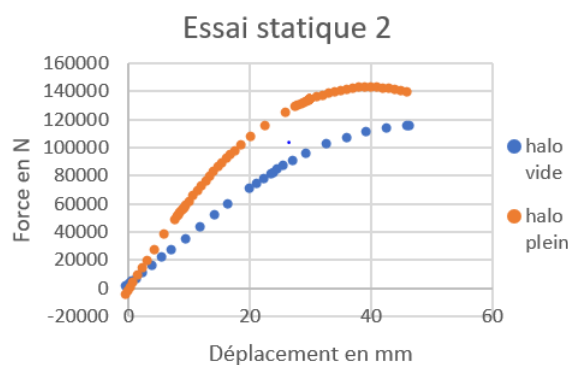


Fig.II.A.2.f Courbe comparant la réponse de halo F et G à l'essai 2

Compte-tenu de sa faible masse $m_G = 6,515$ kg, il apparaît que ce halo est optimal en terme de rapport poids/résistance [Fig.II.A.2.f].

Il reste cependant à vérifier son impact sur l'aérodynamisme de la voiture.

B. Matériaux

Le halo imposé par la FIA doit être réalisé en Titane TA6V1. Pour en concevoir et en dimensionner un qui respecte les critères de résistance, il est nécessaire d'identifier un modèle de comportement de cet alliage. Ce modèle permet alors au groupe qui s'intéresse à la structure de s'assurer que le modèle qu'il propose respecte les contraintes imposées par la FIA.

1. Tests mécaniques et mesure des champs de déformations

Le premier stade du travail consiste à découper des éprouvettes standardisées dans du TA6V. Chaque éprouvette est réalisée en plusieurs exemplaires afin de tester la répétabilité de l'expérience.



Fig.II.B.1.a

Avant l'essai la zone utile de l'éprouvette est recouverte d'un motif de mouchetis [Fig.II.B.1.a]. Ce motif permet au logiciel de traitement d'image VIC 3D de connaître les déplacements locaux et d'en déduire le champ de déformations de l'éprouvette durant l'essai.

La machine de traction utilisée peut exercer un effort allant jusqu'à 30kN. Les essais sont menés jusqu'à rupture de l'éprouvette, la vitesse de déformation globale est la grandeur imposée. Utiliser deux vitesses de déformation différentes permet d'étudier la dépendance mécanique du matériau à la vitesse.

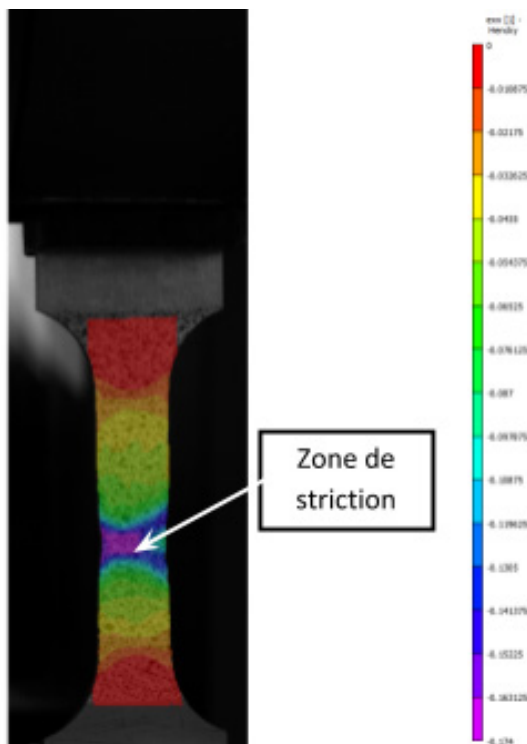


Fig.II.B.1.b

L'essai de traction est filmé par deux caméras calibrées et disposées en stéréo. Les images capturées sont utilisées par le logiciel VIC 3D pour calculer le champ des déformations. Le motif de peinture en mouchetis, avec des points noirs sur fond blanc, de tailles et de formes variées, permet au logiciel de retracer les déformations dans différentes directions.

Il est ensuite possible d'obtenir les déformations locales dans la zone de striction de l'éprouvette [Fig.II.B.1.b], ainsi que son allongement global.

En utilisant les dimensions de l'éprouvette, mesurées avant l'essai, et les déformations, la contrainte vraie à laquelle est soumise l'éprouvette peut être calculée. On obtient par la suite la courbe donnant la loi de comportement expérimentale du titane TA6V, qui est l'évolution de la contrainte vraie en fonction de la déformation longitudinale de l'éprouvette.

2. Identification d'une loi de comportement

La loi de comportement présente deux zones de déformation distinctes [Fig.II.B.2.a].

La première est une zone de déformation élastique, où nous modélisons le comportement du matériau par la loi de Hooke $\sigma = E \cdot \varepsilon$, où E, le module d'Young, vaut 121 000 MPa.

La deuxième est une zone de déformation plastique. Nous la modélisons par une loi de Johnson-Cook prenant en compte la dépendance à la vitesse de déformation :

$$\sigma_{JC} = (A + B \varepsilon^n) \left(1 + C \ln \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right)$$

On cherche à identifier cette loi de comportement en optimisant les paramètres A, B, C, n et pour faire coïncider au mieux la courbe numérique à la courbe expérimentale. On utilise un solveur Excel pour effectuer cette optimisation, ce qui nous permet d'obtenir les valeurs suivantes : A = 979 MPa ; B = 600 MPa ; n = 0,6 ; C = 0,013 et $\varepsilon_0 = 0,013$.

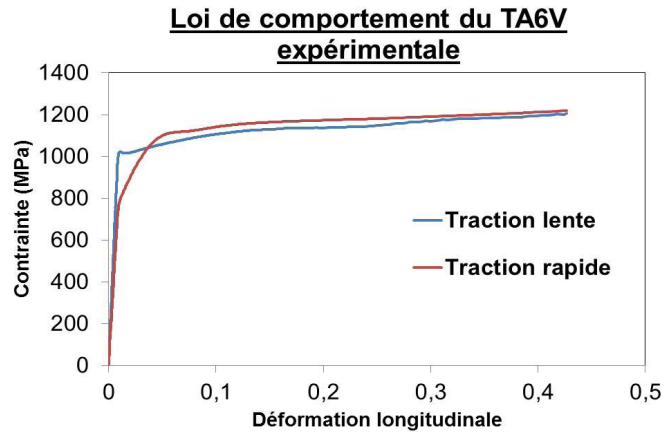


Fig.II.B.2.a

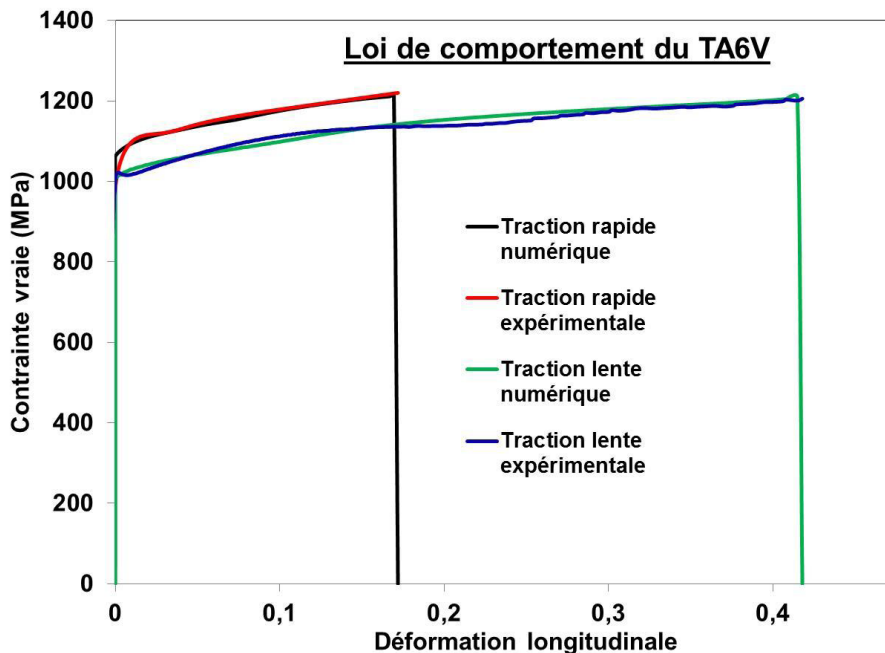


Fig.II.B.2.b

Enfin pour compléter le modèle de comportement du titane il faut donner la valeur de déformation à rupture qui a été étudiée pour différentes formes d'éprouvettes et don différents états de contrainte.

Ce modèle de comportement [Fig.II.B.2.b] est alors utilisé par le groupe structure pour simuler la réaction de leur halo à un effort donné.

3. Validation des paramètres grâce au logiciel Abaqus

Pour s'assurer de la bonne identification des valeurs des paramètres de la loi de Johnson-Cook qui seront transmis au groupe structure-dimensionnement, il est nécessaire d'effectuer une comparaison des résultats expérimentaux de traction sur les éprouvettes à ceux de modélisations sur le logiciel Abaqus. En effet, la loi de Johnson-Cook fait appel aux notions de contraintes et de déformation qui sont définies localement. Il est donc nécessaire de faire le lien entre la validité à l'échelle locale (dans la zone de striction) de cette loi et la cohérence à l'échelle macroscopique des résultats. Pour cela on vérifie tout d'abord qu'au niveau microscopique, cette loi est confirmée sur Abaqus avec la modélisation d'un élément de matière auquel on impose les mêmes conditions qu'au centre de l'éprouvette, dans la zone de striction. Une fois le modèle local validé, on modélise les géométries des éprouvettes sur lesquelles ont été réalisés les essais en traction.

Les quatre géométries des éprouvettes - entaillée, traction simple, centre hole, shear stress - permettent d'évaluer le comportement dans des situations de contraintes différentes. On applique les mêmes conditions de chargement (déplacement en fonction du temps) à la simulation Abaqus que dans le cas expérimental. Après avoir maillé la pièce, c'est-à-dire déterminé la taille des petits éléments qui discrétisent la pièce et sur lesquels Abaqus effectue les calculs, le calcul peut être lancé.

En sortie, Abaqus permet le traitement de nombreuses données telles les valeurs du champ de contraintes ou de déformation sur toute la pièce ou les forces et déplacement en un point particulier.

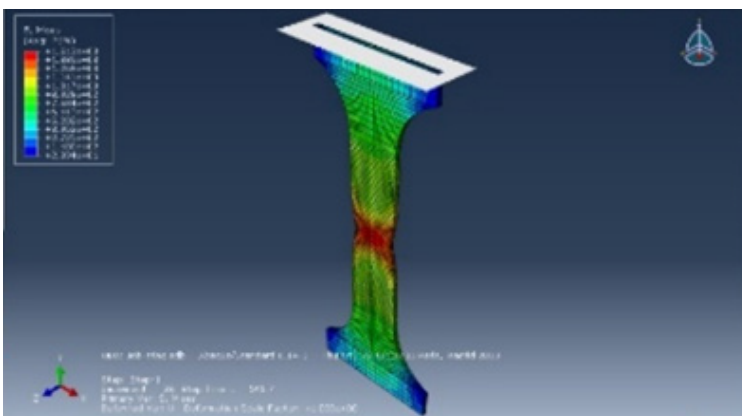


Fig.II.B.3.a Champ de déformation sur l'éprouvette T0 en traction

La comparaison aux résultats expérimentaux permet alors de valider les valeurs de ces paramètres. L'exemple du cas de l'éprouvette plate en traction [Fig. II.B.3.a] nous a permis de valider les valeurs des paramètres de la loi de Johnson-Cook après les avoir optimisés.

On remarque qu'il existe certaines différences dans les courbes [Fig.II.B.3.b] qui sont dues à la simplification du modèle (pas de loi d'endommagement prise en compte) sur Abaqus, ceci fera l'office d'une partie sur les limites du modèle.

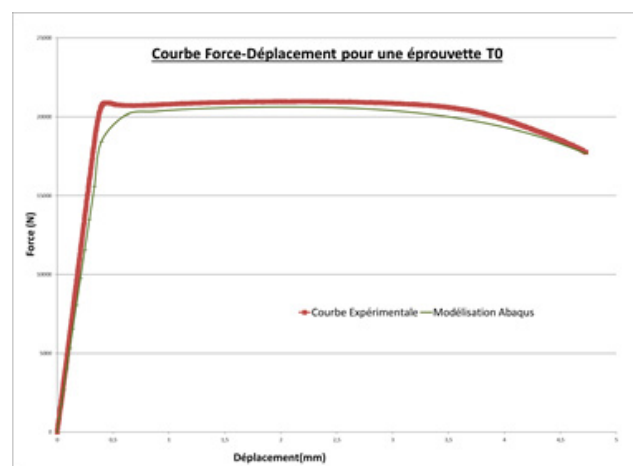


Fig.II.B.3.b

C. Aérodynamisme du halo

L'implantation du halo sur les F1 nécessite une nouvelle étude aérodynamique pour déterminer son impact sur les performances de la F1.

L'étude portera dans un premier temps sur l'influence du halo sur l'écoulement d'air. Pour cela, deux premiers modèles sont fournis par le groupe Dimensionnement et Structure. Le moins pénalisant pour les performances de la F1 sera élu. Dans un deuxième temps, les possibles améliorations du dispositif seront étudiées pour diminuer sa traînée, responsable d'une perte de vitesse. Dans le cadre d'une amélioration optimisée nous avons favorisé les itérations entre les groupes, telle une équipe de R&D travaillant pour une écurie.

1. Déroulement de l'étude

Des souffleries numérique et expérimentale ont permis l'analyse aérodynamique. Les résultats numériques permettent d'étudier l'impact des halos puis d'évaluer les appendices ajoutés pour améliorer les performances. L'étude expérimentale a permis de confirmer ces résultats.

Afin de pouvoir étudier les halos de façon fine et délicate, un modèle simplifié de F1 est utilisé sur lequel il est aisé d'ajouter les halos et leurs appendices.

Principe de fonctionnement de la soufflerie numérique

Le système d'équations régissant l'écoulement du fluide est l'équation de Navier-Stokes incompressible. Ici, on passe par sa version temporelle, dans laquelle une discrétisation du temps est nécessaire. Le système d'équations de Navier-Stokes non stationnaire s'écrit :

$$\rho(\partial_t v + v \cdot \nabla v) - \nabla \sigma = f$$
$$\nabla \cdot v = 0$$

Une méthode par éléments finis multi-échelle implicite est utilisée pour résoudre sur chaque nœuds du maillage ces équations. Elle consiste à modéliser les petites échelles (sous-maillages) et réinjecter leur effet pour enrichir la résolution des grandes échelles (vitesse et pression).

Pour chaque simulation, un maillage couche limite [Fig.II.C.1.a] de nos objets a été réalisé avant d'effectuer la simulation en utilisant les équations de Navier-Stokes.

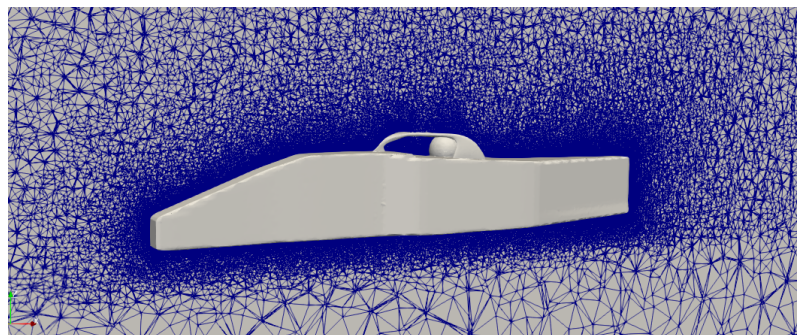


Fig.II.C.1.a Maillage couche limite de la "forme" avec le halo

Principe de fonctionnement de la soufflerie expérimentale

Dans le but de confirmer les résultats des simulations, une soufflerie a été utilisée pour tester des maquettes de Formule 1 imprimées en 3D. La réalisation des expériences s'est

avérée délicate, notamment pour avoir un écoulement incident laminaire, ou pour visualiser ces écoulements au moyen de fumée.

L'objectif est donc :

- d'obtenir un flux d'air propre et une norme de vitesse élevée au niveau de l'entrée d'air du moteur, située juste derrière la tête du pilote [Fig.II.C.1.b].
- de diminuer la traînée du halo. Plus la couche turbulente et lente est fine, mieux c'est.



Fig.II.C.1.b Prise d'air moteur

2. Analyse de l'impact des différents modèles de halo sur l'écoulement

Les premiers calculs ont été lancés sur les deux premiers halos fournis par le groupe Dimensionnement et Structure. Les calculs ont tourné sur le supercalculateur du CEMEF, lui prenant 40 coeurs pendant environ une demi journée pour chaque simulation.

Après avoir choisi le halo A en terme de performance aérodynamique, les conclusions de nos simulations ont été communiquées au groupe Dimensionnement et Structure. Celui-ci a fourni en retour deux nouveaux halos en tenant compte des recommandations aérodynamiques. Leurs performances ont été comparées avec celles du halo A.

3. Améliorations : ajouts d'appendices

Les écuries disposent d'une certaine marge de manoeuvre autour du halo : elles peuvent y fixer des appendices, dans une zone de 2 cm autour de cette structure. Nombreuses sont celles qui, dès les premières courses, ont profité de cette possibilité. En témoignent les images suivantes.

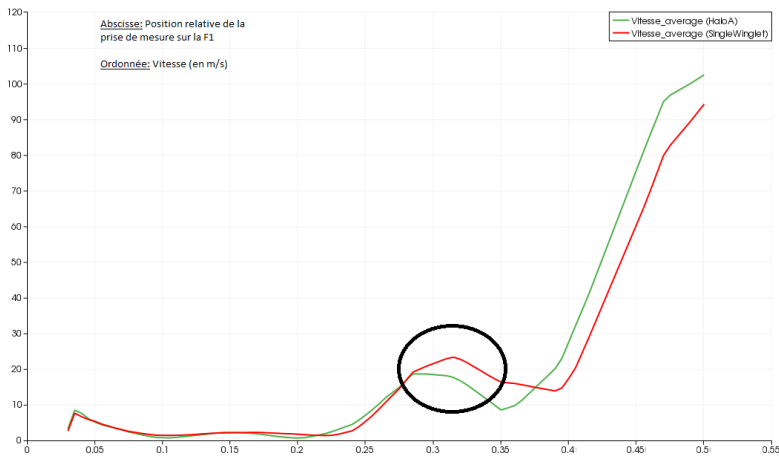


Fig.II.C.3.a De gauche à droite : aileron simple, aileron triple, Générateurs de vortex

Les ajouts aérodynamiques sur le halo, réalisés sur un logiciel de CAO, sont donc inspirés de ces appendices introduits par des écuries [Fig.II.C.3.a]. Ils ont ensuite été testés dans de mêmes configurations pour comparer leurs performances à celles d'un halo nu.

Aileron simple

Les premiers résultats montrent que l'appendice simple ne permet pas de modifier de façon significative la traînée du halo et le flux d'air en aval . En revanche, il contribue à apporter un air plus structuré et à plus grande vitesse [Fig.II.C.3.b] au niveau de la prise d'air.



On remarque qu'au niveau de la position à 0.3 sur le graphique, qui correspond à la prise d'air du moteur, la norme de vitesse est beaucoup plus importante dans le cas du halo avec appendice.

Fig.II.C.3.b Vitesse en fonction de la position

Aileron triple

L'appendice provoque un élargissement de la traînée et repousse les tourbillons plus loin sur les côtés. L'avantage est que l'air propre est repoussé de la voiture. L'inconvénient est que le flux est plus destructuré notamment au niveau de la prise d'air.

Générateur de vortex

L'appendice ajouté vise à créer des petits vortex juste derrière le halo. Il permet de réduire la traînée à l'arrière du halo et à obtenir un flux d'air propre plus rapidement [fig]. En revanche, il contribue aussi à diminuer la vitesse de l'écoulement au niveau de l'entrée d'air [fig], ce qui est un effet indésirable.

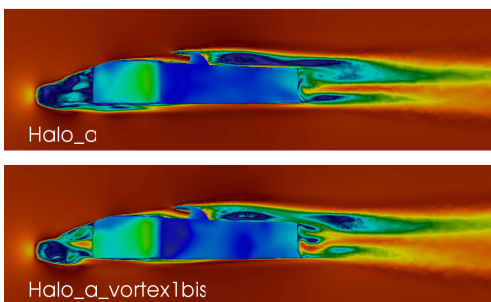
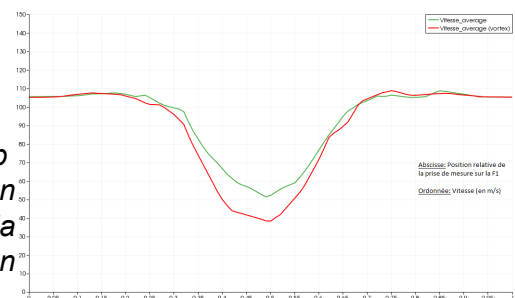


Fig.II.C.4.a Coupe de vitesses

Fig.II.C.4.b Vitesse en fonction de la position



On remarque qu'au milieu de la courbe, on obtient une différence de vitesse de 12m/s (pour un air incident à 100m/s) entre les deux scénarios. Cette position correspond à la prise d'air du moteur.

Les couleurs chaudes correspondent aux vitesses les plus élevées. On remarque ici que la taille de la traînée d'air turbulent qui suit le halo est plus faible dans le deuxième cas, avec l'ajout de l'appendice.

4. Le Choix

Les multiples simulations numériques pour analyser les appendices présentés ci-dessus montrent finalement que chacun possèdent des avantages et des défauts en terme de traînée et de qualité de prise d'air. Le plus efficace pour diminuer la traînée sont les générateurs de vortex. Le plus efficace pour améliorer la prise d'air du moteur est l'aileron simple. Il semblerait donc que l'aileron simple soit le plus adapté. Cependant, une piste d'amélioration des appendices serait de changer les angles d'inclinaison des générateurs de vortex pour influencer sur la structure du flux d'air. Auquel cas, il est peut-être possible d'obtenir un flux d'air plus propre au niveau de l'entrée d'air.

D. Aérodynamisme de la Formule 1

1. Contexte de l'étude

L'étude se porte maintenant sur une voiture de Formule 1 complète : le groupe a relevé le défi de rester fidèle à sa géométrie extrêmement complexe. Une méthode CFD (Computational Fluid Dynamics) novatrice de simulation numérique multi-échelle des écoulements a été utilisée. Le groupe s'est mis dans la peau d'ingénieurs : nous sommes parti d'une forme imposée basique de Formule 1, nous avons étudié le comportement global des flux d'air, puis nous avons cherché à optimiser la voiture selon trois critères qui sont ceux des ingénieurs en Formule 1 :

1- **Générer** un maximum d'**appui** (aussi appelé **déportance**) afin de plaquer la voiture au sol pour aller le plus vite possible en virage.

2- **Minimiser** l'effet de la **traînée** (force qui s'oppose au mouvement de la voiture). Elle dépend de la résistance de la voiture à la pénétration dans l'air.

3- **Refroidir** certaines pièces comme par exemple les disques de frein ou le moteur, et donc s'assurer de la qualité de l'air pénétrant la voiture.

Nous partons d'une Formule 1 basique, et de deux formes basiques de halo pour nos premières simulations [Fig.II.D.1.a].



Fig.II.D.1.a De gauche à droite : F1 basique, halo A, halo B

2. Premières analyses et influence du halo

Nous avons choisi un flux d'air incident s'écoulant à 50 m/s que nous représentons par ses lignes de courant. Nous avons en premier lieu tenter de confirmer ou infirmer le choix de nos camarades quant à l'utilisation du halo A et non du halo B. La vitesse de l'écoulement d'air est visible en chaque point de la ligne de courant par sa couleur.

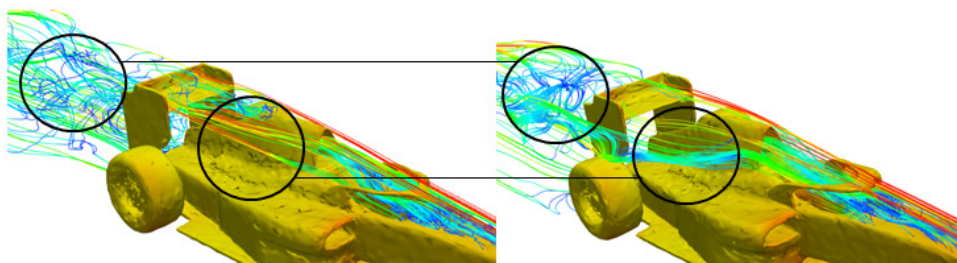
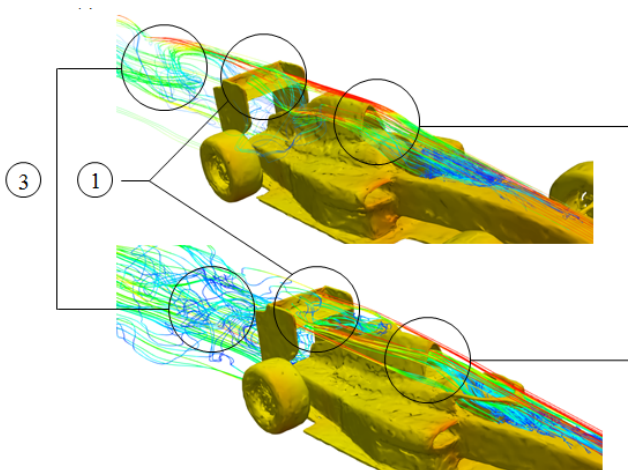


Fig.II.D.2.a A gauche : F1 basique avec halo A; à droite : F1 basique avec halo B

Nous avons noté qu'au premier abord les effets des deux halos semblent similaires: ils ralentissent tous deux l'écoulement et créent des turbulences visibles à l'arrière de la voiture, augmentant la force de traînée [Fig.II.D.2.a]. Néanmoins, le halo A semble moins dévier le flux incident d'air, favorisant la déportance au niveau de l'aileron arrière.



Nous avons ensuite étudié l'impact de la présence d'un halo sur la voiture [Fig.II.D.2.b]. Nous remarquons qu'il réduit l'efficacité de l'aileron arrière (flux d'air incident plus lent et moins important) (1), augmente la quantité d'air ralenti dans l'entrée d'air arrière du moteur (2), et augmente la traînée (3).

Fig.II.D.2.b Comparaison des écoulements

3. Création d'appendices

Nous avons donc cherché à améliorer la Formule 1. Notre démarche est la suivante : après avoir repéré les défauts de la F1 de base, et en nous inspirant des voitures déjà existantes, nous avons dessiné de nouvelles pièces. Nous les avons réalisées sur SolidWorks. Nous avons également intégré le halo amélioré obtenu par nos camarades.

- **Flaps de carénage (latéraux) et flaps avants**



Fig.II.D.3.a Flaps de carénage et flaps avants

Les roues sont sources de grandes pertes d'efficacité aérodynamique pour une monoplace. Elles créent de l'air sale qui est lui-même responsable d'une augmentation de la traînée et qui diminue l'efficacité des autres appendices de la monoplace. Il faut donc conduire l'air au-dessus des roues. C'est le rôle des flaps de carénage et des deux flaps avant [Fig.II.D.3.a]. Dans cette configuration, les supports sont incurvés vers l'intérieur afin de diriger une partie du flux de l'air vers le flap arrière et ainsi maximiser son effet sur la déportance.

- **Défecteurs et appendices avants**

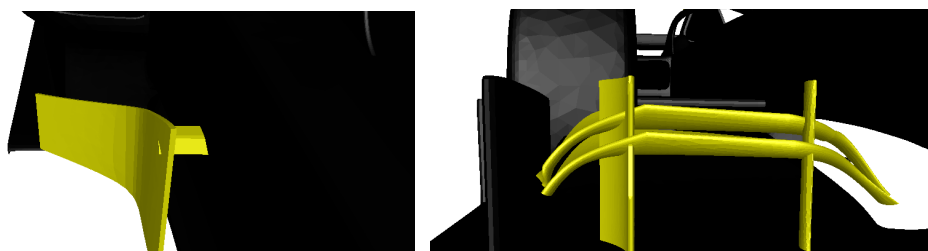


Fig.II.D.3.b Défecteurs et appendices avants

Les appendices sur l'aileron avant ont pour but de générer des vortex afin de chasser l'air sale provenant des roues avant avec l'aide des déflecteurs afin d'envoyer de l'air propre

sur l'arrière de la voiture pour notamment maximiser l'efficacité de l'aileron arrière [Fig. II.D.3.b].

- **Aileron de requin**

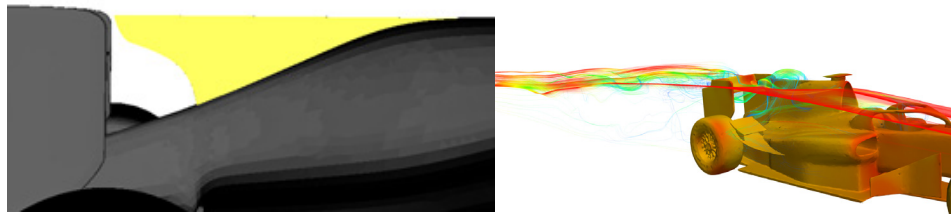


Fig.II.D.3.c Écoulement d'air au niveau de l'aileron de requin

L'aileron de requin a un rôle triple : stabiliser le flux d'air incident, améliorer la répartition de l'appui sur la longueur du capot, stabiliser la voiture en virage. Leur efficacité est compliquée à évaluer ; visuellement, on observe [Fig.II.D.3.c] que l'incurvation de l'aileron permet de rapprocher les tourbillons de la voiture et ainsi la pousser d'avantage.

4. Présentation et analyse des résultats

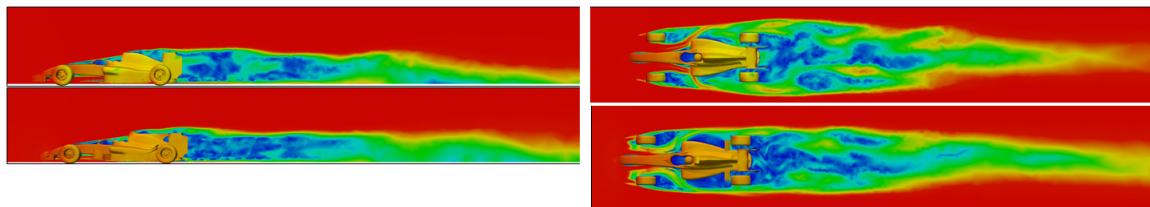


Fig.II.D.4.a Clips sagittale (gauche) et transverse (droite) des écoulements pour la F1 basique (haut) et améliorée (bas)

Nous nous sommes focalisés sur la zone à l'arrière de la voiture (de l'aileron arrière jusqu'à quelques mètres derrière la voiture) car c'est dans cette zone là que la traînée a le plus d'effet. Pour visionner une baisse de traînée il faut regarder : si la zone de vitesse est homogène (unicolore selon l'échelle), car plus elle est homogène moins il y a de différences de pression, donc moins de traînée ; si l'air au niveau du sol derrière la voiture s'écoule à basse (plus l'air y est lent moins il y aura de traînée) ; si le flux d'air derrière la voiture reste collé et stabilisé (forme rectangulaire ou triangulaire de la zone d'air lent derrière la voiture). En regardant les coupes réalisées sur les différentes versions de F1 étudiées [Fig.II.D.4.a] nous avons remarqué que sur les deux voitures améliorée tous ces trois critères étaient réunis.

Ces calculs mettent en évidence que la voiture avec appendices génèrent plus d'appui (moins de portance), et moins de traînée que la voiture de base [Fig. II.D.4.b]. On constate donc que les performances aérodynamiques de la voiture ont été améliorées.

FORCES	VERSION BASIQUE	VERSION AMÉLIORÉE
Portance (kN)	163,93	152,36
Traînée (kN)	754,43	679,52

Fig.II.D.4.b Portance et traînée calculées sur ParaView pour deux modèles de F1

5. Conclusion

Nous sommes partis d'une voiture de Formule 1 basique que nous avons analysé puis amélioré par la création d'appendices. Nous avons également développé un deuxième modèle de F1 améliorée dans l'annexe, qui présente autant d'avantages que d'inconvénients par rapport à celui ci-contre.

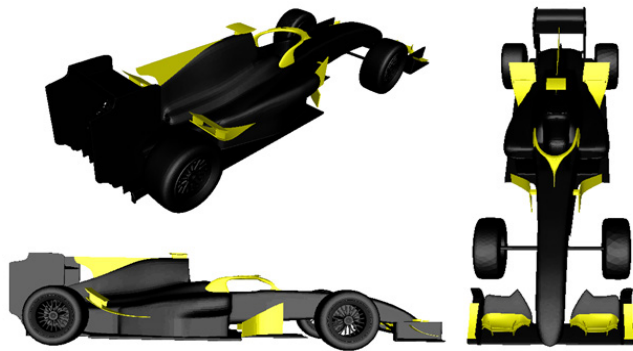


Fig.II.D.5.a F1 améliorée, modèle aileron de requin

E. Les extensions aux projets

[Matériaux] (voir annexe)

L'hypothèse d'isotropie transverse est présente dès l'origine du modèle, elle permet d'obtenir la contrainte à partir de la force et des déformations à tout instant. De plus les essais de traction sont effectués dans la direction du laminage, l'hypothèse d'isotropie du matériau est ici encore utilisée. Cette hypothèse est ensuite utilisée pour calculer, à l'aide du logiciel abaqus, la triaxialité des contraintes. Si ces hypothèses sont trop fortes les simulations du groupe structure seront également directement impactées. Il est donc important de les évaluer pour avoir conscience de l'erreur introduite.

Enfin l'histoire du matériau peut modifier son comportement, une étude de l'influence du traitement thermique sur du titane aux niveaux microscopique et macroscopique permet de comprendre l'importance de l'origine du titane utilisé.

[Dimensionnement]

Au cours des 3 semaines de projet il a été possible de proposer une nouvelle forme de halo répondant au cahier des charges de la FIA. Cependant, par manque de temps, certaines études n'ont pas pu aboutir ou n'ont tout simplement pas été menées. Une étude d'optimisation paramétrique a été commencée. L'influence de l'angle d'inclinaison du pylône central, de sa taille, de son épaisseur ou encore de sa forme cylindrique ou parallélépipédique a été étudiée. Elle a permis de mettre en évidence qu'une structure parallélépipédique offre une meilleure rigidité aux compressions plutôt qu'une forme cylindrique, et qu'un fort angle d'inclinaison offre une plus grande solidité. Cependant, cette étude n'a pas été aboutie par manque de temps, et la recherche de l'influence d'autres paramètres, tels que le diamètre des arceaux, leur épaisseur, l'aspect courbé ou droit du pylône central, la forme et la taille des fixations des arceaux pourraient permettre une nette amélioration du halo, en l'allégeant encore davantage par exemple. De plus, les temps de calculs élevés ont limité les échanges avec le groupe aérodynamisme. En effet, dans le but de fournir une pièce aussi exigeante que le halo, des interactions avec différents groupes sont nécessaires. Si les différents halos fournis ont vu leur capacité à résister aux contraintes s'améliorer, l'amélioration de leur aérodynamisme n'a pas été assez développée, et nécessiterait du temps supplémentaire afin de permettre des échanges plus nombreux avec le groupe aérodynamisme. Enfin, notre étude présente quelques limites. Il conviendrait de s'intéresser aux procédés de mise en forme du halo (usinage, soudure, traitement thermique) afin de s'assurer que la pièce proposée soit concevable d'un point de vue technique, mais aussi qu'elle puisse être proposée à des prix raisonnables, sans oublier que les pièces de jonction en composite

entre le halo et la structure sont particulièrement complexe à analyser et leur étude ne pouvait pas entrer dans le cadre du .

[Aéro halo]

L'intérêt des simulations numériques réalisées sur les différents halos et leurs potentiels appendices est d'effectuer un pré-design. En effet, les maillages utilisés ne sont pas suffisants pour pouvoir effectuer une étude quantitative. En revanche, ces simulations sont utiles pour s'orienter vers des types de formes aérodynamiques.

Une possible amélioration est donc d'affiner le maillage, une fois les formes sélectionnées, afin d'affiner leur profil et améliorer les performances. Par exemple, pour pouvoir étudier de façon plus précise l'impact de l'inclinaison des différents générateurs de vortex, il faut utiliser un maillage bien plus précis. La taille de maille doit être très inférieure à l'écart entre ces générateurs. Dans les études réalisées, celle-ci était du même ordre de grandeur, pour des raisons pratiques en terme de puissance de calcul.

Au-delà du maillage à affiner pour étudier de façon plus précise les appendices, notamment le halo, une piste d'amélioration est de jouer sur l'état de surface des pièces. Il pourrait être judicieux d'étudier un revêtement de type "peau de crocodile" ou "balle de golf". Dans ces simulations, les aspects de surface n'ont pas été pris en compte puisque l'objectif était de comparer des formes de halos et d'appendices.

Finalement, une dernière piste d'amélioration est d'effectuer une étude prédictive sur les halos. L'objectif serait d'obtenir, par simulation numérique, les emplacements à modifier sur les halos pour pouvoir améliorer son aérodynamisme. En procédant de manière itérative, une nouvelle forme de halo pourrait alors être obtenue.

[Aéro F1]

Étant limités par le temps nous n'avons pas pu explorer tous les problèmes aérodynamiques que présentait notre modèle de Formule 1 dit "basique". En effet nous avons pu remarquer qu'elle avait de problèmes assez clairs au niveau de l'air turbulent généré par les roues avant ainsi que par le halo. De ce fait nous avons pu concevoir des appendices aérodynamiques qui modifient la trajectoire de l'air propre (laminé) en avant de la voiture pour réduire voir même exploiter ces problèmes.

Ce que l'on aurait aimé faire cependant aurait été de mieux comprendre les effets exacts d'une appendices aérodynamique non au niveau local mais plutôt au niveau global de l'aérodynamisme de la voiture. Nous aurions de même apprécié un peu plus de temps pour mener à bout une dernière étude en soufflerie numérique sur deux voitures, l'une en train de doubler l'autre. En effet nous aurions alors pu étudier plus en détail l'effet d'aspiration ainsi que les désavantages et effets aérodynamiques de suivre une F1 en pleine course. Finalement, nous aurions aussi aimé travailler un peu plus sur la conception d'appendices aérodynamiques. Car même si nous en avons conçu et testé 6, nous aurions pu les adapter et développer avec plus de temps, tout comme le font les ingénieurs chargés de l'aérodynamisme en Formule 1.

Il est aussi intéressant de rajouter qu'avec plus de temps nous aurions pu aller plus loin dans les calculs de simulations: nous aurions pu tester une soufflerie à d'autres vitesses que 50 m/s, avec de différentes précisions. Ceci nous aurait permis d'avoir des résultats adaptés à de différentes situations. Nous aurions aussi sur ce point là aimé profiter d'autres tests en soufflerie réelle sur une voiture de Formule 1 avec les appendices ajoutés, car ceci aurait pu confirmer nos résultats numériques.

III. Avenir de la Formule 1

Maintenant que nous avons abordé de façon générale et plus approfondie le fonctionnement de l'univers de la Formule 1 ainsi que quelques unes de ses caractéristiques techniques, nous pouvons questionner son avenir. Plusieurs axes émergent dans cette réflexion :

- Formule E : impact social, économique, écologique...
- Projets de la FIA : smart cities, réglementation autour de l'empreinte carbone du sport...
- Public : vers une refonte ? Nouveaux protagonistes ? Extension du marché ?
- Place de l'économie : les considérations financières auront-elles le dernier mot sur la prochaine décennie ?

A. La Formule E

1. Performances

Il est avant tout utile de revenir sur les performances de la Formule E en comparaison avec celles de la Formule 1 :

- Vitesse de pointe : 225 km/h pour la Formule E contre 370 pour la Formule 1. L'écart reste aujourd'hui très conséquent mais la Formule E n'a pas véritablement la même vocation que sa cousine.
- les courses ne durent qu'une cinquantaine de minutes dans les ePrix contre une moyenne de 1h45min pour les grands prix classiques. D'ailleurs, les batteries des Formule E ne tiennent aujourd'hui pas l'ensemble de la course : les pilotes sont contraints de changer de monoplace en milieu de course. Néanmoins, « Nous voulons doubler l'autonomie des batteries d'ici trois ans » assure Alain Prost (2016), ce qui aura pour conséquence de supprimer ce passage au stand. D'ailleurs, la batterie est le point central de la monoplace. Leur puissance est de 28 kW, soit 5 300 batteries d'iPhone ou 600 batteries d'ordinateurs portables !
- une monoplace de Formule E dispose d'une aérodynamique assez simple : «Elle développe assez peu d'appui. On se sert des ailerons, essentiellement du braquage de l'aileron avant, ainsi que de l'attitude de plongée du bolide pour équilibrer la voiture» disait Alain Prost. Pour une Formule 1 en revanche, les appendices aérodynamiques sont légion et augmentent considérablement les performances du véhicule.

Par ailleurs, pour Olivier Vialle, directeur marketing compétition chez Michelin, les Formule E gagnent énormément en performance sur la saison à venir : elles seront beaucoup plus puissantes et spectaculaires que l'année précédente. En outre, les batteries seront, pour cette saison, capables de tenir l'ensemble de la course, ce qui évitera aux pilotes de changer de monoplace au milieu de la course.

2. Considérations écologiques

Évidemment, le rôle premier de la Formule E est de créer une alternative verte à la Formule 1 qui est, comme nous l'avons vu dans la première partie, très lourde en terme d'empreinte carbone. Ainsi, celle-ci évite tout d'abord les quelques dizaines de milliers de tonnes de CO2 rejetées dans l'atmosphère dues à la consommation des véhicules en essence. Bien sûr, cela est valable tant que l'énergie utilisée pour recharger les batteries est verte, ce qui est le cas jusqu'à présent, d'après Olivier Vialle.

Mais, outre ce gain, on peut aussi soulever tous les efforts annexes qui sont réalisés pour limiter ce bilan carbone : les pneus sont par exemple usinés de façon à ce qu'ils tiennent sur l'ensemble de la course, ce qui n'est pas le cas en Formule 1, et en matière 100% recyclée d'après les promesses de Michelin. Par ailleurs, les critiques émises par les écologistes à Anne Hidalgo lors de la participation de Paris au ePrix ont soumis un certain nombre de points en faveur d'une limitation des émissions dues à cet événement : transport du bitume par canaux sur la Seine, ce qui a évité près de 200 trajets de poids lourds, réutilisation de ce bitume temporaire après la course, garantie d'une énergie issue de sources renouvelables. De même les camions de transport utilisés sont, tant que faire se peut, électriques.

Ainsi, il est clair que la Formule E est le domaine d'optimisation par excellence des processus et des technologies afin de réduire du mieux possible l'empreinte carbone d'un sport qui va à l'encontre, bien souvent, des considérations écologiques.

3. Impact social

Selon Olivier Vialle, la Formule E attire un nouveau public, souvent plus jeune et soucieux de l'environnement, qui peut voir en cette discipline naissante une vitrine pour les voitures électriques. Quoi de plus convaincant en effet que de montrer des véhicules extrêmement poussés en terme de technologie pour ce qui est des sceptiques de la voiture électrique. En effet, l'arrivée de Nissan en Formule E lui donne accès à des fans bien plus jeunes qu'en Formule 1 ou dans d'autres championnats majeurs, estime Michael Carcamo, directeur compétition de la marque. Par ailleurs, la Formule E regroupe le plus gros nombre de constructeurs jamais vu dans une discipline, et a su relever les défis inhérents au lancement de ce type de championnat. Si cette catégorie était critiquée et vue comme une folie de la part de nombreux acteurs, le challenge a été relevé et elle semble aujourd'hui sur une bonne voie pour les prochaines années. Il est difficile de dire de manière certaine si elle peut constituer à elle seule l'avenir de la Formule 1, qu'elle ne remplacera sûrement jamais, mais elle peut contribuer à une mobilité plus verte dans le futur.

Afin d'attirer ce public naissant, les organisateurs des championnats ne lésinent pas sur les moyens employés :

- les téléspectateurs font aujourd'hui partie de la course grâce au concept de vote qui permet aux trois voitures phares de la course, élues par les auditeurs, de récupérer un boost (surplus d'énergie de 40 chevaux) utilisable sur la deuxième partie de la course.
- pour une expérience encore plus immersive, une start-up de réalité virtuelle, Virtually Live, a même lancé un projet consistant à capter un certain nombre d'information en live sur la cabine pour les retransmettre directement aux téléspectateurs qui, grâce à un casque de réalité virtuelle, se retrouvent dans la peau du pilote.

Enfin, les organisateurs cherchent aussi à étendre la discipline à une autre catégorie de véhicule, celle des voitures autonomes. Ainsi, dès 2019, chaque course de Formule E sera précédée d'une course de voiture sans pilote ! Des ingénieurs inséreront un algorithme dans chaque machine afin qu'elles soient les plus rapides et les plus « intelligentes » dans le peloton. Alors que Roborace est déjà décriée ou moquée par certains fans de sport automobile, son concepteur espère que des entreprises de hautes technologies rejoignent le projet en sponsorisant une écurie. Première course prévue l'an prochain à Pékin.

B. Ouverture vers l'avenir de l'automobile

1. Une fenêtre sur la Formule 1

a. La Formule 1, un modèle d'innovation

La Formule 1 est un domaine d'innovation permanente, où les attentes sont sans cesse renouvelées, les avancées technologiques mises à bas, les règles changées. Par ailleurs, le timing est très resserré : tous les ans, une nouvelle voiture présentant l'ensemble des caractéristiques imposées et faisant preuve de performance toujours meilleure doit voir le jour. De ce fait, les ingénieurs dans ce domaine, ainsi que l'ensemble de la main d'oeuvre employée, sont organisés de telle sorte à ce que leur travail donne jour à un bijou de créativité tous les ans. Cette organisation du travail est un modèle étudié aussi bien dans l'industrie que dans certaines universités. A titre d'exemple, le Massachusetts Institute of Technology (MIT) a lancé avec la FIA un programme de management intitulé "F1 Extreme Innovation Series". Ensemble, ces deux institutions tentent de cerner ce qui fait de la Formule 1 une intersection fructueuse entre technologie et management.

Selon eux, tout l'enjeu est dans la mise en contact des différents acteurs, afin qu'une circulation efficace des informations se mette en place. A cet effet, les équipes de Formule 1 créent un conflit entre les équipes afin de booster l'innovation : "We've got every kind of geek that you can possibly imagine. You've got to bring all of them together and create this positive conflict, so we're getting the best out of those people" déclare Rob Smedley, directeur des performances véhicule dans l'équipe de Formule 1 de l'écurie Williams. En ce sens, la FIA a un rôle clé dans l'innovation, en fournissant des défis techniques d'année en année aux ingénieurs des écuries, bien souvent perçues par ceux-ci comme un jeu dans lequel ils doivent outrepasser les règles dictées par la FIA pour apporter des résultats toujours meilleurs malgré les limitations. Pourtant, Smedley concède "You bring all of those ideas, all that diversity, and it adds to the inefficiency. But what you end up with is a much more defined and perfected product.". Ce qui pourrait à priori sembler comme un manque d'efficacité peut finalement se révéler, d'après l'exemple de la Formule 1, comme un modèle laissant place à une innovation dont le timing est impressionnant.

b. Passage à l'électrique

On entend parler depuis 2014 des nouveaux moteurs hybrides V6 imposés aux constructeurs, l'évolution logique serait dans un avenir proche de passer au Full Electric. Quelques problèmes se dressent cependant devant la grande transition : des technologies moins puissantes, un bruit moins grave et des batteries lourdes avec lesquelles on ne peut pas "faire le plein".

La FIA fait attention à l'image dégagée par le sport automobile et les contraintes à buts écologiques sont un vernis protecteur assez efficace devant le grand public, un vernis qui cependant s'écaille au moindre gémissement des écuries les moins fortes qui n'ont pas la maîtrise de la technologie demandée. La législation actuelle est gelée jusqu'en 2020, la FIA discute d'une solution pour équilibrer le niveau entre les équipes.

Passer à l'électrique c'est perdre en vitesse, notamment à cause du poids des batteries. Lorsque l'on voit ce que les ingénieurs de F1 arrivent à faire malgré les contraintes de la FIA, il ne serait pas surprenant de les voir récupérer la puissance perdue en quittant le V6 en quelques saisons. Une avancée de taille pour l'industrie de série par la suite.

Passer à l'électrique c'est oublier le bruit caractéristique de la F1. Il est vrai qu'en Formule E le bruit est très différent de celui de la F1. Cependant, comme pour les Harley Davidson ou les prochaines voitures électriques de série, le son pourrait devenir artificiel, créé de toute pièce.

Passer à l'électrique c'est perdre le public, et l'essence du sport qui faisait son succès jusqu'à maintenant. Il est vrai qu'une partie du public se perdra presque avec certitude, mais sur une certaine durée il est possible de recréer une audience comme le fait la Formule E qui semble avoir accès à un marché plus proche des familles et des jeunes générations.

c. Une transition frileuse

Comme dans tout business, un changement de produit trop radical n'est pas envisageable. Lorsque Liberty Media regarde ses chiffres, il n'y a aucune raison de vouloir changer la recette, et que ce soit du côté du public ou des constructeurs, aucun ne fera pression sur la FIA pour modifier encore les règles de la Formule 1. Les enjeux d'un avenir viable pour les générations futures ont la vie dure face aux plaisirs actuels offerts par le sport automobile. On en revient à une culture particulière de la voiture et de la motorisation.

De plus, le championnat de Formule E est si "beau" écologiquement parlant que cela rend presque la FIA intouchable et pardonne le peu d'efforts de la Formule 1 où les pneus sont jetables et les rejets de CO2 sont peu contrôlés.

2. Les transferts dans la Formule 1

Comme nous l'a confirmé Olivier Vialle lors de notre entretien [Annexe E.3], les sports mécaniques sont souvent utilisés par les constructeurs comme des laboratoires aux exigences et aux budgets hors du commun. Il est cependant de moins en moins utile de tester sur les pistes ce que les ingénieurs savent modéliser et simuler, tout dépend de la complexité du système. Lorsque l'on se penche sur la Formule 1 par exemple, le principal de la R&D tourne autour de l'aérodynamisme, une technologie spécifique à ce sport. En revanche, les pistes du Mans sont parfaites pour tester des moteurs plus petits pour moto, et respectant les nouvelles considérations environnementales. Ci-dessous des exemples de transferts de connaissances et de technologies :

Milieu	Exemple
Aéronautique	<p>Boeing et Renault Sport ont travaillé main dans la main : utilisation du site Renault comme labo, puissance de calcul, collaboration sur sujets de recherche (impression 3D)...</p> <p>Développement d'une impression isotrope avec brevet à la clé pour Boeing (Renault Sport n'avait pas le temps pour ça).</p>
Civil (véhicule de série)	<ul style="list-style-type: none"> • KERS : kinetic energy recovery system • Infinity, moteurs hybrides très performants • Pneus Michelin développé pour la Formule E, équipent les Zoé, modèles Pilot Sport 4 et Cross Climate • De nouvelles boîtes de vitesse • Des employés de Renault passent du sportif au civil et emportent avec eux leur expertise et leurs contacts dans les équipes innovantes de Renault Sport.
R&D	<p>Pour des modèles innovants comme la Twizy la méthode agile est très efficace, une méthode apportée par Renault Sport.</p>
Synergie des équipes	<p>Au sein de Renault Sport, comme évoqué juste au-dessus, la méthode agile est appliquée pour le développement de chaque recoin du véhicule. Il s'agit alors d'échanger un maximum entre les équipes pour ne pas perdre de vue l'objectif.</p> <p>De la même manière dans le MIG les groupes se sont alimentés en données de tous côtés, un groupe avait souvent autant à donner à son prochain qu'à apprendre de celui-ci puisque pour des raisons de temps chaque équipe s'est mise à travailler en même temps.</p>

3. Le marché de demain

S'inscrivant dans un modèle de développement durable et cherchant tant qu'à faire se peut de développer une "image verte", la FIA soutient depuis 2017 un certain nombre de projets de "smart cities" à travers son évènement FIA Smart Cities Forum, et a même créé

un label, FIA Smart Cities Award, qui récompense le meilleur projet et le finance de façon conséquente.

Par ce biais, la FIA tente de développer les solutions de demain pour le transport en milieu urbain principalement, les villes étant aujourd'hui engorgées, la pollution et les dangers de la route accrus. Ce programme, géré par la plateforme Formule E, organise ses événements dans les villes hôtes des ePrix, c'est-à-dire en 2017 Montréal, Mexico, Berlin et Paris, où ils étaient axés sur diverses problématiques comme par exemple la mise en valeur de la sécurité dans les villes intelligentes.

A titre d'exemple, en 2018, certains des vainqueurs du concours de Start-up en faveur de la mobilité urbaine sont :

- Kappo à Santiago qui permet au gouvernement de cerner les besoins des cyclistes dans les villes.
- Scuter à Rome qui met à disposition des scooter électriques en ville.

A terme, on peut imaginer, surtout en rapport avec les projets de la Formule E, un support accru de la FIA pour les voitures autonomes. On parle même de flottes de ces dites voitures, qui permettrait aux particuliers de s'affranchir de leur véhicules et de n'acheter plus que des kilomètres...

Peut-être la Formule 1 contribuera-t-elle donc à une reconfiguration des moyens de transport dans le futur ?

Sources :

www.formula1.com

www.auto-moto.com

www.gpfrance.com

wikipédia

www.consoglobe.com

Ouest France

Annexes E.

IV. ANNEXE

A. Dimensionnement et structure

1. Annexe 1 – Normes de la FIA

Suite à de nombreux accidents, la Fédération Internationale de l'Automobile (F.I.A.) a imposé l'ajout d'une pièce de sécurité le halo. Fixé au-dessus de la tête du pilote, il doit le protéger d'éventuelles projections. Pour cela il répond à un cahier des charges qui garantit sa résistance à des chocs violents. Ainsi, le halo doit résister à des efforts de compression, de flexion et de cisaillement. Il doit présenter une résistance mécanique importante et une forte ténacité. Pour le garantir la FIA réalise 2 essais. La pièce obtient la certification de la FIA si elle :

- Résiste à une contrainte verticale de 125 kN sans rupture et qui ne déforme pas la pièce de plus de 17,5 mm (essai quasi-statique 1).



Fig.IV.A.1.a Photo du dispositif de l'essai quasi-statique 1

- Résiste à une contrainte latérale de 125 kN sans rupture et qui engendre une déflexion de la pièce de moins de 45 mm (essai quasi-statique 2).



Fig.IV.A.1.b Photo du dispositif de l'essai quasi-statique 2

La résistance de la pièce est assurée d'une part par sa structure, d'autre part par le choix d'un matériau adapté. Dans le cas du halo, le matériau est imposé par la FIA. Il s'agit de l'alliage de titane TA6V.

Pour ne pas trop impacter la structure globale de la Formule 1, ni augmenter le besoin de carburant, le halo ne doit pas peser plus de 7kg. (Fig.IV.A.1.c)

4. EXIGENCES DE CONCEPTION

La FIA se réserve le droit de refuser l'homologation si la conception et la fonction ne sont pas jugées acceptables.

Le système de PFA est réalisé par le fabricant conformément aux critères suivants :

4.1 Géométrie

Le fabricant doit réaliser le système de PFA conformément aux dimensions et tolérances définies dans les Informations techniques supplémentaires.

4.2 Matériau

L'assemblage complet du système de PFA doit être produit en alliage de titane Ti6Al4V Grade 5, avec les traitements de matériaux appropriés tels que spécifiés dans les Informations techniques supplémentaires.

4.3 Poids

Le poids de l'assemblage complet du système de PFA doit être de 7,0 kg +0,05kg, -0,15kg.

4. DESIGN REQUIREMENTS

The FIA reserves the right to refuse the homologation if the design and function are deemed unacceptable.

The AFP shall be produced by the manufacturer in accordance with the following criteria:

4.1 Geometry

The manufacturer must produce the AFP in compliance with the dimensions and tolerances defined in the Supplementary Technical Information.

4.2 Material

The full AFP assembly must be produced in Titanium Alloy Ti6Al4V Grade 5, with the relevant material treatments as specified in the Supplementary Technical Information.

4.3 Weight

The weight of the full AFP assembly must be 7.0kg +0.05kg, -0.15kg.

Fig.IV.A.1.c Extrait du règlement 2018 de la FIA au sujet du halo

Afin de concevoir précisément les différentes parties du halo, la FIA les a nommées comme suit :

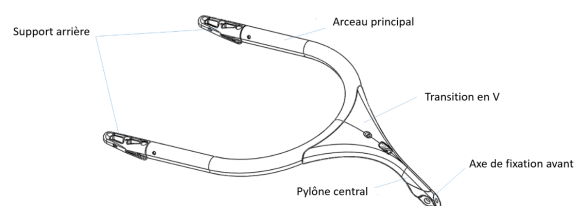


Fig.IV.A.1.d Références aux définitions du système de halo

- Arceau principal : Tube en forme de C auquel les supports arrière et la transition en V sont reliés.
- Support arrière : Supports à chaque extrémité de l'arceau principal utilisés pour relier la structure aux ancrages voitures de chaque côté de l'habitacle du pilote.
- Transition en V : Section entre l'arceau principal et le pylône central.
- Pylône central : Section avant en avant de la transition en V reliée au support voiture avant.
- Axe de fixation avant : Liaison reliant le pylône central au support avant.
- Support avant : Support utilisé pour relier la structure à l'ancrage voiture devant l'habitacle du pilote.

On cherche à présent à proposer une structure de halo plus performante. Une pièce est d'autant plus performante qu'elle résiste à une contrainte élevée malgré une masse faible. Par exemple, pour un cylindre de masse m soumis à une force F , on introduit les équations:

$$m = \rho \cdot S \cdot L$$

$$F = \sigma \cdot S$$

où σ est appelée contrainte.

Sachant qu'il n'y a pas rupture tant que:

$$\sigma \leq f$$

où f est la contrainte à rupture du matériau

donc tant que:

$$m \geq F \cdot L \cdot \frac{\rho}{\sigma_f}$$

On peut introduire l'indice de performance :

$$M = \frac{1}{m} \sim \frac{\sigma_f}{\rho}$$

La performance d'une pièce peut donc être mesurée par la grandeur M que l'on nomme indice de performance et qui est fonction de :

$$M = f(\text{force subie}) * f(\text{dimensions}) * f(\text{matériau})$$

La FIA impose la force à laquelle le halo doit résister. Les paramètres à déterminer pour optimiser le halo sont donc le matériau et la structure. En outre, il convient de réfléchir à l'aérodynamisme de cette structure, en plus de sa résistance.

2. Annexe 2 – Choix des matériaux

Dans un premier temps, il est donc nécessaire de choisir un matériau adapté aux contraintes que va subir le halo.

On dresse le cahier des charges auquel doit répondre le matériau. Il doit :

- Etre rigide (stiff), c'est-à-dire avoir un module d'Young E suffisamment élevé
- Etre résistant (strong), c'est-à-dire avoir une limite élastique et une contrainte à rupture élevée σ
- Etre tenace (tough), c'est-à-dire avoir une résistance à la propagation de fissure élevée

Ces exigences sont les mêmes que celles qui existent dans l'aéronautique pour les ailes d'un avion. Les termes exposés ci-dessus sont illustrés par la Fig.IV.A.2.a.

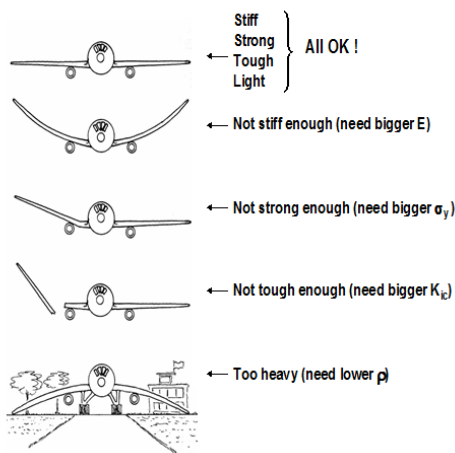


Fig.IV.A.2.a Schéma illustrant les propriétés mécaniques d'un matériau

En F1, le poids est une contrainte majeure, on pondère donc ces grandeurs par la masse volumique du matériau. Sur des graphiques répertoriant les propriétés des matériaux, on trace la droite $\frac{E}{\rho} = 0,2$, valeur seuil que l'on a fixé. Seuls les matériaux situés au-dessus de cette droite sont retenus.

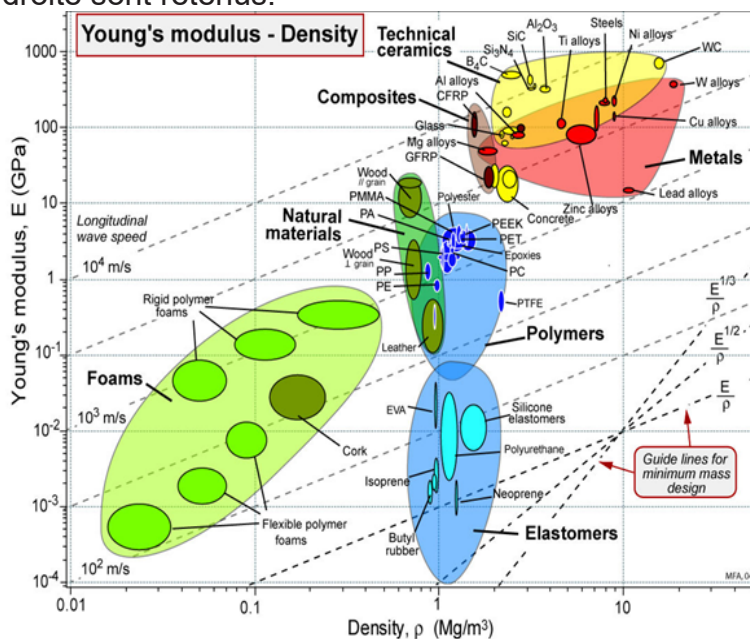


Fig.IV.A.2.b Diagramme représentant le module d'Young de différents matériaux en fonction de leur densité

L'étude de l'élasticité des matériaux invite à s'intéresser à certains métaux, aux céramiques et aux composites. Les composites sont écartés pour le moment : d'une part à cause de la difficulté à les mettre en forme, d'autre part à cause de la dangerosité des fibres. Très coupantes, elles sont un danger pour le pilote si elles sont à découvert, ce qui peut arriver en cas de rupture de la pièce. Les céramiques quant à elles sont éliminées car leur ténacité est extrêmement faible.

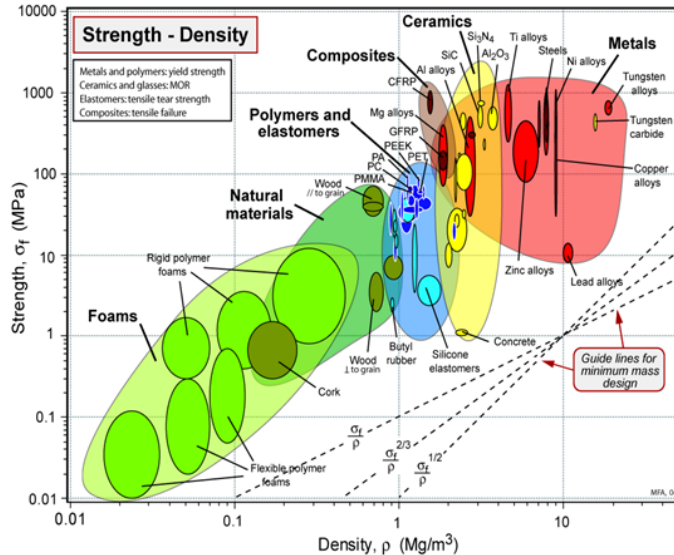


Fig.IV.A.2.c Comparaison de la contrainte à rupture de matériaux en fonction de leur densité
Du point de vue de la résistance, les métaux, notamment les alliages de titane, d'aluminium et de magnésium paraissent intéressants.

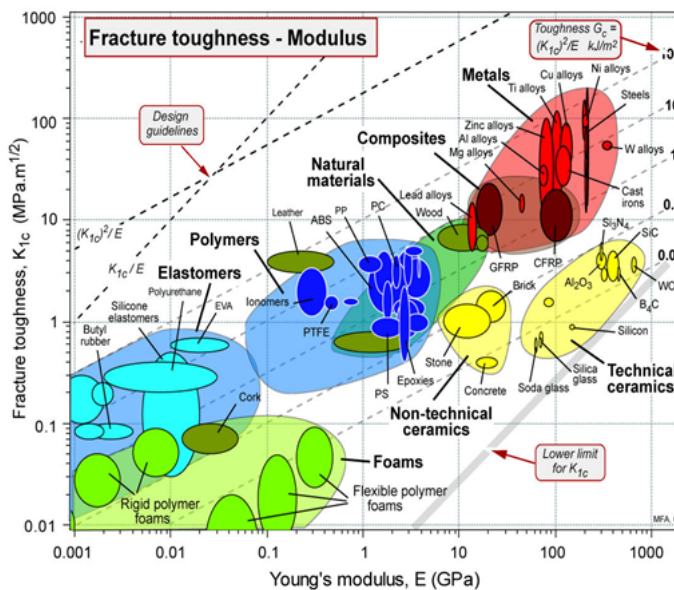


Fig.IV.A.2.d Comparaison de la ténacité des matériaux en fonction de leur module d'Young
L'étude de la ténacité permet encore une fois de dégager le titane comme un matériau intéressant. On observe toutefois que la gamme de valeurs de ténacité du titane est très étendue. Ces écarts peuvent être attribués à la variation de la microstructure et donc des propriétés du titane en fonction des traitements qu'il subit. (cf Annexe Influence du traitement thermique)

En croisant l'étude de ces courbes, il semble que l'aluminium et le titane se distinguent comme des matériaux vérifiant les exigences de résistance et de rigidité. En outre, le titane,

préconisé par la FIA présente une ténacité élevée. L'aluminium, quant à lui, présente des propriétés mécaniques inférieures à celles du titane mais une densité près de 3 fois plus faible.

A partir des lois de comportement de la littérature, des tests comparatifs ont été réalisés sur une structure de halo. Pour ce qui est de l'aluminium, on choisit l'alliage 7075, utilisé dans l'aéronautique. Tout autre paramètre étant identique par ailleurs, ils ont mis en évidence la plus grande résistance du titane.

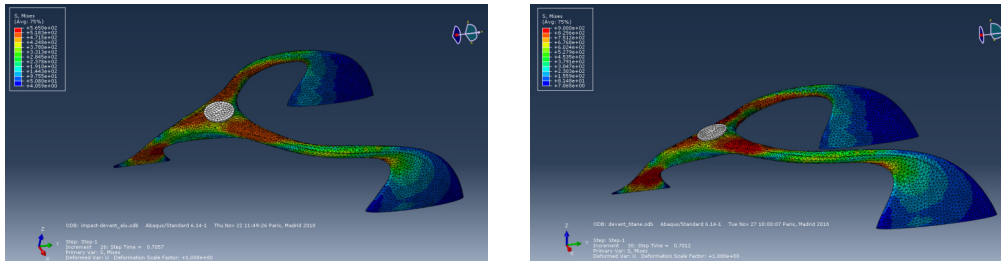


Fig.IV.A.2.e Champ de contrainte du halo A après la simulation de l'essai quasi-statique 1 pour du titane à gauche, de l'aluminium à droite

Si les zones déformées sont rigoureusement les mêmes, pour une même force appliquée l'aluminium est nettement plus déformé que le titane (moindre résistance).

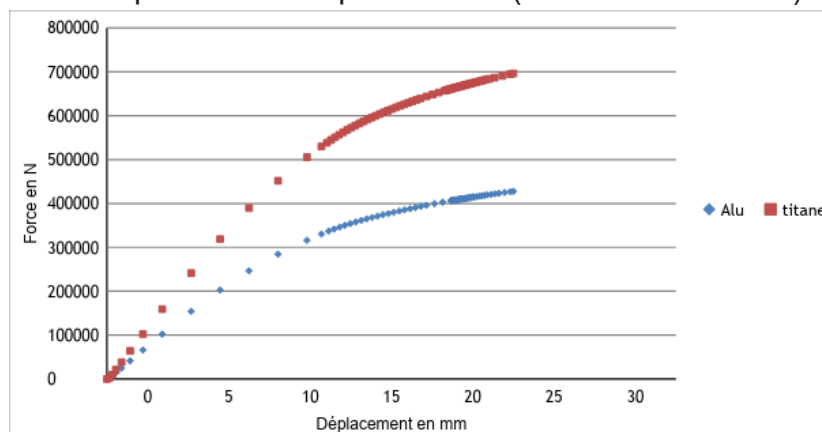


Fig.IV.A.2.f Courbe force/déplacement pour l'essai 1 avec de l'aluminium et du titane

L'atout principal de l'aluminium est sa légèreté. Toutefois si à poids équivalent, la résistance de ces 2 matériaux serait équivalente, il faudrait utiliser plus de matière pour garantir la résistance d'un halo en aluminium. Ceci entraînerait une augmentation du volume donc de l'encombrement et de la gêne de la pièce. Le titane apparaît donc comme le meilleur compromis entre résistance et faible masse volumique.

Le logiciel de simulation numérique prend en entrée les propriétés mécaniques du matériau. Ces dernières ont une forte influence sur le résultat de la simulation comme le montre cette courbe.

L'intégration des résultats des essais mécaniques sur les éprouvettes de TA6V a permis d'affiner la simulation à l'aide d'une loi de comportement de Johnson-Cook et des paramètres identifiés par les essais mécaniques réalisés.

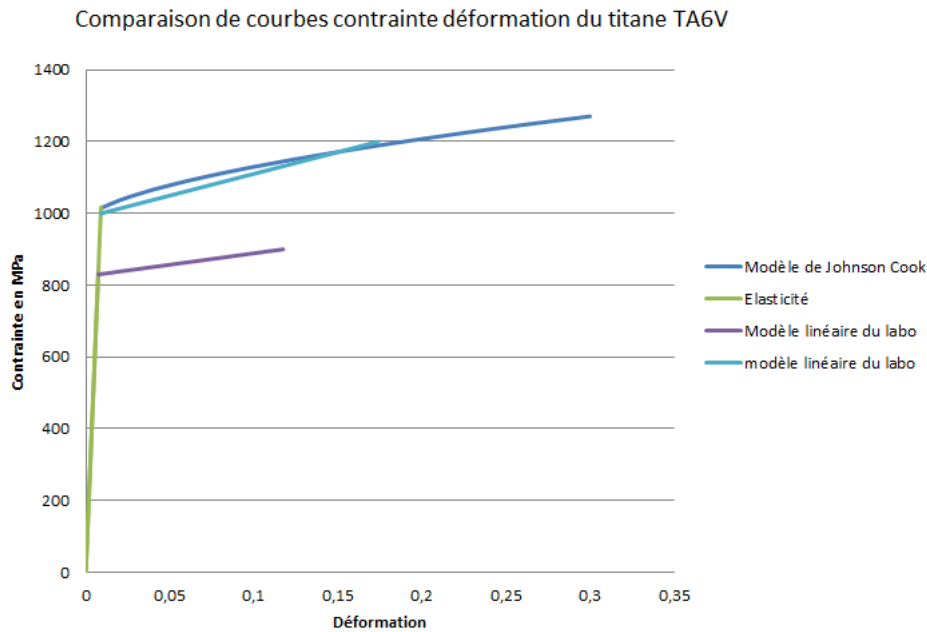


Fig.IV.A.2.g Comparaison des lois de comportement du titane utilisées sur le logiciel ABAQUS

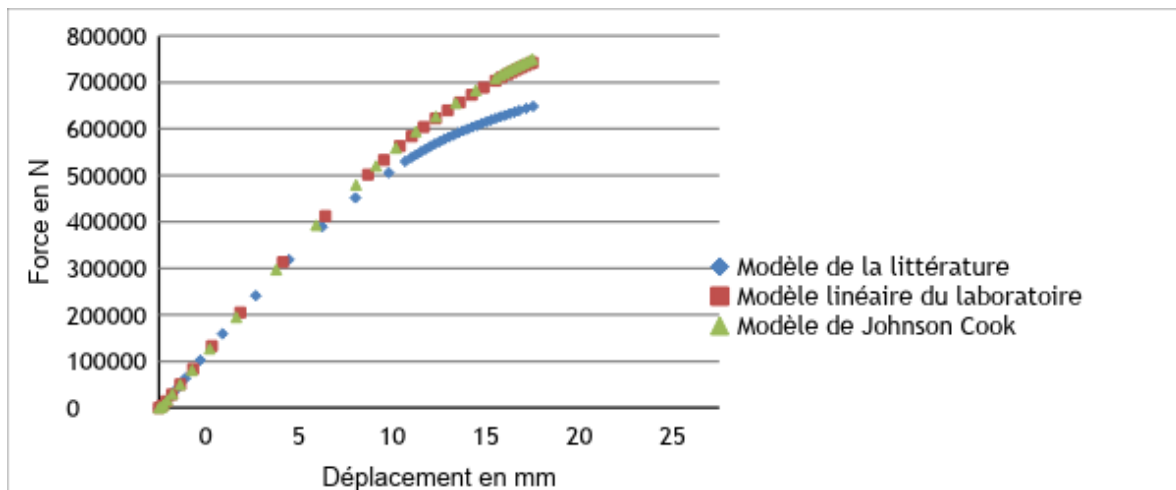


Fig.IV.A.2.h Comparaison de la réponse du halo A à l'essai 1 en fonction de la loi de comportement utilisée dans ABAQUS

On observe que tous les paramètres étant fixés par ailleurs le résultat des simulations diffère selon la loi de comportement utilisée. Les modèles de la littérature et du laboratoire diffèrent pour des forces élevées, lorsque la pièce plastifie (le taux de plastification atteignait 15% en fin de simulation). Ainsi l'écart entre les 2 modèles atteint 15% pour une force de 600 kN.

Cet écart s'explique entre autres par la variation de la microstructure et donc des propriétés du titane selon les traitements qu'il subit et atteste de la nécessité de réaliser des essais mécaniques au laboratoire.

Cette étude conduit à privilégier le titane, plus précisément l'alliage TA6V. Toutefois il est à noter que les composites pourraient se révéler avantageux. En effet, en disposant les fibres des directions aléatoires on peut conférer au matériau un comportement anisotrope intéressant. Les écuries telles que Renault F1 mènent d'ailleurs des recherches fournies sur le sujet, notamment sur la question de la mise en forme des composites.

Annexe 3 – Le halo D

Lors des simulations de contraintes sur les halos A et B, le halo B s'est révélé être plus efficace.

Le halo A est constitué d'une seule pièce, dont la structure est pleine.

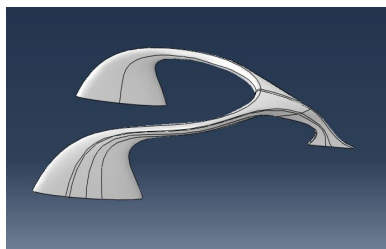


Figure 3. 1 – halo A sur ABAQUS

Le halo B est constitué de deux pièces soudées de structure pleine : la pièce inférieure est un pavé droit, tandis que la pièce supérieure pavé incurvé en forme de U.

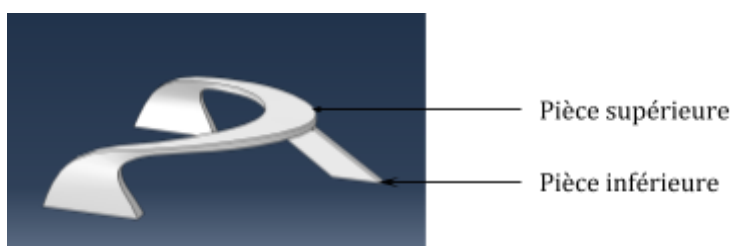


Figure 3. 2 – halo B sur ABAQUS

Pour la modélisation libre d'un premier halo, la structure du halo B a donc été retenue. Toutefois les deux halos n'étaient pas compatibles avec les normes de FIA car bien trop lourds.

La pièce supérieure du nouveau halo, nommé halo D a donc été évidée. De plus, elle comporte une structure tubulaire, ce qui permet de diminuer le volume et ainsi de gagner encore davantage en légèreté.

La pièce inférieure a elle aussi été modifiée, car amincit en son milieu avant d'augmenter la visibilité du pilote.

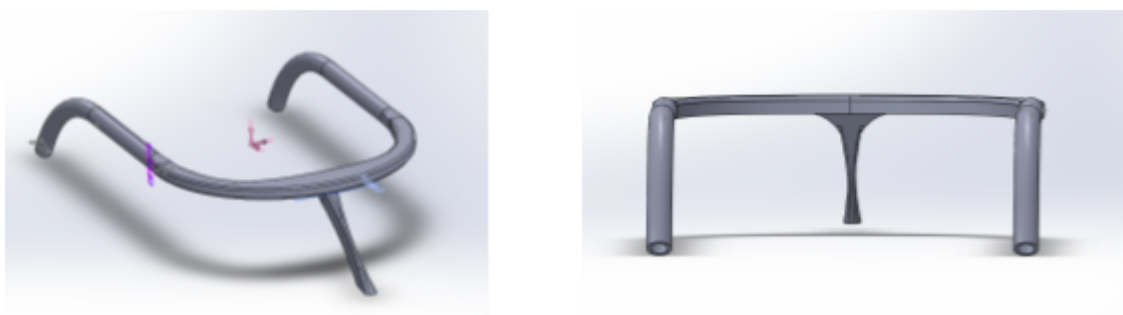


Figure 3. 3 - modélisation sur SolidWorks du halo D

Cependant cette pièce présente encore des problèmes : elle est bien trop lourde car de masse $m_D = 21\,777,79\text{ g}$ et la partie supérieure est trop longue.

De plus le passage d'une surface circulaire à rectangulaire aurait pu poser des problèmes lors de la réalisation effective de la pièce.
Il faut donc proposer une nouvelle pièce plus légère, plus courte et de structure plus simple.

Annexe 4 – halo E

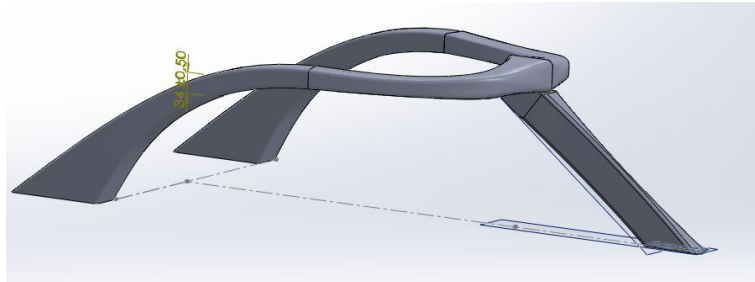


Figure 4. 1 – halo E simulé sur SolidWorks

Le second halo proposé présente plusieurs améliorations par rapport au halo D. Il garde la structure du halo B avec une pièce apposée sur une pièce inférieure.
En premier lieu, la pièce intérieure a été évidée pour alléger la structure. L'épaisseur qui a été gardée est 4 mm, conformément aux halos actuellement utilisés.



Figure 4. 2 - halo E, pièce inférieure évidée

La pièce supérieure aussi a été modifiée : la longueur a été raccourcie et la base des pieds a été élargie afin de faciliter la fixation de cette pièce sur la voiture.
La masse de cette pièce est de $m_E = 8694,47$ g.

Cette pièce a présentée plusieurs défauts :

- Le logiciel ABAQUS n'a pas réussi à fournir un maillage pour ce halo car la jonction entre les deux pièces est trop brutale. Il a donc été impossible de tester sa réponse aux différentes contraintes.
- De surcroît, le groupe aérodynamisme a étudié les différences entre le halo A et ce halo, et il a été constaté que le manque de continuité entre les deux pièces crée une forte perturbation.

Il a donc fallu concevoir une nouvelle pièce, mais cette fois avec une structure réellement différente.

Les contraintes principales qui ont été fixées pour créer une nouvelle pièce furent le respect de la masse, mais surtout une jonction plus douce entre les deux pièces, et sans arêtes ni angles obtus.

Annexe 5- Le halo F

Les différents résultats présentés dans les annexes précédentes ont orienté le dimensionnement d'un nouveau halo en s'appliquant à ce que sa masse respecte le cahier des charges, et à ce qu'il n'obstrue pas la vue du pilote. De plus il a fallu réfléchir à une structure plus aérodynamique, dont la face de prise au vent ne comportait pas d'angles apparents, ni de discontinuité.

La solution qui fut retenue a été de fixer la pièce supérieure sur le côté de la pièce inférieure, et non plus sur le dessus. Cela donne une structure plus lisse à la pièce et donc une meilleure performance aérodynamique

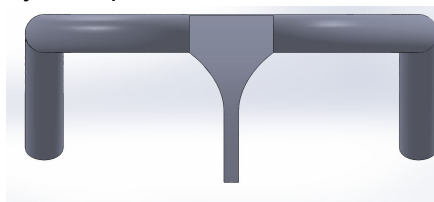


Figure 5.1 - modélisation du halo F

Cependant les bords de la pièce inférieures étaient trop brutaux il a donc fallu créer des congés sur ces arêtes pour optimiser encore davantage les performances aérodynamiques. De plus les angles obtus et les arêtes sont à l'origine de fragilités de la structure en cas de contraintes.



Figure 5.2 - halo F avec des congés

Afin de respecter les normes sur la masse, la pièce centrale a été évidée avec une épaisseur de 4mm, tout comme la partie tubulaire. Sa masse est de $m_F = 5498,96$ g ce qui correspond parfaitement aux attentes de la FIA.

Cependant, il fallait s'assurer qu'une fois évidée, la pièce inférieure ne serait pas trop fragile. Deux nouvelles études ABAQUS ont alors été réalisées sur ce modèle (la première afin de représenter l'essai quasi-statique 1 et la seconde afin de représenter l'essai quasi-statique 2).

Pour accélérer les calculs et éviter des problèmes de divergence, une première étude a été effectuée avec un maillage grossier. Dans le cas de l'essai quasi-statique 1, ceci a permis de montrer rapidement qu'un déplacement de 10mm au lieu de 17,5 mm suffisait à montrer que le halo respectait le cahier des charges.

En effet pour déplacer la structure de 10mm il faut appliquer une force bien supérieure à 125 kN (presque 200 kN). Ainsi, pour obtenir un déplacement de 17,5mm il faudra imposer une

force supérieure à 125 kN. Le cahier des charges concernant l'essai quasi-statique 1 est bien respecté.

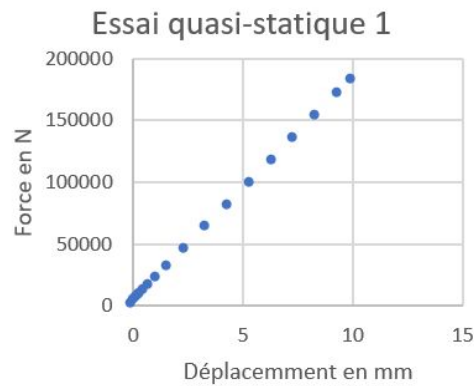


Figure 5.3 – résultat de l'essai quasi-statique 1

Cependant, l'essai quasi-statique 2 montre que pour déplacer la structure de 45mm, il faut appliquer une force inférieure à 120 kN et donc inférieure à 125 kN. Le cahier des charges n'est donc pas ici respecté.

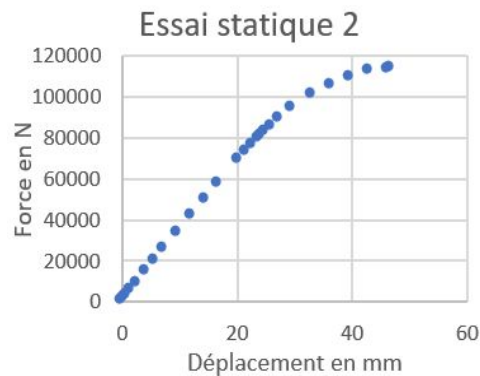


Figure 5.4 – résultat de l'essai quasi-statique 2

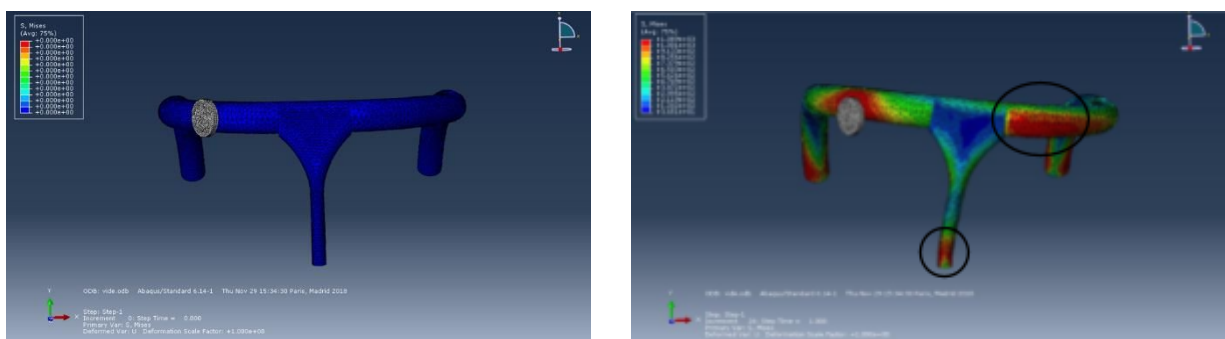


Figure 5.5 - Répartition des contraintes dans l'état final puis initial

Le halo ici proposé a été trop évidé et n'est donc pas assez résistant. Par ailleurs, il présentait trop de points anguleux, il aurait donc été difficile de le concevoir. Afin de savoir quelles zones doivent être renforcées, une nouvelle étude de la répartition des contraintes a été réalisée (cf Figure 5). Il faut donc ici renforcer la partie inférieure du « bec » qui avait été totalement vidée ainsi que la jointure du bec avec le reste de la pièce (cf Figure 5). Par ailleurs, les angles doivent être arrondis afin de faciliter la conception de la pièce.

Annexe 6 - Le halo G

Le test en quasi-statique 2 réalisé pour le halo F a montré sa fragilité, et mis en avant la nécessité de présenter un nouveau modèle, plus solide notamment au niveau du bec, et de la jointure entre les deux pièces. Pour créer un nouveau halo optimal, l'extrémité de la pointe a donc été rendue pleine. De plus la pièce supérieure épouse parfaitement la surface de contact avec la pièce inférieure. Cela permet de renforcer les jointures et de diminuer les zones de fragilité.



Figure 7.1- Modélisation du halo G sur Solidworks

La même étude que précédemment est alors réalisée sur ce halo G. Les résultats obtenus peuvent alors être comparés avec ceux du halo précédent.

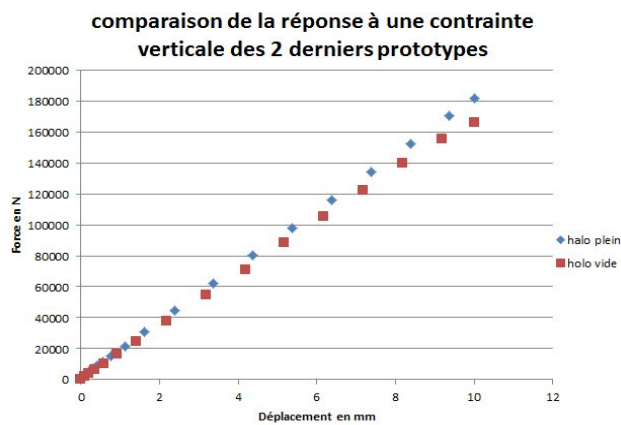


Figure 7.2- Comparaison des courbes force/déplacement obtenues à l'issue de la simulation de l'essai 1 sur les halos F et G, ABAQUS

L'essai quasi-statique 1 montre que le halo G est plus résistant que le halo F. Le halo G respecte donc le cahier des charges de la FIA.

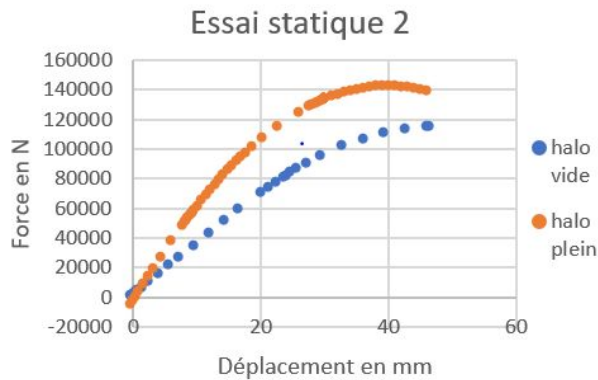


Figure 7.3- Comparaison des courbes force/déplacement suite au simulations réalisées sur ABAQUS sur les halos F et G

L'essai quasi-statique 2 a été réalisé et montre que le halo G respecte bien le cahier des charges. En effet, pour un déplacement de 46 mm, la force nécessaire est de 140 kN.

Il faut noter ici que la totalité de la courbe orange a été obtenue à l'aide d'une équation d'une courbe de tendance, obtenue sur les résultats de la modélisation qui a divergé après avoir effectué un déplacement de 36mm (alors que 47 étaient demandés).

Le halo G respecte bien le cahier des charges concernant l'essai quasi-statique 2.

La masse du nouveau halo est de $m_G = 6,515$ kg donc demeure plus avantageuse que ceux proposés par la FIA.

La totalité du cahier des charges de la FIA est respecté par ce halo, il est donc possible de le proposer au groupe chargé de l'aérodynamisme du halo pour qu'ils puissent l'étudier et l'optimiser.

B. Matériaux

I - Identification d'une loi de comportement du TA6V

Le halo imposé par la FIA doit être réalisé en Titane TA6V. Pour en concevoir et en dimensionner un qui respecte les critères de résistance, il est nécessaire d'identifier un modèle de comportement de cet alliage. Ce modèle permet alors au groupe qui s'intéresse à la structure de s'assurer que le modèle qu'il propose respecte les contraintes imposées par la FIA.

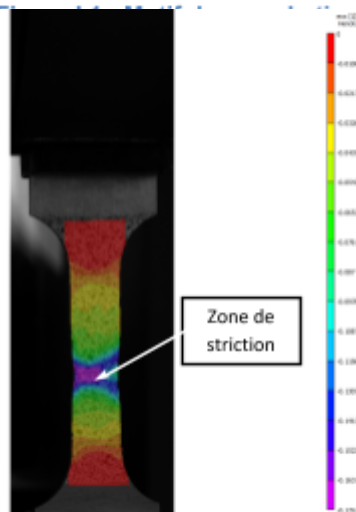
a/ Tests mécaniques et calcul des champs de déformations

Le premier stade du travail consiste à découper des éprouvettes standardisées dans du TA6V. Chaque éprouvette est réalisée en plusieurs exemplaires afin de tester la répétabilité de l'expérience.



Avant l'essai nous recouvrons la zone utile de l'éprouvette d'un motif de mouchetis. Ce motif permet au logiciel

de traitement d'image VIC 3D de connaître les déplacements locaux et d'en déduire le champ de déformations de l'éprouvette durant l'essai [fig I.1].



La machine de traction utilisée peut exercer un effort allant jusqu'à 30kN. Nous menons nos essais jusqu'à rupture de l'éprouvette, en imposant la vitesse de déformation globale. Utiliser deux vitesses de déformation différentes permet d'étudier la dépendance mécanique du matériau à la vitesse.

Figure I.2 : Champ de déformation selon la largeur lors d'un essai en traction

L'essai de traction est filmé par deux caméras calibrées et disposées en stéréo. Les images capturées sont utilisées par le logiciel VIC 3D pour calculer le champ des déformations. Le motif de peinture en mouchetis, avec des points noirs sur fond blanc, de tailles et de formes variées, permet au logiciel de retracer les déformations dans différentes directions [fig I.2].

Pour effectuer le calcul des champs de déformation, le logiciel divise les images à analyser en carrés, le *subset*, d'un certain nombre de pixels de largeur. Si la taille du subset est trop faible, les tâches noires du mouchetis peuvent occuper une partie trop importante des carrés d'analyse, ce qui empêche le logiciel de calculer correctement les déformations. Il est aussi important de régler correctement le pas d'analyse : il doit être plus petit que le subset, mais un pas d'analyse faible augmente considérablement le temps de calcul.

Pour permettre une bonne analyse des images, la plage de netteté des caméras doit être centrée sur l'éprouvette, le temps d'acquisition doit être adapté et l'exposition doit être suffisante. De plus, le mouchetis doit être soigné : il est nécessaire d'avoir un bon contraste sur la zone utile et donc de ne pas appliquer un mouchetis trop fin. Cependant, si les points noirs sont trop larges, la précision du calcul peut s'en trouver diminuée.

Nous obtenons ainsi les déformations locales dans la zone de striction de l'éprouvette, ainsi que l'allongement global de celle-ci.

Pour tracer la loi de comportement expérimentale, il faut calculer les contraintes dans l'éprouvette : pour cela, nous avons utilisé la force exercée et mesurée par la machine de traction, ainsi que les dimensions de l'éprouvette. En calculant simplement $\sigma_{ing} = F/S_0$, ce qu'on appelle la contrainte ingénieur, on ne prend pas en compte le changement de section de l'éprouvette. Grâce aux champs de déformation donnés par VIC 3D, il est possible de calculer la contrainte vraie, qui vaut ainsi $\sigma_{vraie} = \frac{F}{S(t)}$. En prenant ϵ_{xx} la déformation vraie de l'éprouvette selon sa largeur (donnée par le logiciel) et ϵ_{zz} la déformation vraie de l'éprouvette selon son épaisseur (inconnue), on a

$\epsilon_{xx} = \ln\left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right)$ donc $l(t) = l_0 e^{\epsilon_{xx}}$, de même $e(t) = e_0 e^{\epsilon_{zz}}$. Ainsi, en utilisant l'hypothèse d'isotropie transverse : $\epsilon_{xx} = \epsilon_{zz}$, il vient :

$$\sigma_{vraie} = \sigma_{ing} e^{-2\varepsilon_{zz}}$$

On trace ensuite l'évolution de cette contrainte vraie en fonction de la déformation longitudinale de l'éprouvette.

b/ Identification d'une loi de comportement

La loi de comportement présente deux zones de déformation distinctes.

Figure I.3 : Dépendance à la vitesse de la loi de comportement

La première est une zone de déformation élastique⁴, où nous modélisons le comportement du matériau par la loi de Hooke⁵ $\sigma = E\varepsilon$, où E, le module d'Young, vaut 121 000 MPa.

La deuxième est une zone de déformation plastique⁶. Nous la modélisons par une loi de Johnson-Cook prenant en compte la dépendance à la vitesse de déformation :

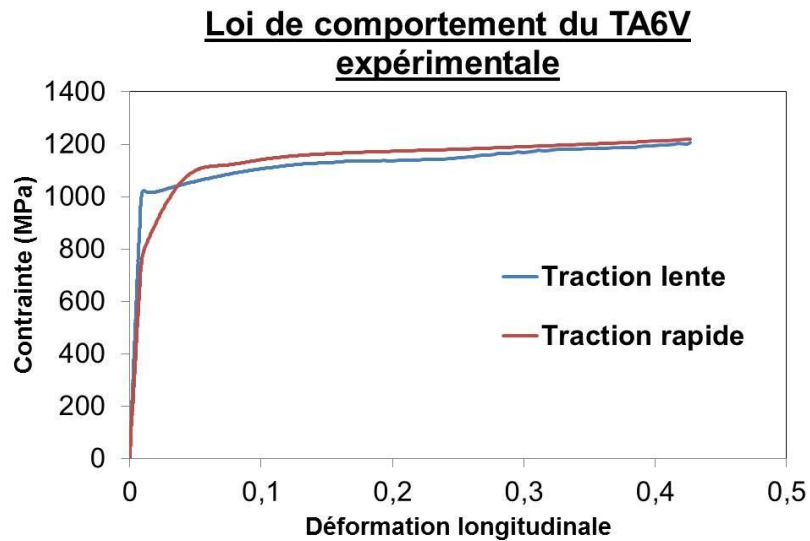
$$\sigma_{JC} = (A + B \varepsilon^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right)$$

Avec $A=979$ MPa ; $B=600$ MPa ; $n=0,6$; $C=0,013$ et $\dot{\varepsilon}_0=0,013$.

On cherche à identifier cette loi de comportement en optimisant les paramètres A, B, n, C et $\dot{\varepsilon}_0$ pour faire coïncider au mieux la courbe numérique à la courbe expérimentale. On utilise un solveur Excel pour effectuer cette optimisation [fig I.4].

Pour ce faire on commence par déterminer A, B et n en prenant C nul pour un premier essais à une vitesse donnée. Puis en ajoutant un second essai de vitesse différente on détermine C et $\dot{\varepsilon}_0$ en fixant les autres paramètres.

Ce modèle de comportement est alors utilisé par le groupe structure pour simuler la réaction de leur halo à un effort donné.



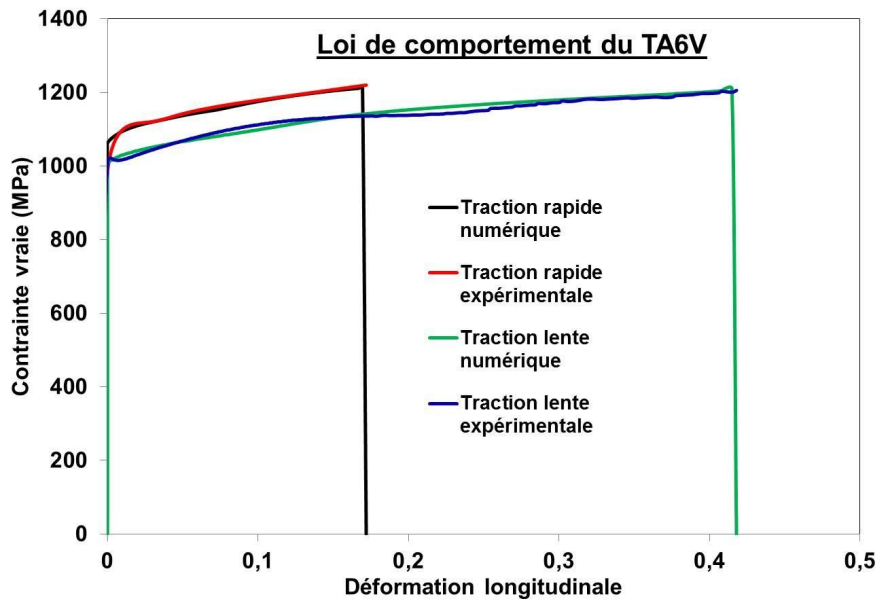


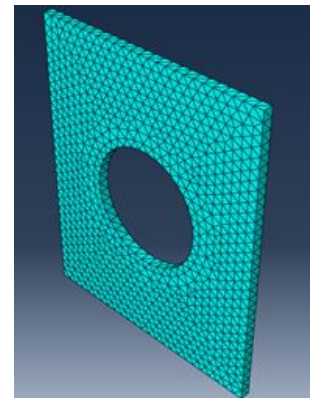
Figure I.4 : identification des lois de comportement

c/ Validation des paramètres grâce au logiciel Abaqus

Le logiciel Abaqus est un outil qui permet de vérifier la cohérence des valeurs retenues pour la loi de Johnson-Cook. Il permet de faire le lien entre la validité à l'échelle locale (dans la zone de striction) de cette loi et la cohérence à l'échelle macroscopique des résultats. Les quatre géométries des éprouvettes sur lesquelles ont été réalisés les essais en traction-entaillée, traction simple, centre hole, shear stress- sont modélisées sur Abaqus. Elles permettent d'évaluer le comportement pour des états de contraintes différents.

Le maillage de la pièce est une étape cruciale [fig I.5]. Il correspond à la discrétisation spatiale de la pièce et sur laquelle les calculs seront effectués. Il s'agit de trouver le bon compromis, en effet un maillage fin rendra le résultat plus précis mais le calcul plus long.

Figure I.5 : Maillage de l'éprouvette Centre hole



En sortie, Abaqus permet le traitement de nombreuses données telles les valeurs du champ de contraintes ou de déformation sur toute la pièce ou l'effort et le déplacement de l'outil qui nous permettra de comparer résultats numériques et expérimentaux [fig I.6].

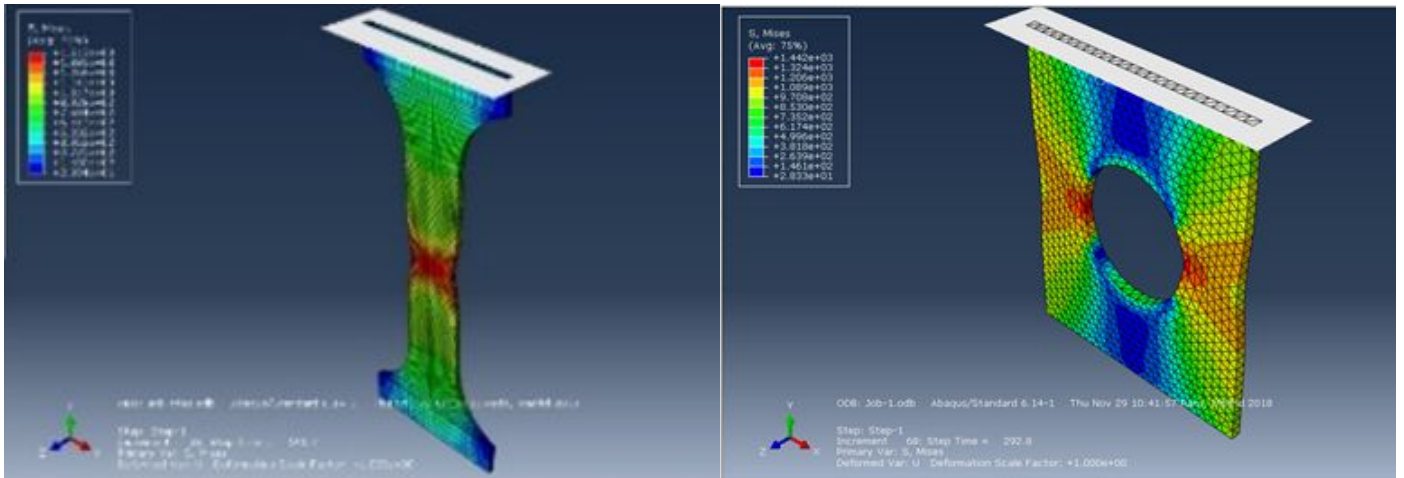
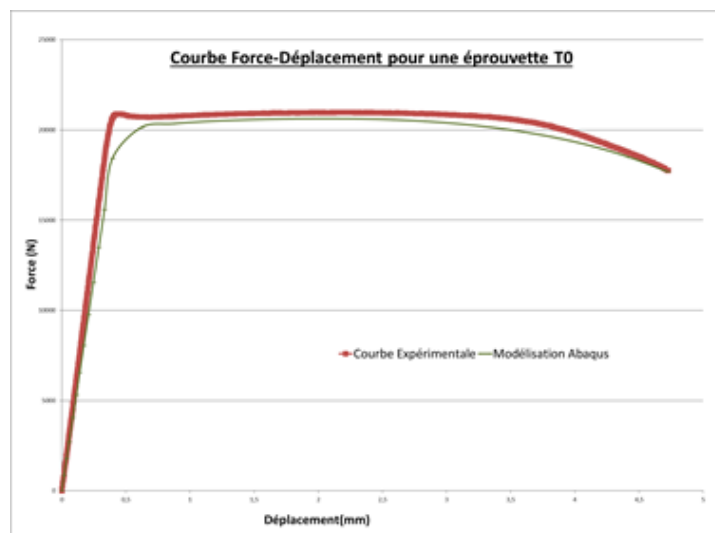


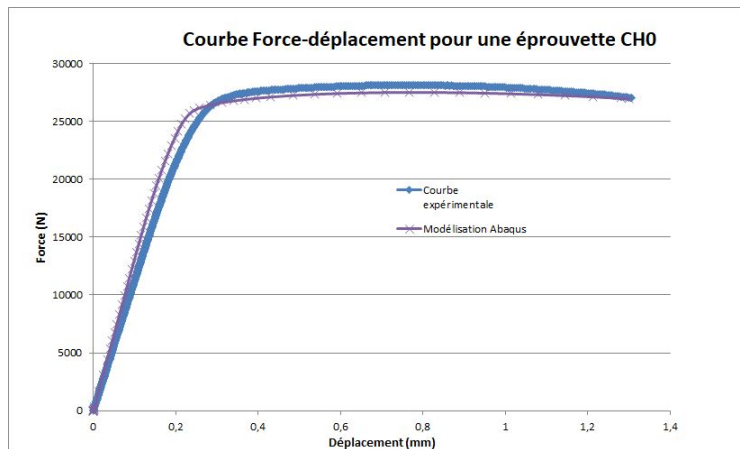
Figure I.6 Champ de contraintes sur l'éprouvette T0 (gauche) et CH0 (droite) en traction

Intuitivement, on peut anticiper dans quelles zones les contraintes se concentreront, néanmoins Abaqus permet de visualiser la localisation précise. C'est dans les zones rouges (contraintes maximales) que seront calculées les valeurs de triaxialité.

La comparaison aux résultats expérimentaux permet alors de valider les valeurs de ces paramètres [fig 1.7].

Figures I.7 : Comparaison entre modèles et résultats expérimentaux pour deux types d'éprouvette





II- Influence de l'anisotropie

Le titane est laminé avant d'y usiner des éprouvettes. Le laminage a pour effet d'orienter la microstructure du métal, et donc de changer ses propriétés mécaniques : le métal à l'origine isotrope⁷ devient anisotrope⁸. [fig II.1 et II.2]

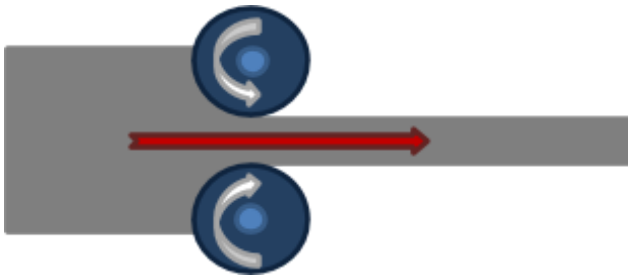


Figure II.1 : schéma d'obtention d'une tôle laminée

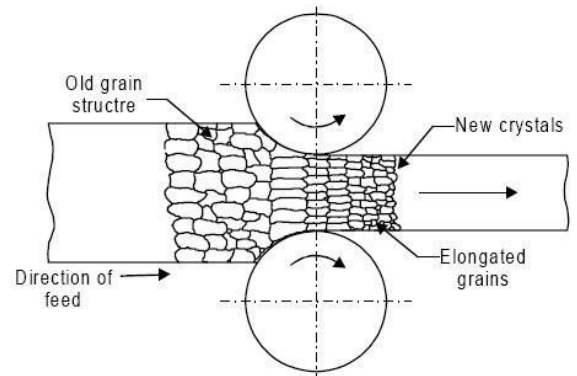
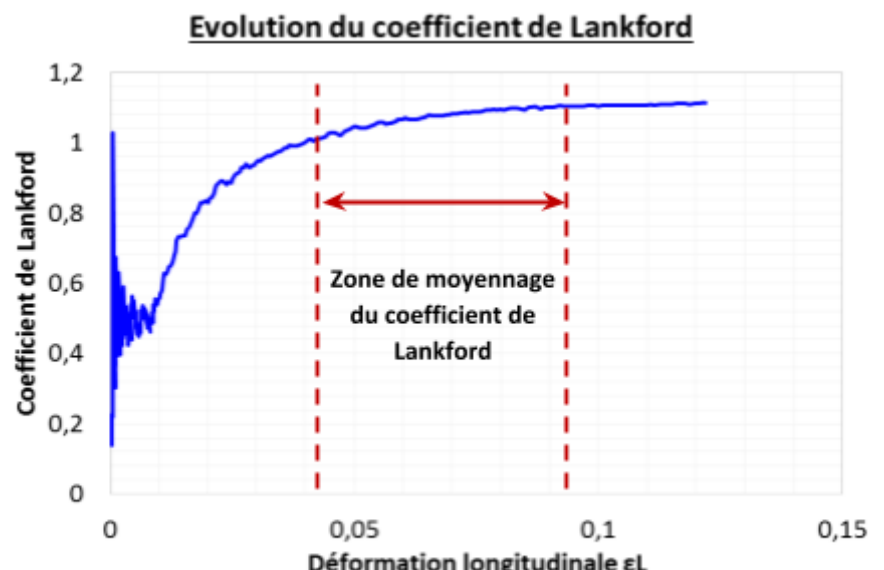


Figure 2 : influence du laminage sur la microstructure Source : <http://sainsmechanical.blogspot.com>

(source : <https://www.inspection-for-industry.com>)

L'isotropie est une des hypothèses faites pour le calcul des contraintes vraies et des simulations Abaqus : cela induit donc une incertitude dans les calculs. Le critère de von Mises utilisé par Abaqus est généralisable en un critère de Hill, appelé Hill48, qui prend en compte l'anisotropie du matériau. Ce critère de Hill est établi à partir des coefficients de Lankford, calculés pour différentes orientations du chargement par rapport à la direction du laminage.

On calcule d'abord à chaque instant de l'essai de traction le coefficient $r = \frac{-\varepsilon_l}{\varepsilon_L + \varepsilon_l}$, ε_l étant la déformation dans la largeur de l'éprouvette, au niveau de la zone de



striction, ε_L étant la déformation longitudinale de l'éprouvette. Le coefficient r variant dans le temps, on calcule sa moyenne lorsque ε_L vaut entre 5 et 10%. Cette moyenne correspond au coefficient de Lankford pour une direction donnée [fig II.3].

Un matériau parfaitement isotrope aura des coefficients de Lankford, dans différentes directions, proches de 1.

La tôle de titane utilisée présente une légère anisotropie.

Cette anisotropie est visible sur les courbes présentant le comportement mécanique des différentes éprouvettes : la résistance élastique change légèrement, mais l'écroutissage dans la zone plastique reste similaire. Le modèle de Johnson Cook est donc acceptable et garder la déformation à rupture de la pièce à 0° permet d'augmenter les marges de sécurité car c'est la plus faible [fig II.4].

En revanche on remarque une anisotropie plus marquée sur la déformation à rupture.

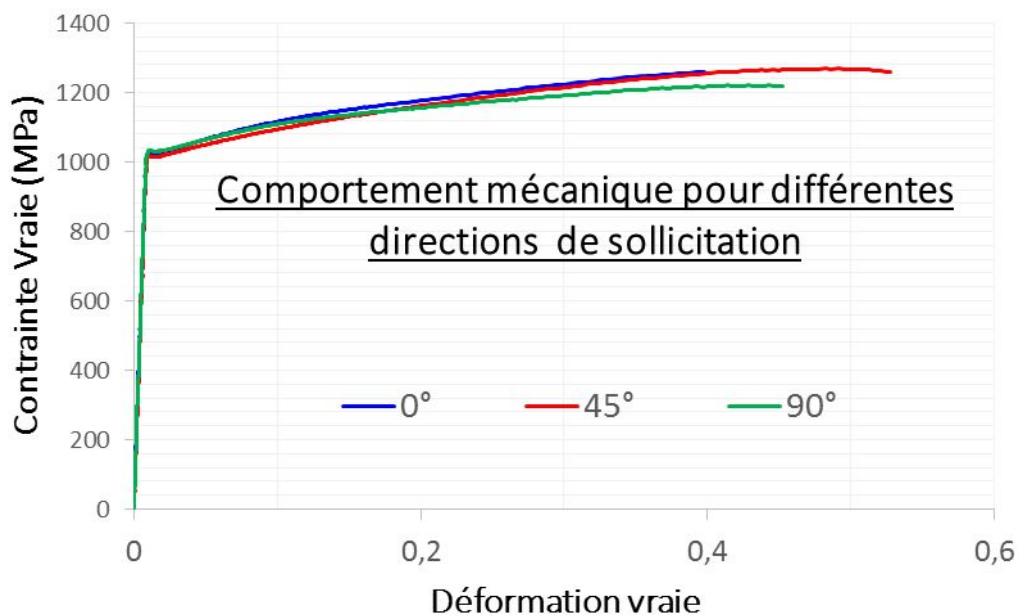


Figure II.4 : Comportement mécanique anisotropique

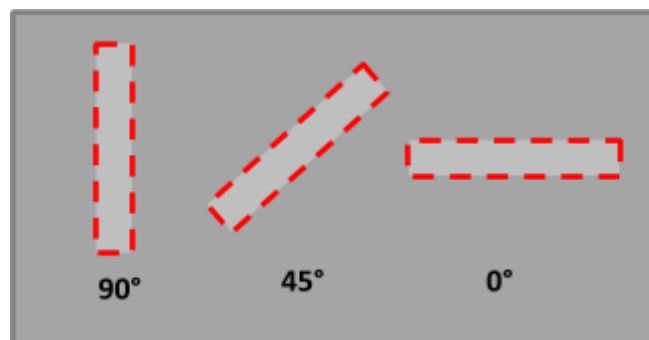


Figure II.5 : Découpe des éprouvettes dans la tôle de TA6V

III- Influence du traitement thermique

Afin de tester la variation des propriétés mécaniques du TA6V il est intéressant de réaliser un traitement thermique sur certaines éprouvettes. En effet le traitement thermique a une influence sur la microstructure du titane et donc sur ses propriétés mécaniques. Les traitements thermiques consistent en une chauffe des éprouvettes dans un four à 960°C pendant deux heures. Une partie des éprouvettes est refroidie en étant trempée dans l'eau (refroidissement rapide en quelques secondes) et l'autre est laissée dans le four éteint (refroidissement lent en quelques heures). Les essais de traction sur éprouvette plate montrent que les comportements diffèrent selon le traitement. Dans les deux traitements, la résistance mécanique du titane est moins importante que dans le cas non traité. Cependant l'adhérence du mors sur le titane diminue et peut donc faire glisser l'éprouvette entre les mors, faussant ainsi les mesures. La déformation à rupture est également moins importante dans le cas où l'éprouvette est traitée. L'état métallurgique initial est donc bien plus intéressant avec une résistance supérieure ainsi qu'une ductilité bien plus grande lui conférant ainsi une bien meilleure ténacité [Fig II.6].

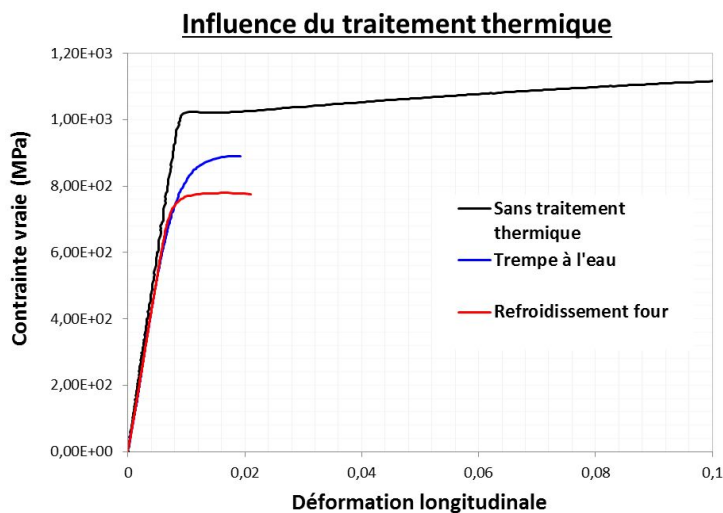


Figure II.6 :influence du traitement thermique

Afin d'étudier l'influence des traitements thermiques sur la microstructure du titane, il faut préparer des échantillons pour une observation au microscope électronique à balayage. Un tel microscope envoie des électrons de différentes natures sur l'objet conducteur à observer et analyse ces derniers en sortie, fournissant une image très précise.

Les échantillons sont pris dans une matrice de résine pour pouvoir être saisis et avoir une taille normalisée adaptée aux machines. Puis ils sont polis successivement avec des grains de plus en plus fins, afin de réduire la taille des rayures observées au microscope. Un

polissage trop grossier rendrait l'observation des grains du titane impossible. Il faut ainsi utiliser des grains de diamètre allant jusqu'à 0,25 μ m.

Deux paramètres essentiels influencent la microstructure du titane traité thermiquement : la température de chauffe et la durée de refroidissement [Fig II.7].

Figures II.7 : Transformation des phases lors d'un traitement thermique

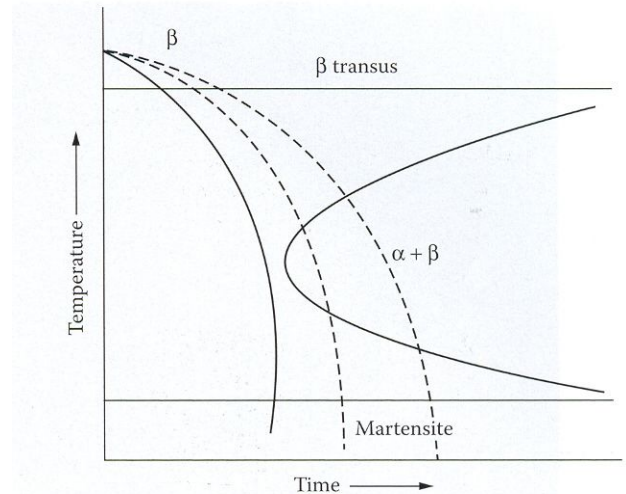
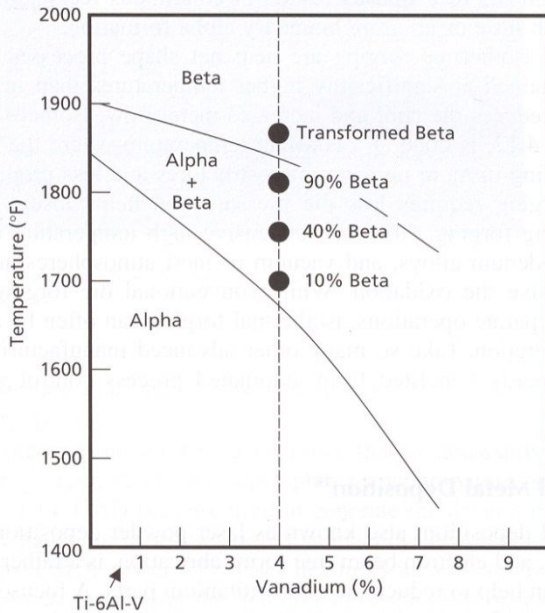
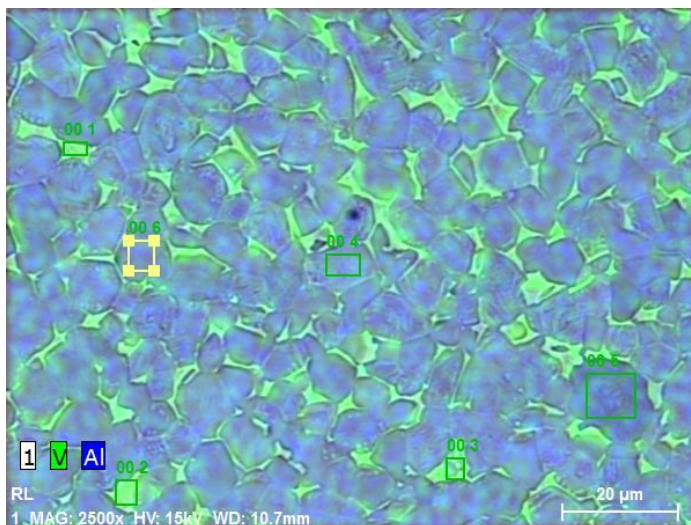
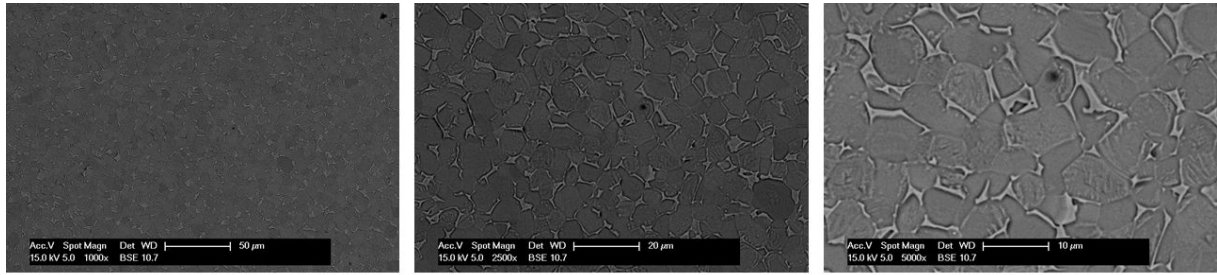


Fig. 4.11. Phase Transformations on Heating Through Alpha + Beta Region⁴

L'influence des deux traitements thermiques se caractérise par un agencement et une proportion des grains α et β ⁹ différents.

Le titane refroidit au four présente des grains α avec des interstices de grains β : le refroidissement lent a permis la formation d'une structure α : les cristaux sous forme β migrent vers les joints de grains. Cette structure est mise en évidence par l'indexage des éléments chimiques : l'aluminium, qui fixe la structure α , est bien présent dans les grains principaux, tandis que le vanadium, qui fixe la structure β , est concentrée dans les joints de grains (voir spectres ci-après).

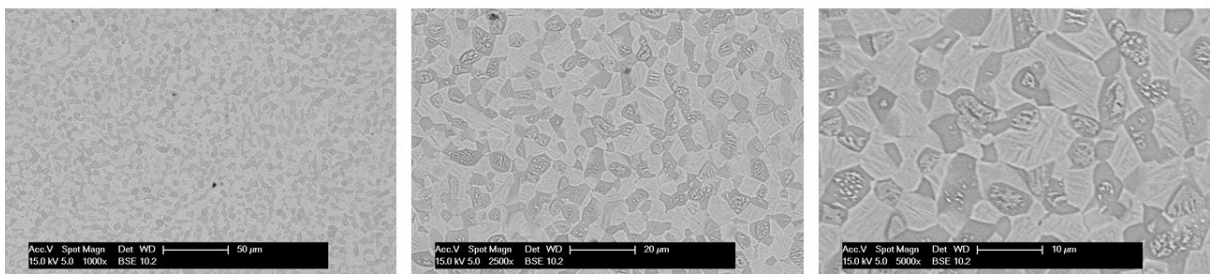




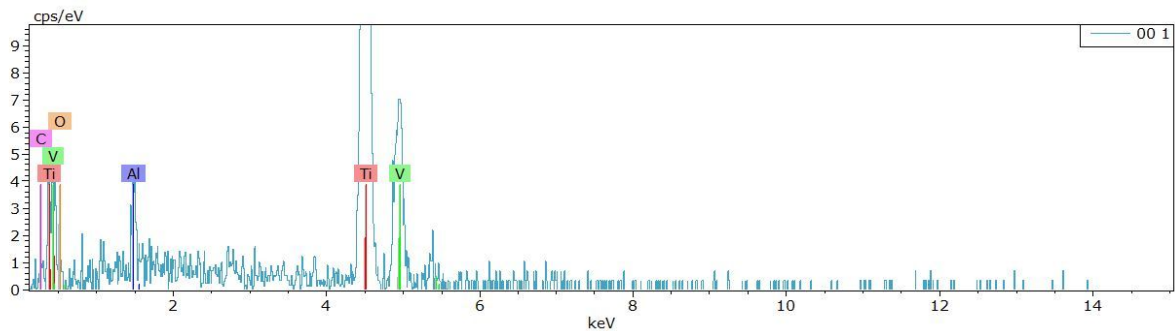
RL(alpha case)

La durée de refroidissement des éprouvettes trempées étant plus courte, la microstructure n'est pas la même. L'oxygène stabilisant la phase α , on observe ainsi une couche d'environ 200 μ m d'épaisseur d'une structure principalement constituée de grains α . L'intérieur comporte une phase α et une structure appelée martensite.

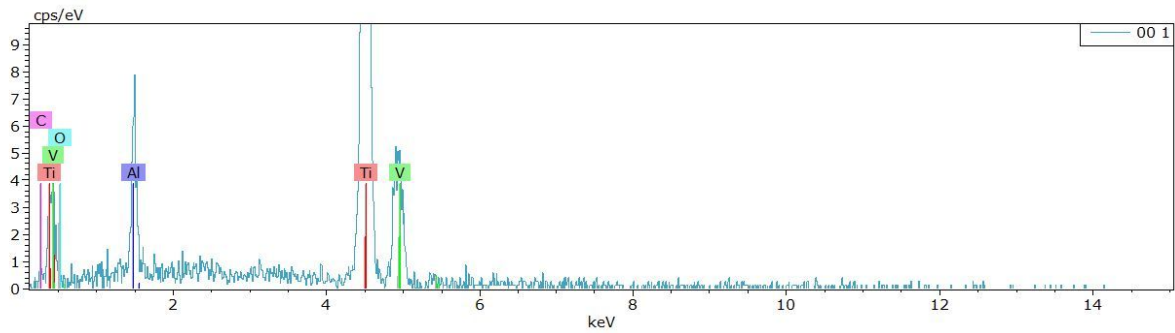
TE(martensite)



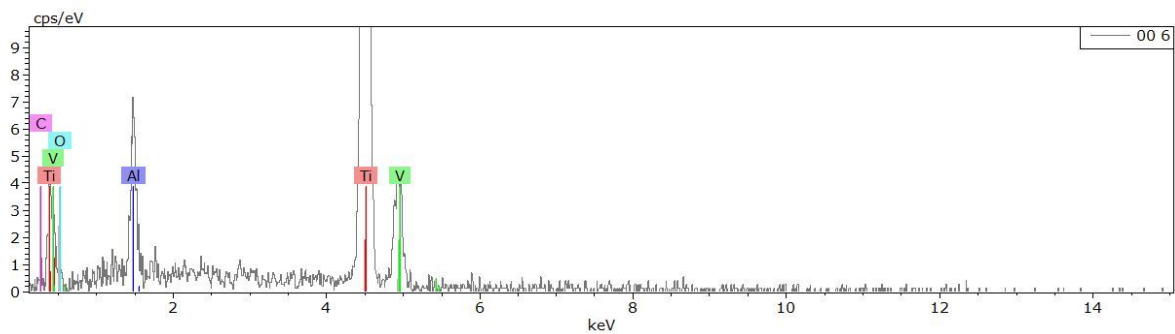
Spectre phase beta (refroidissement lent)



Spectre martensite (trempé à l'eau)



Spectre phase alpha (trempe à l'eau)



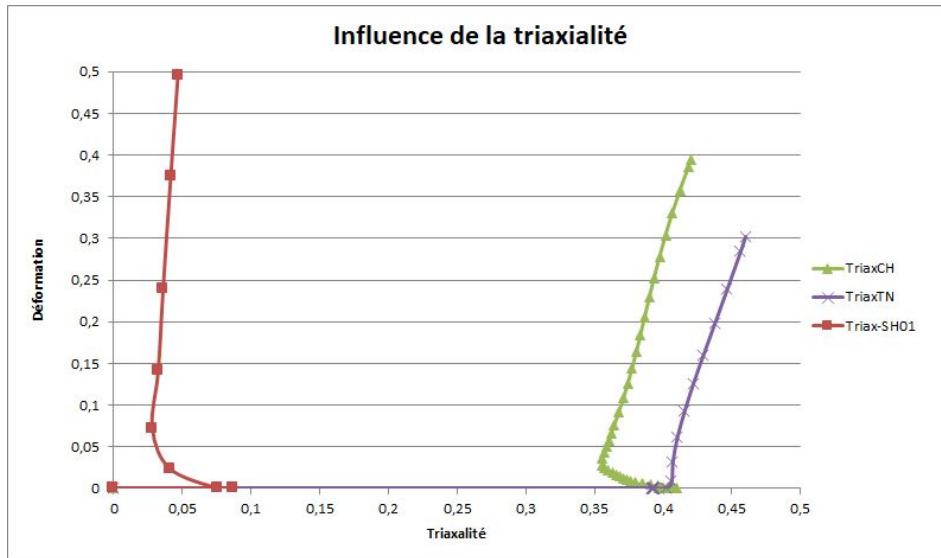
IV- La triaxialité des contraintes

La triaxialité des contraintes est le rapport entre la contrainte hydrostatique et la contrainte équivalente de von MISES. Avec des éprouvettes de formes différentes on parvient à changer le champ de répartition des contraintes. Dans la zone d'intérêt, la contrainte n'est plus nécessairement une traction pure. Des essais en cisaillement peuvent alors être réalisés avec une machine de traction.



La triaxialité est un nombre sans dimension qui permet de savoir si la contrainte est à dominante tension, compression, cisaillement ... Elle évolue au cours de l'essai. Celle-ci vaut $-\frac{1}{3}$ en compression uniaxiale, 0 en cisaillement, $\frac{1}{3}$ en traction uniaxiale et elle continue d'augmenter lorsque l'état de traction devient bi-axial. Sur Abaqus il est possible d'extraire la déformation en fonction de la triaxialité dans la zone de striction. On constate bien que dans le cas de cisaillement (SH) la triaxialité reste presque nulle. Ce graphique permet ainsi en

fonction de la triaxialité, retrouver la déformation à rupture puisque celle-ci dépend fortement du type de contrainte.



Simulations numériques

Génération de maillage anisotrope par couche pour des simulations CFD

But : Simuler l'écoulement d'un fluide à grand nombre de Reynolds

Introduction

Les méthodes de modélisation d'écoulements turbulents sont aujourd'hui assez anciennes (modèle utilisé date de 1992 mais reste efficace). Les méthodes numériques (CFD (Computational Fluid Dynamics) et Meshing capabilities) promettent de grands progrès à venir (précision, fiabilité des modélisations) (supportées par l'industrie aéronautique)

Une grande précision (ie maillage fin) est nécessaire pour correctement simuler les comportements local et global de tous les phénomènes, notamment ceux aux limites (séparation de couches, écoulements distincts..)

Deux approches sont traditionnellement adoptées :

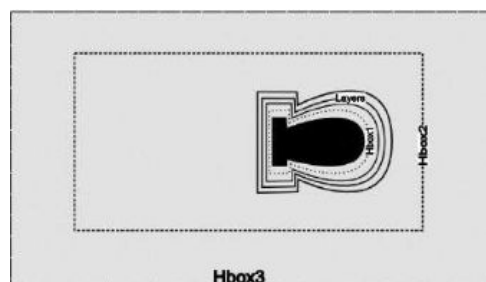
- 1) « Block-structured meshes » : beaucoup utilisée, présente des difficultés d'initialisation mais surtout un manque de flexibilité pour traiter des modifications/rajout/ ...
- 2) « Unstructured meshes » : maillage initialisé aléatoirement

En dynamique des fluides numérique, on cherche principalement à obtenir des maillages couche limite. Pour pallier au coût prohibitif lié au nombre de nœuds dans le maillage, donc d'inconnus, on utilise une métrique pour générer des maillages anisotropes (présence d'un gradient très fort dans une direction).

La nouvelle méthode proposée entend pouvoir mailler n'importe quelle géométrie initialement plus ou moins grossière, puis localise les surfaces limites des objets annexes pour assurer une résolution fine de l'écoulement turbulent (nombre de Reynolds très élevé, $Re \sim 10^6$).

Génération du maillage par couche

Une surface limite correspond à une superposition de fines couches correspondant à des irrégularités de comportement du fluide (proche de la surface, l'écoulement est laminaire, puis en s'éloignant devient brusquement turbulent, produisant des vortex). La couche la plus proche de la surface possède une épaisseur h_{min} (dépendant des caractéristiques du fluide), la suivante une épaisseur $\alpha \cdot h_{min}$, puis $\alpha^2 \cdot h_{min}$ etc.. et ce sur une distance δ de la surface [fig1].



[fig 1] structure des tailles de mesh dans l'espace

Après ces n couches de maillage fin, on définit une nouvelle taille de maille Hbox2. La taille de maille croît de façon linéaire de α^{n-1} à Hbox2. Puis, elle croît de façon exponentielle jusqu'à une taille de maille Hbox3. On obtient ainsi un maillage global, raffiné par des tailles de mailles variables selon les zones d'intérêts.

Équations

Le système d'équations régissant l'écoulement du fluide est l'équation de Navier-Stokes incompressible. Ici on passe par sa version temporelle, où une discrétisation du temps est aussi nécessaire. Le système d'équations de Navier-Stokes non stationnaire s'écrit :

$$\begin{aligned}\rho(\partial_t v + v \cdot \nabla v) - \nabla \sigma &= f \\ \nabla \cdot v &= 0\end{aligned}$$

Une méthode élément finis multi-échelle implicite est utilisée pour résoudre sur chaque nœuds du maillage ces équations. Elle consiste à modéliser les petites échelles (sous-maillages) et réinjecter leur effet pour enrichir la résolution des grandes échelles (vitesse et pression).

Étude

Les premiers maillages lancés étaient réalisés avec une taille de maille à l'interface de 0.001m, un paramètre de croissance $\alpha = 1.2$ avec 20 couches de maillage. Les tailles de maille Hbox2 et Hbox3 ont respectivement été fixées à 0.25m et 1m.

Pour l'étude comparative des halos, cette précision de maillage a été suffisante. En revanche, l'ajout d'appendice a nécessité un remaillage de précision. En effet, les appendices ajoutés se retrouvaient collés à la structure de halo initiale [fig2]. Une première option était de diminuer la taille de la première couche de maillage à 0.0005m en partant d'un pré-maillage affiné [fig3]. Cependant, les résultats obtenus étaient très volumineux, trop pour pouvoir espérer lancer des calculs par la suite dans un délai raisonnable. Et les calculs de maillage étaient très longs, voire ne terminaient pas.



[fig 2] coupe de profil du halo après maillage grossier



[fig 3] coupe de profil du halo après maillage fin

Pour un ordre de grandeur:

Maillage	taille du fichier	nombre de mailles	nombre de noeuds	temps de calcul
grossier	200 Mo	$4 \cdot 10^6$	$680 \cdot 10^3$	2h30
fin	500Mo	$7.8 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^6$	5h+2h

Les simulations numériques lancées à partir des maillages calculés ont pris entre 10h et 96h dans le pire des cas. Ces différences s'expliquent par la différence de finesse du maillage, la vitesse de l'écoulement et la quantité d'objets introduits dans la soufflerie numérique. Ces calculs ont été réalisés sur le calculateur du CEMEF (2000 coeurs) utilisant dans ce cas 80 coeurs. Au centre de Renault Sport que nous avons visité en Angleterre, le calculateur utilisé possédait un supercalculateur de 18000 coeurs utilisés à plein temps.

La décision fut prise de modifier les appendices initiaux pour pouvoir étudier leur impact aérodynamique avec des temps de calcul raisonnables. Pour cela, les appendices sur le halo ont été surélevés. [fig5]

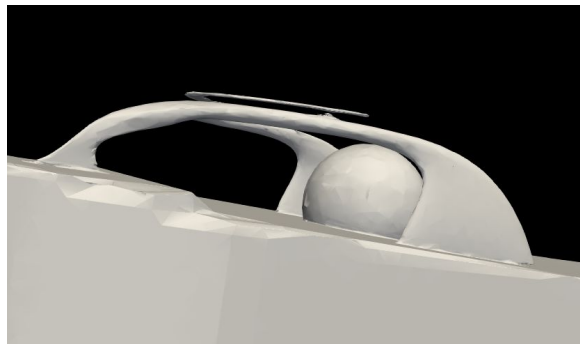
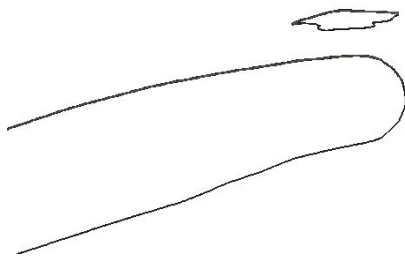


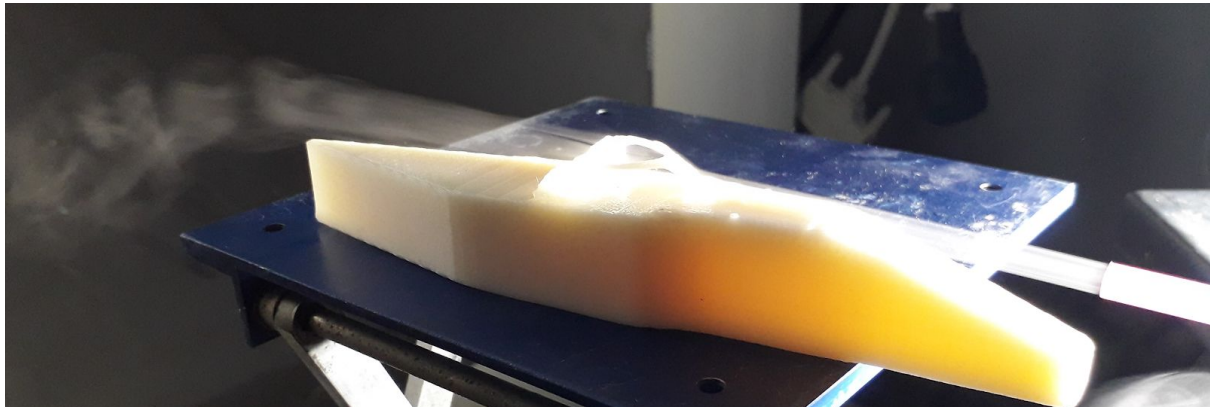
fig 4 coupe de profil du halo après remaillage fig 5 appendice surélevé sur le halo

Simulations expérimentales

Après avoir simulé numériquement les écoulements d'air, il est apparu nécessaire de vérifier la pertinence de ces résultats en étudiant les écoulements réels. Cela a été possible en visualisant les lignes de courant dans une soufflerie. Différentes techniques ont été utilisées. Tout d'abord, des tentatives ont été effectuées avec un générateur de fumée ; mais les essais n'étaient pas concluants car la fumée n'était pas canalisée, et trop turbulente. différents dispositifs pour canaliser cette fumée ont été testés, mais aucun n'a réellement fonctionné, la réelle difficulté étant d'obtenir des lignes de fumée pour simuler un écoulement laminaire. Un brumisateur a également été utilisé, sans grands résultats pour les mêmes raisons. Un net progrès a été réalisé par l'utilisation de bâtonnets d'encens alignés qui, une fois allumés, permettaient de générer des lignes d'une fumée assez dense. Mais la meilleure

méthode, adoptée pour les expériences finales, a été celle utilisant un générateur de brume tel qu'on peut en trouver dans le commerce, pour rafraîchir un salon par exemple. En canalisant cette brume avec des pailles, il a été possible d'obtenir des lignes de courant visibles, et d'observer les écoulements pour différents halos.

Les figures suivantes présentent nos observations.



[figN] Écoulement autour du halo A

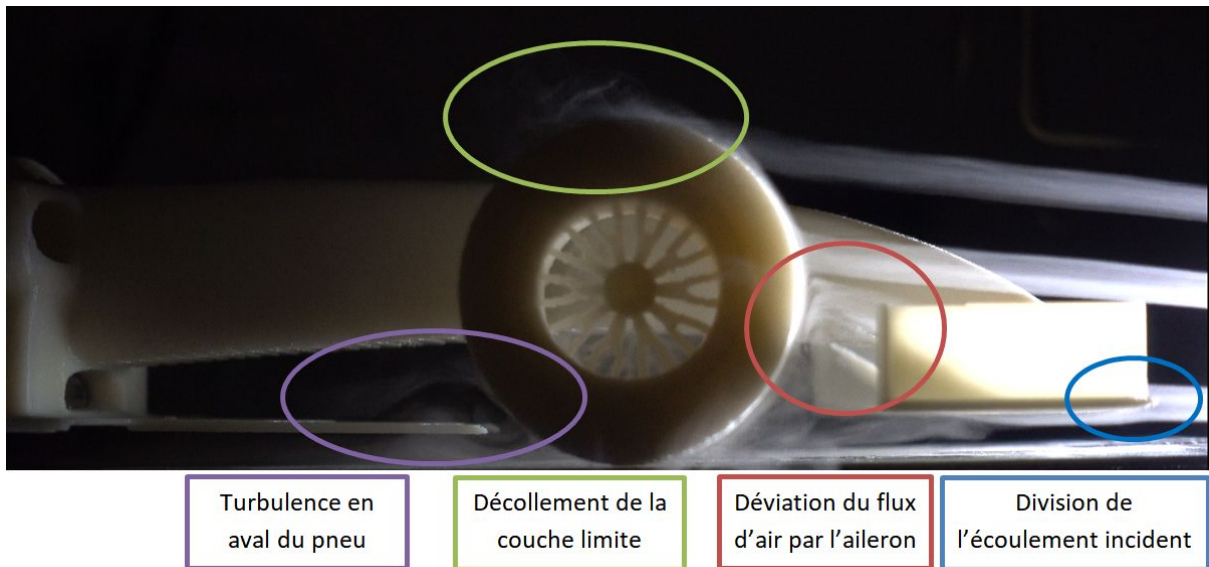


[figN] Écoulement autour du halo B

Les figures [figN] et [figN] démontrent que l'écoulement d'air autour du support est significativement modifié par la présence du halo. En effet, en aval de ce dernier des tourbillons se forment et la vitesse de l'écoulement diminue, comme nous avons pu le constater en réalisant des captures vidéos à l'aide d'une caméra rapide. Les lignes de courant ainsi observées sont très similaires à celle visualisées par simulation numérique. Nous pouvons donc en déduire que les écoulements simulés numériquement représentent correctement des écoulements réels.

Ces essais expérimentaux n'ont pas permis de mettre en évidence des différences écoulements autour des halo A et B. Le protocole employé permet en effet de tirer des conclusions grossières. Il faudrait alors diminuer l'échelle des prises de vue et modifier la taille des filets de brume de pour espérer distinguer *de visu* des dissemblances entre les différents modèles de halo.

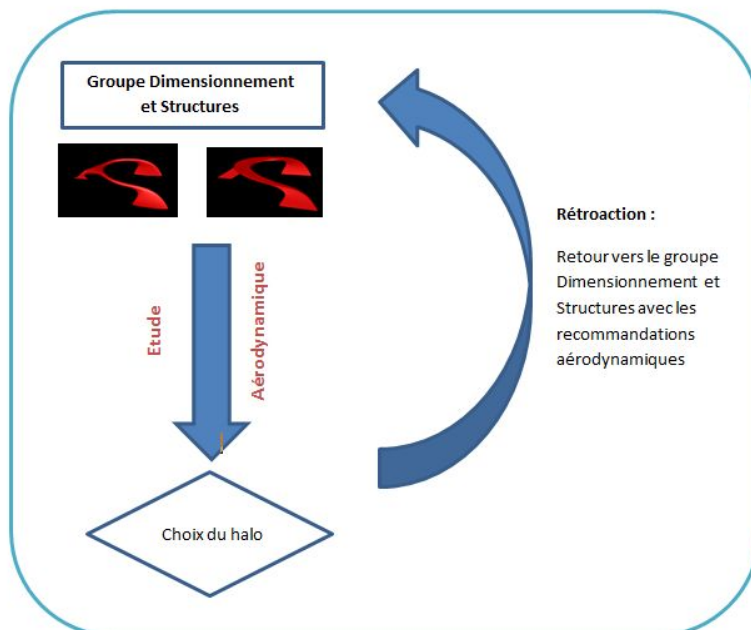
La visualisation des lignes de courant en soufflerie est aussi utile pour l'étude aérodynamique de la Formule 1 complète. La figure N détaille certaines caractéristiques de l'écoulement.

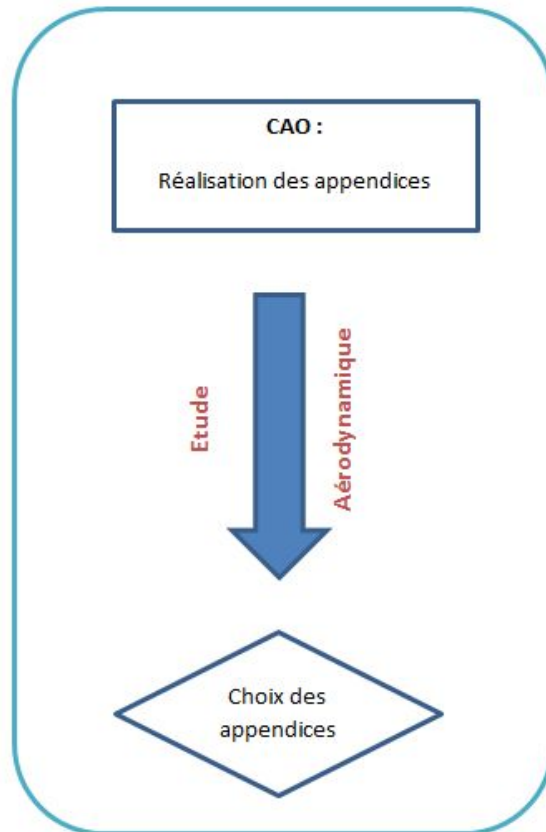


[figN] Écoulement autour de l'avant de la F1

Etude des halos et appendices

Déroulé de l'étude





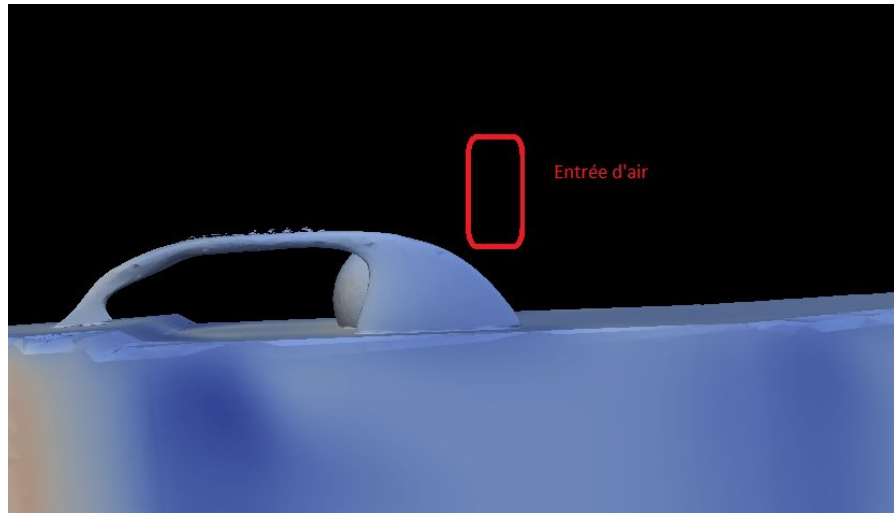
Critères d'analyse

Cette partie de l'étude se focalise sur l'étude du halo seul. Le modèle adopté est donc une forme simplifiée de Formule 1 sur lequel de l'air est envoyé de manière laminaire et frontalement, dans la configuration de course en ligne droite. Pour les deux plateformes, la forme et la F1 en entier, l'air arrive de façon **laminaire**. L'hypothèse retenue est que l'impact aérodynamique du halo est le même sur la forme que sur la vraie Formule 1. Ceci permet de réduire considérablement les temps de calculs, déjà très longs. Les écoulements à différentes vitesses et pour différents halos sont ensuite simulés.

Pour pouvoir comparer les performances aérodynamiques du halo seul avec le halo muni de ses appendices, il est nécessaire de pouvoir les comparer à taille de maillage comparable. Ensuite, le calcul numérique fournit une simulation sur 6s avec un pas de 0.05s. Il est possible de la visualiser sur un logiciel dédié (Paraview). On peut alors suivre l'évolution temporelle et accéder aux valeurs moyennes afin de qualifier et quantifier les écoulements afin de déterminer l'effet du halo.

La vitesse de simulation était de 100 m.s^{-1} , ce qui correspond à la vitesse d'une Formule 1 en ligne droite. En effet, c'est à cette vitesse que la qualité de la prise d'air moteur [fig] a le plus d'impact sur la performance. Le but est d'obtenir un air en surpression dans le moteur, ce qui

améliore son rendement (effet "ram"). Pour cela il faut que l'écoulement d'air à ce niveau soit le moins perturbé possible, c'est-à-dire le plus rapide et sans turbulence.



[fig] entrée d'air du moteur

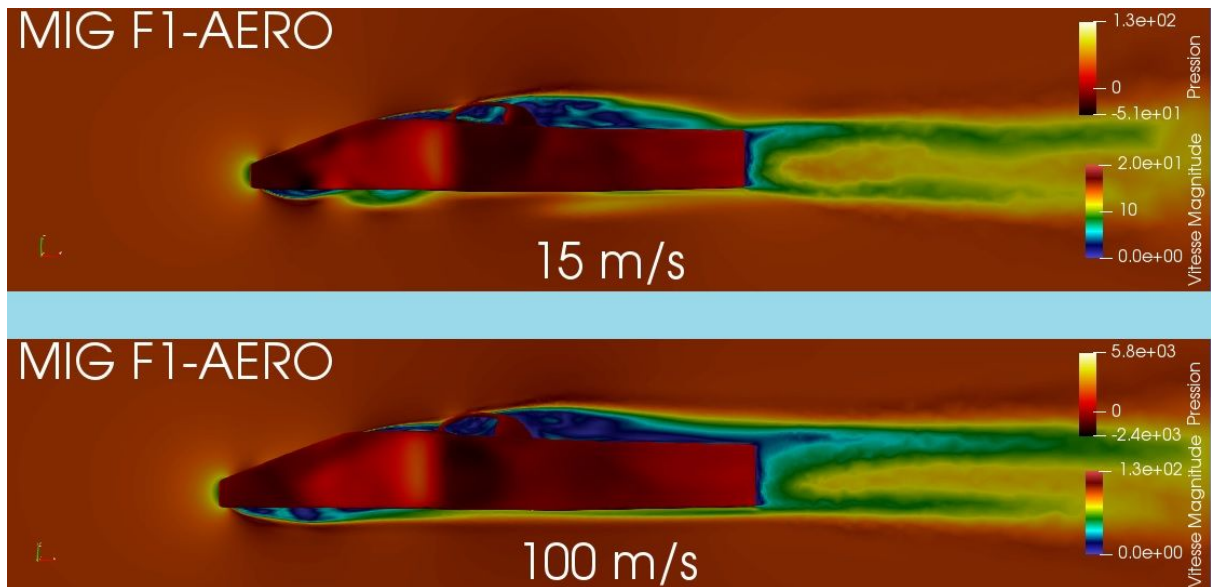
En revanche, certaines études ont été menées à des vitesses plus faibles (15 m.s^{-1}) pour pouvoir diminuer le temps de calcul. Pour pouvoir obtenir des écoulements sur une donnée durée, il faut discrétiser l'intervalle de temps avec un certain Δt , ici pris à $1/30$ e de seconde. Les résultats obtenus à chaque pas de temps sont donc des moyennes réalisées sur Δt . L'utilisation de vitesse trop élevée peut alors nuire au moyennage de ces résultats. De plus, l'écoulement d'air incident peut aussi devenir **turbulent** ce qui implique une modélisation différente.

Une étude comparative à 15 m.s^{-1} et 100 m.s^{-1} a confirmé l'impact de la variation de vitesse sur les résultats. En revanche, les différences entre les halos restent sensiblement les mêmes quelle que soit la vitesse.

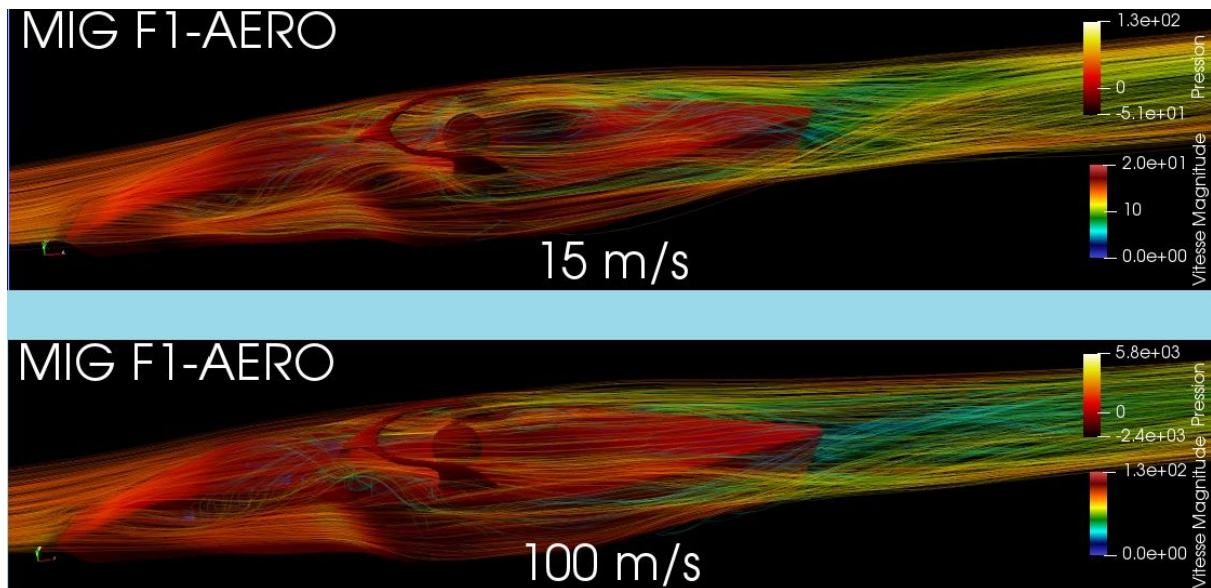
Influence de la vitesse

La vitesse a une influence sur la forme et les caractéristiques de l'écoulement. En effet, la traînée est plus importante et plus longue à grande vitesse, ce qui pénalise d'autant plus la monoplace et termes d'aérodynamisme. En revanche, la couche limite est moins haute à grande vitesse, mais se recolle plus tard. **[fig1]** Les tourbillons sont moins marqués à grande vitesse, mais sont plus irréguliers. **[fig2]**

On constate que les phénomènes observés à faible vitesse sont amplifiés à grande vitesse ; en revanche, des comparaisons entre différents halos à grande vitesse n'ont pas donné de résultats probants, ce qui permet de valider l'hypothèse que les différences de comportement entre les halos subsistent et restent inchangées quelle que soit la vitesse.



[fig1] Vue de profil pour le halo A et distribution de champ de vitesse



[fig2] Visualisation des lignes de courant pour le halo A

Pour étudier la **traînée** du halo, on observe l'écoulement de vitesse le long de la forme. Cette traînée est caractérisée par un coefficient C_d :

$$C_d = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2}$$

F_x représente la force de traînée dans la direction de l'écoulement

ρ représente la masse volumique du fluide

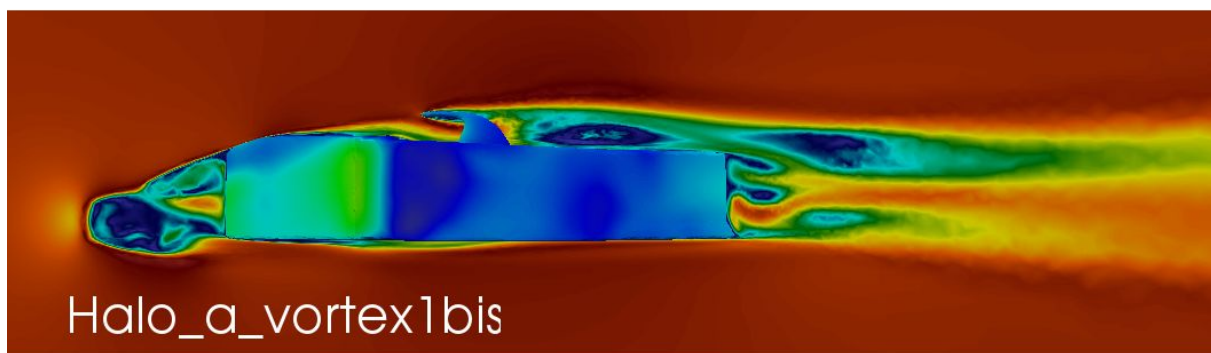
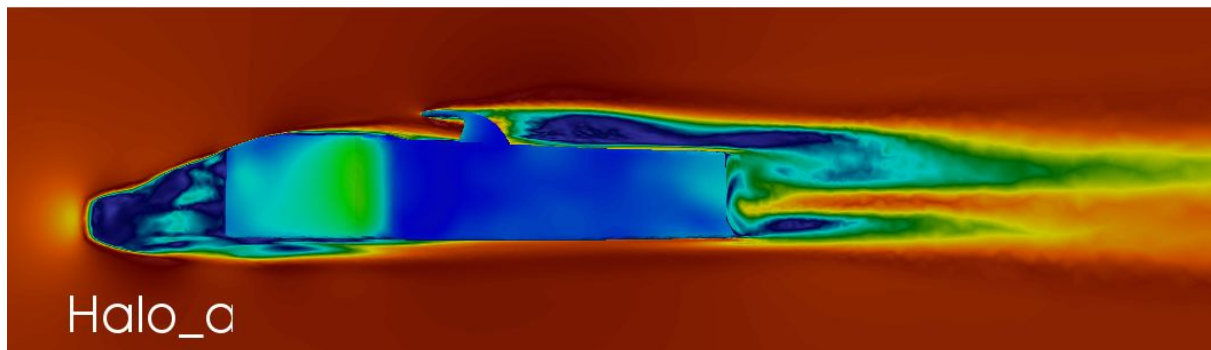
v représente la vitesse relative de l'objet dans le fluide

Pour diminuer la traînée, et donc C_d , il faut donc obtenir des vitesses élevées. Pour analyser la performance du dispositif sur la traînée, on compare donc les vitesses de

l'écoulement du fluide. Celui qui aura un cône de "vitesse faible" le plus restreint à l'arrière du halo sera le plus performant.

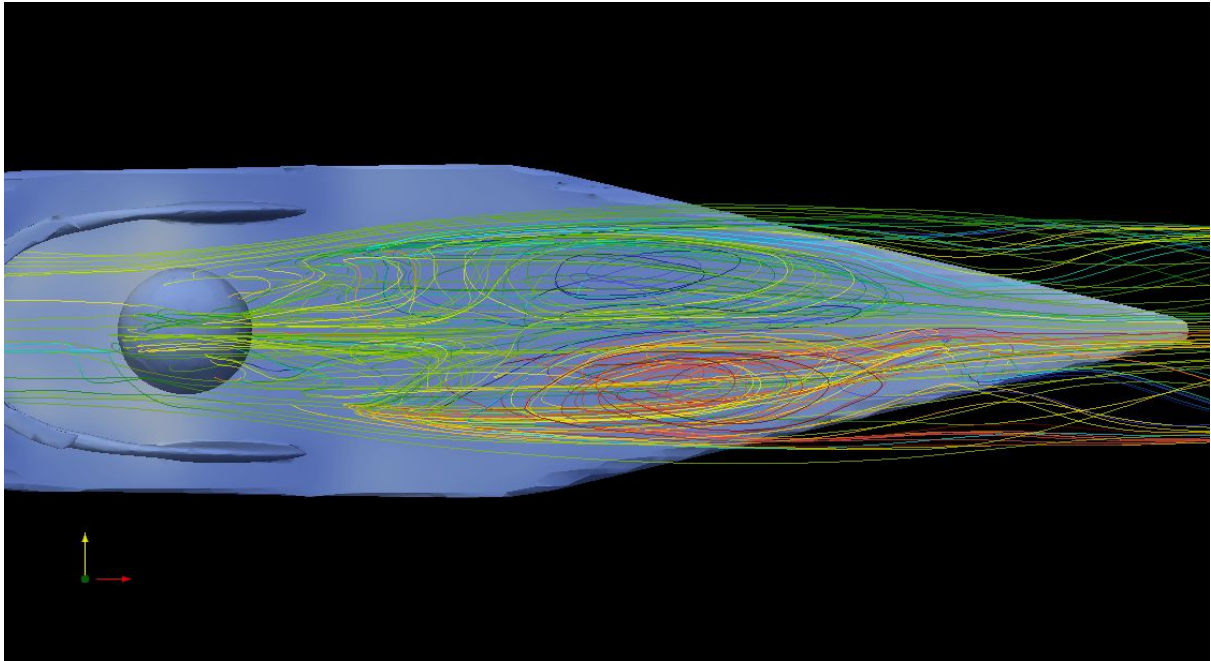
Ce cône traduit le décollement de la **couche limite** au niveau de la voiture. Il faut que celui-ci soit recollé le plus vite possible sur la forme.

Sur les simulations numériques, les couleurs les plus chaudes correspondent aux vitesses élevées [fig]. On cherche donc à minimiser le cône de couleurs froides qui suit le halo.



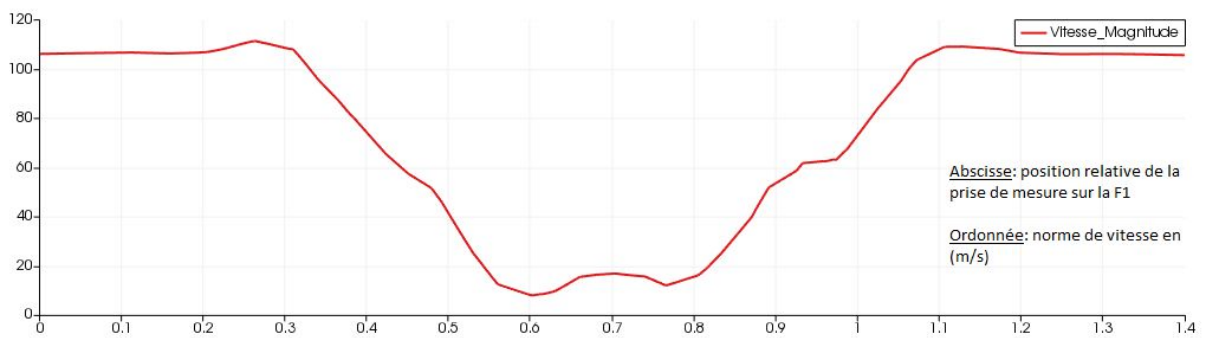
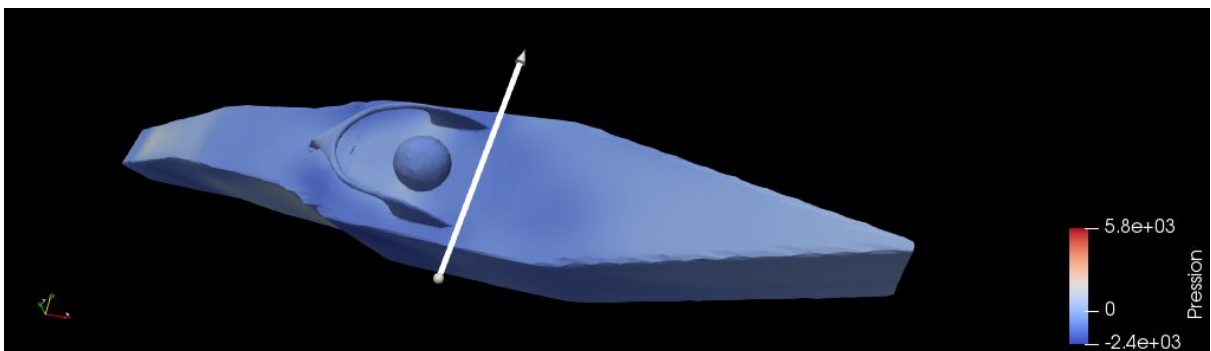
[fig] coupe longitudinale avec représentation de la vitesse de l'écoulement dans le plan

Pour étudier la qualité de l'air au niveau de l'entrée moteur, on regarde les lignes de courant (streamline) qui suivent le halo. Si l'on remarque des boucles de courant, cela signifie que le flux est structuré, donc plus intéressant des points de vue aérodynamique et thermodynamique. Si l'on ne peut reconnaître de structure d'écoulement, cela signifie que le flux est turbulent. Il perturbera alors l'aérodynamisme de la voiture, et ses performances seront donc diminuées, de même que le rendement de son moteur. On regarde aussi le taux de rotation sur les streamlines pour analyser la structure des flux [fig].



[fig] ligne de courant colorées par le taux de rotation

Pour étudier la norme de vitesse de l'écoulement d'air au niveau de l'entrée moteur, la fonction Plot Over Line de Paraview s'est avérée très efficace [fig]. Elle a permis de tracer sur une ligne physique la valeur de la norme de la vitesse de l'écoulement, ainsi que la pression au besoin.



[fig] étude de la norme de vitesse de l'écoulement

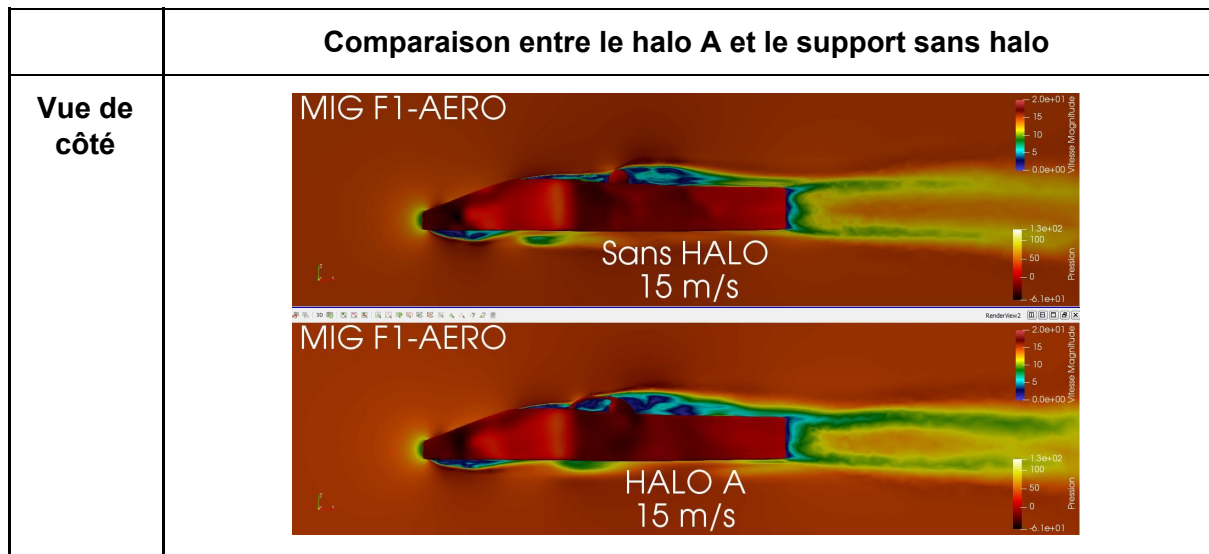
Comparaison Casque / halo A / halo B

Afin de mieux comprendre les perturbations induites par le halo, l'écoulement de l'air à faible vitesse (15 m.s^{-1}) autour de la forme a été simulé dans trois cas de figure : sans halo, et avec chacun des deux halos proposés.

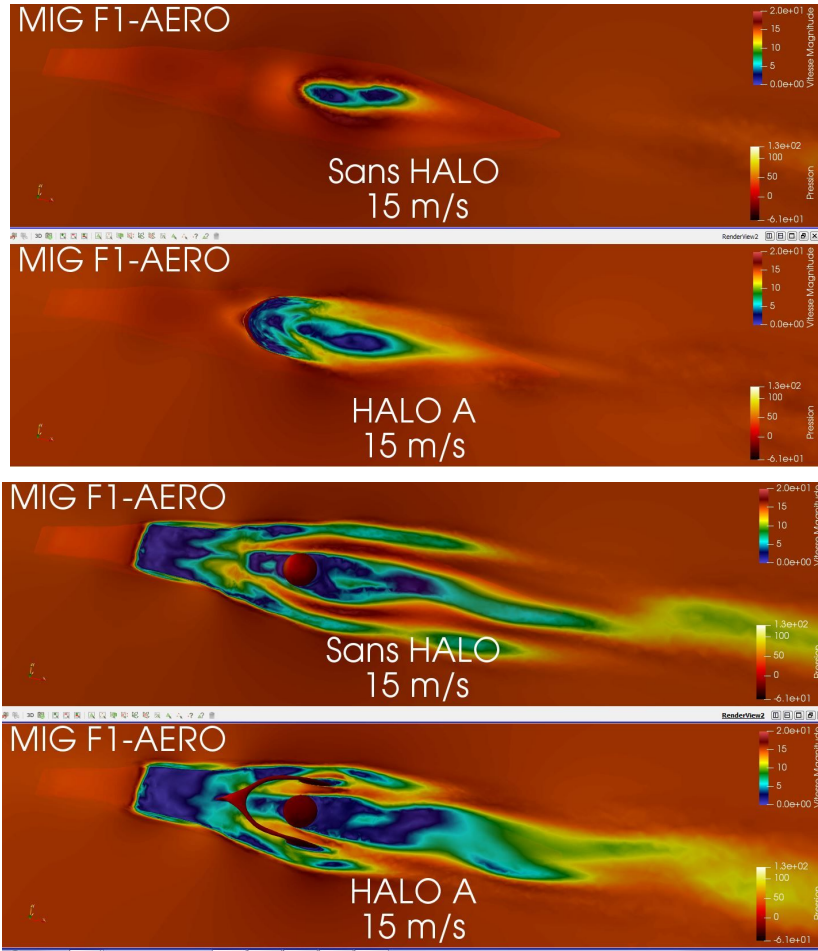
	halo A	halo B	Sans halo
Vue de côté	Flux d'air « raisonnable dans la figure du pilote » Sillage plus haut mais moins long et moins turbulent	Flux d'air important dans la figure du pilote Sillage moins haut mais plus long et plus turbulent Point d'arrêt sur la surface plate de jonction des trois parties du halo	Sillage beaucoup moins long et moins turbulent Couche limite autour du casque
Vue de dessus	Turbulences plus faibles	Turbulences assez fortes Forte traînée sur l'avant du halo	Sillage moins long et beaucoup moins haut. Pas de traînée trop importante sur le casque
Stream view	Turbulences derrière le	Très fortes turbulences	Écoulement autour

	casque. L'air s'engouffre en grande partie dans le halo	derrière le casque. L'air s'engouffre en partie dans le halo	du casque. Turbulences faibles à l'arrière.
--	---	--	---

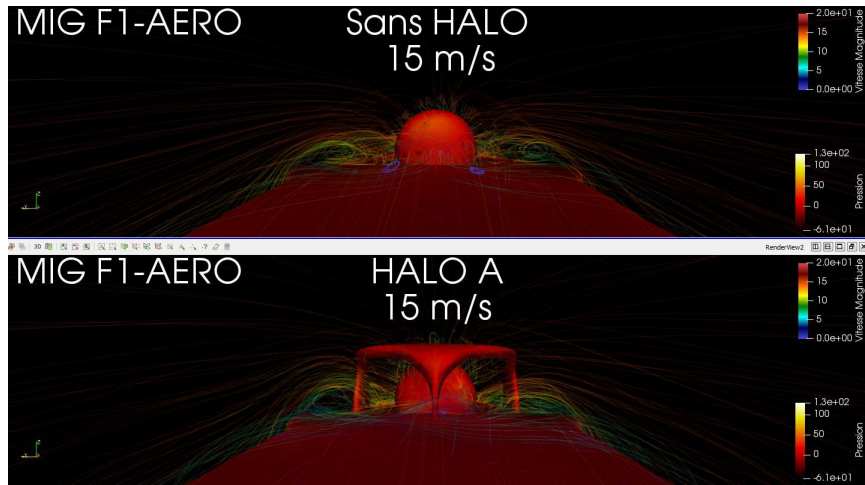
[tableau1] Caractéristiques marquantes des écoulements dans les différentes configurations

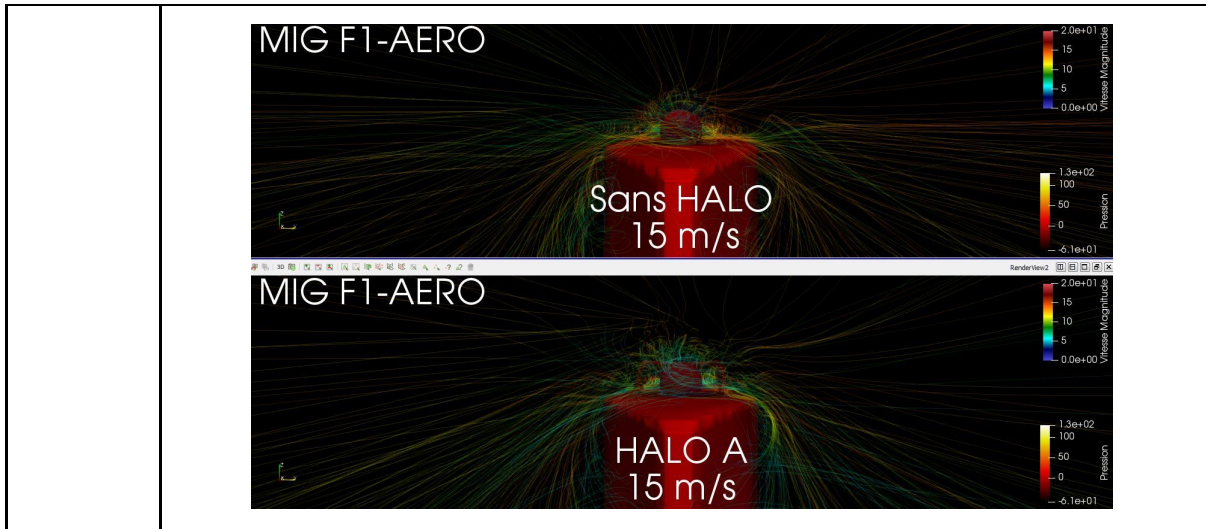


Vue de dessus



Stream view

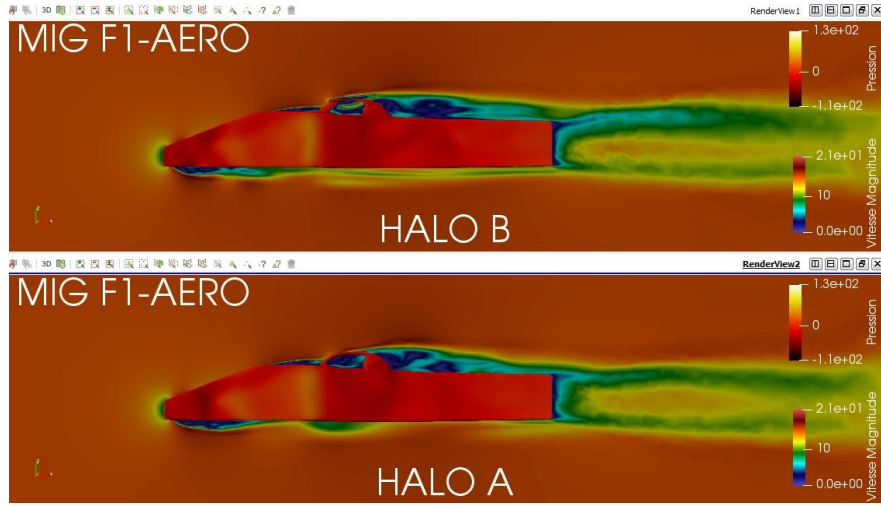




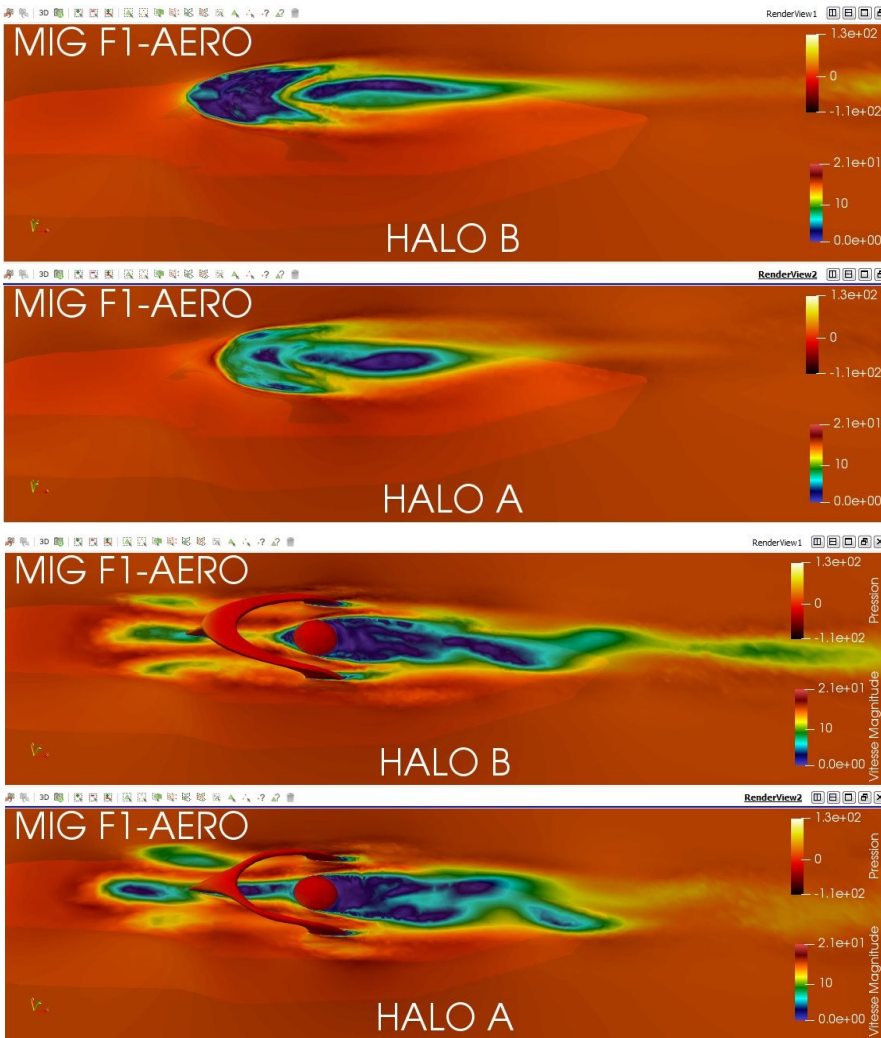
[tableau2] Comparaison entre le halo A et le support sans halo

Comparaison entre le halo A et le halo B

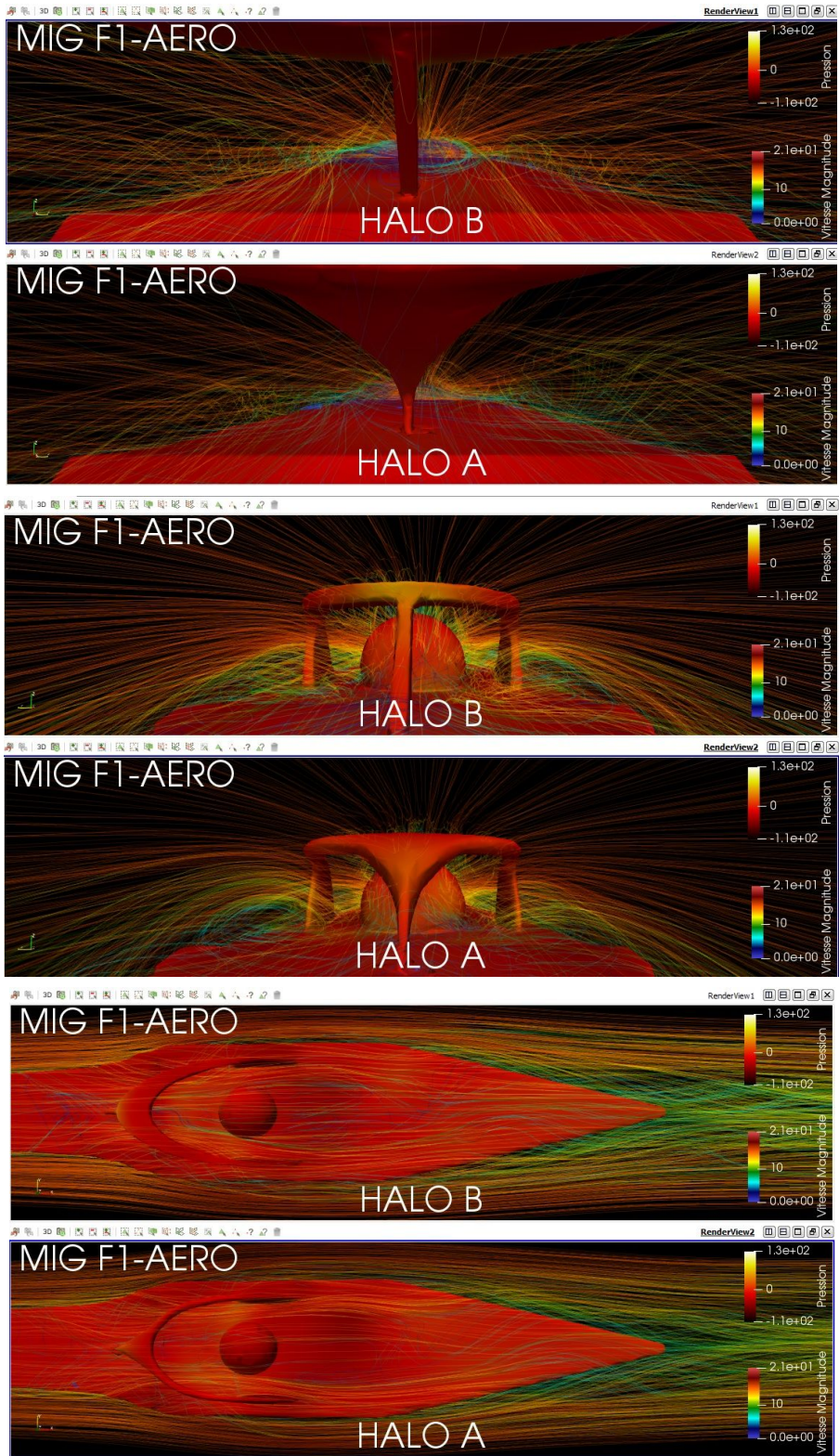
Vue de côté



Vue de dessus



Stream view



[tableau3] Comparaison entre les halos A et B

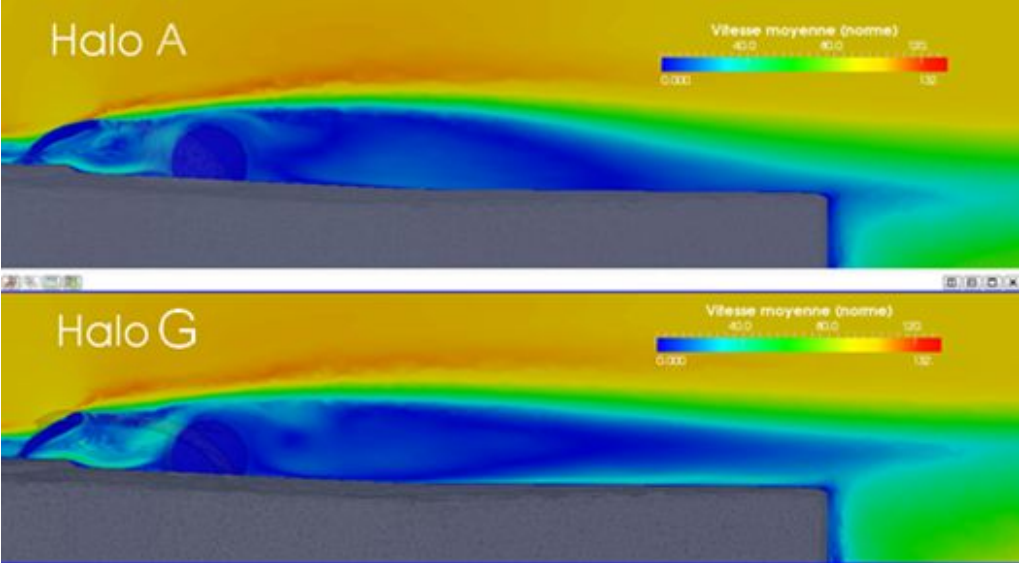
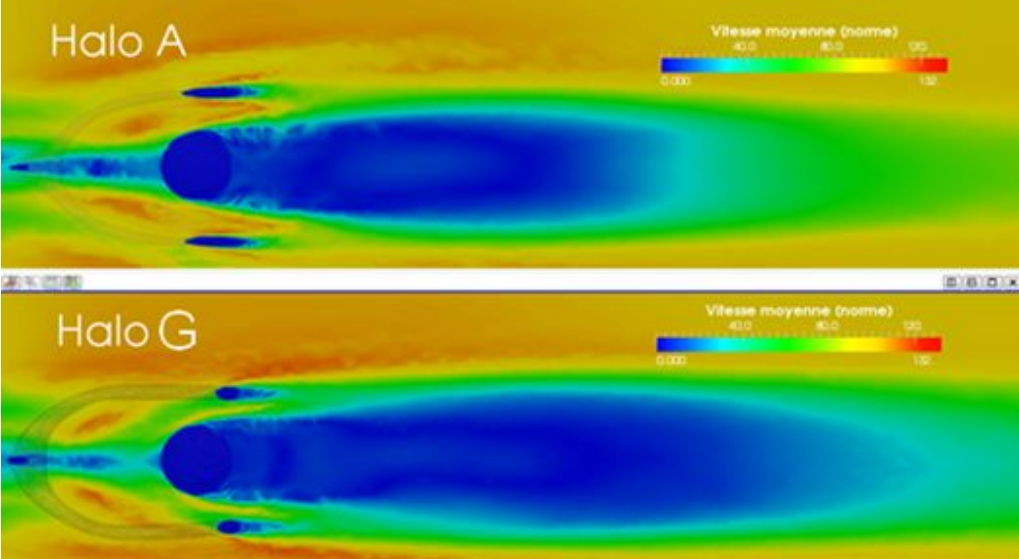
Grâce à ces simulations, il est possible d'appréhender les perturbations de l'écoulement induites par le halo. [tableau1] Il est possible de voir que la présence du halo ralentit l'air au niveau de la prise d'air moteur et décolle la couche limite, tout en augmentant la longueur de la traînée. [tableau2] La comparaison des deux halos permet d'affirmer que le halo A est meilleur que le halo B : en effet, l'air doit arriver dans la prise moteur à la pression la plus forte possible, et doit être le moins turbulent possible à l'arrière du véhicule. [tableau3] Le halo A est donc retenu et les appendices à ajouter pour améliorer l'aérodynamisme seront conçus pour s'adapter à ce halo. En effet, plutôt que de voir le halo uniquement comme une source de perturbations pénalisantes, il est judicieux de tenter de le percevoir comme une opportunité d'améliorer l'aérodynamisme du véhicule tout entier.

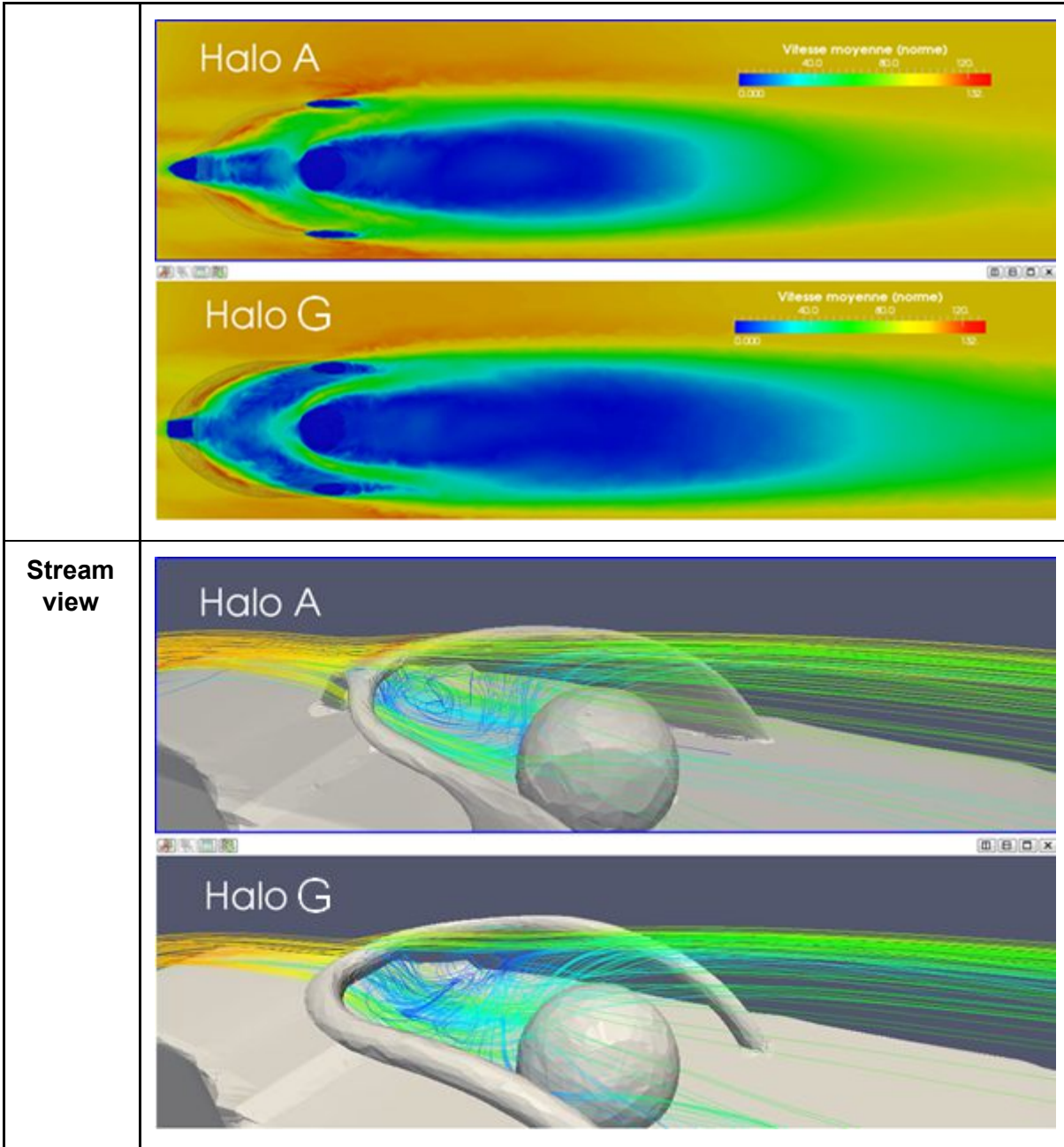
Dialogue avec le groupe dimensionnement des structures

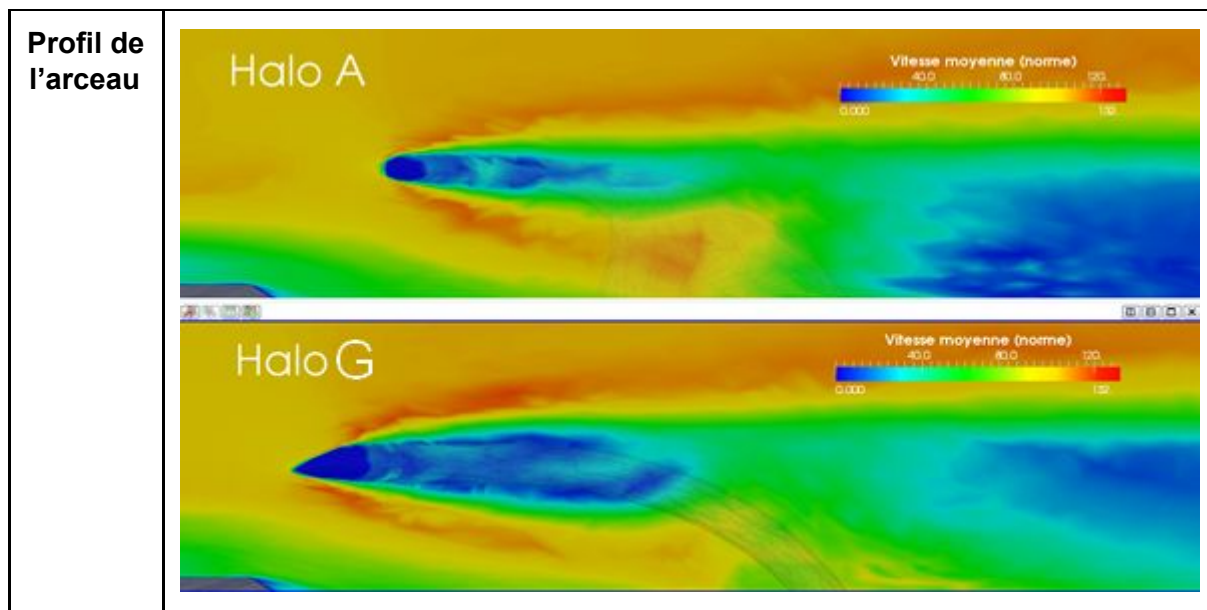
La comparaison des performances du halo A et du halo B a permis de mettre en exergue que certaines formes influent grandement sur l'aérodynamisme de la structure. Par exemple, la partie supérieure du halo B a un profil vertical, sur laquelle la pression est nettement plus importante et au niveau de laquelle la vitesse de l'écoulement est fortement ralentie. Ces deux caractéristiques ne sont pas souhaitables dans le cas du halo. Il convient donc de préférer une jonction chanfreinée comme dans le cas du halo A. Par ailleurs, le profil de l'arceau du halo doit être bien adapté afin de réduire au maximum la traînée en aval en choisissant par exemple une forme profilée (Streamlined Body, [fig XX]). Ces considérations ont été communiqués au groupe dimensionnement des structures afin qu'il puisse améliorer l'aérodynamisme du halo tubulaire qu'il avait conçu. Le résultat de ce dialogue sera désigné par la suite sous la dénomination "halo G". Il s'agit d'un compromis entre considérations aérodynamiques, contraintes structurelles liées au cahier des charges et possibilités d'usinage.

Shape	Drag Coefficient
Short Cylinder	1.15
Cube	1.05
Long Cylinder	0.82
Angled Cube	0.80
Cone	0.50
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Streamlined Half-body	0.09
Streamlined Body	0.04

[fig XX]

	<p align="center">Comparaison entre le halo A et le halo G pour une vitesse incidente de 100 m/s</p>
<p>Vue de côté</p>	 <p>The side view plots show the flow field around a curved surface. Halo A (top) displays a smooth, laminar-like flow with a thin boundary layer. Halo G (bottom) shows a more turbulent flow with a thicker boundary layer and a distinct wake region. Both plots include a color scale for 'Vitesse moyenne (norme)' ranging from 0.000 (blue) to 1.000 (red).</p>
<p>Vue de dessus</p>	 <p>The top view plots show the flow field from above. Halo A (top) displays a smooth, laminar-like flow with a thin boundary layer. Halo G (bottom) shows a more turbulent flow with a thicker boundary layer and a distinct wake region. Both plots include a color scale for 'Vitesse moyenne (norme)' ranging from 0.000 (blue) to 1.000 (red).</p>





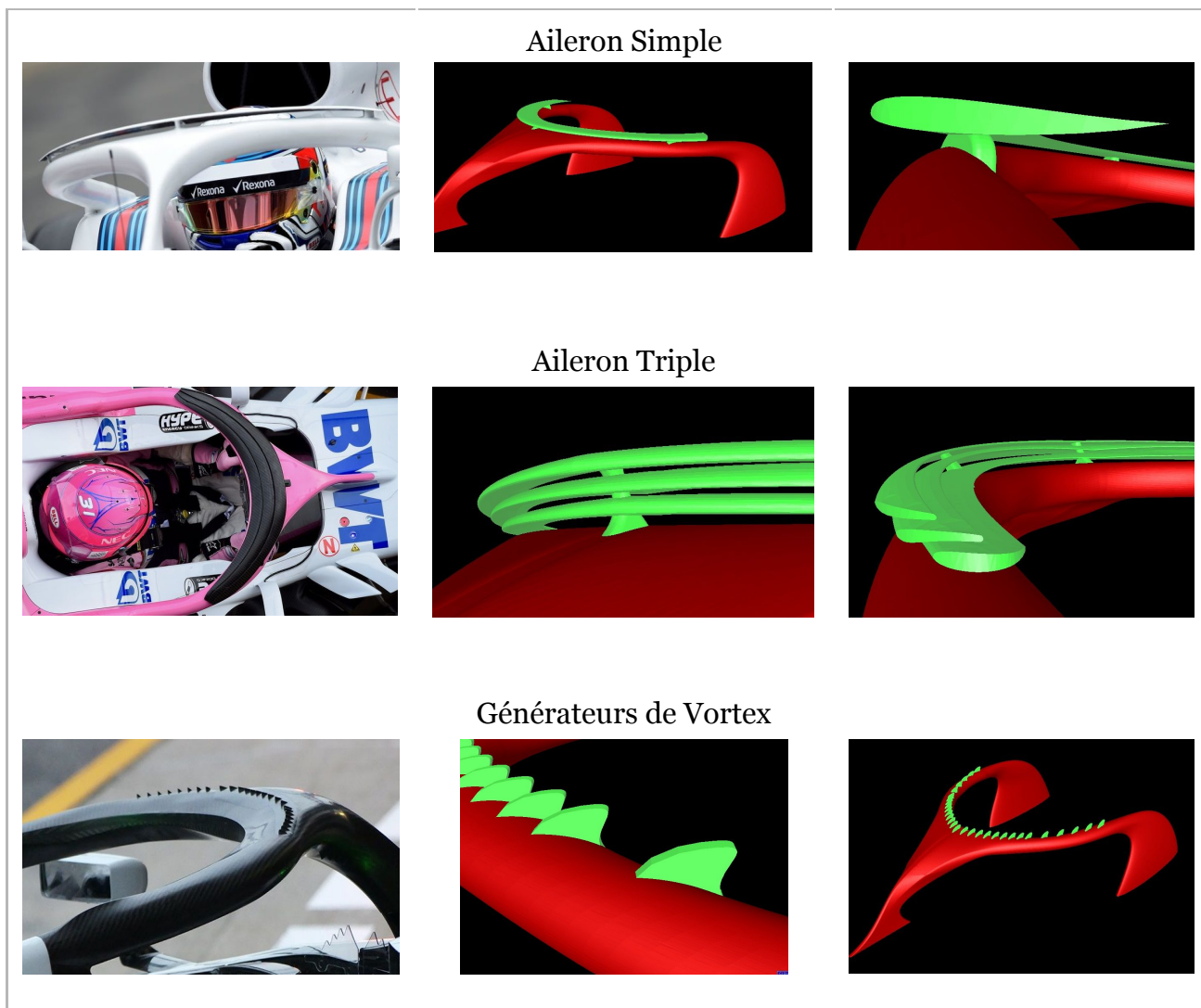
[tableau4] Comparaison entre le halo A et le halo G

Ces simulations permettent de mettre en évidence que l'écoulement d'air est plus perturbé en aval du halo G qu'en aval du halo A. Les images précédentes montrent en effet que les zones où la moyenne de la norme de la vitesse est faible (<20 m/s; zones bleu roi) sont plus étendues dans le cas du halo G. Cela signifie que ce dernier génère une force traînée plus importante. De plus, l'étude des lignes de courant (stream view) révèle la présence de tourbillons plus grands entre le halo G et le casque du pilote. Enfin, la dernière coupe prouve que le profil d'arceau le plus aérodynamique est celui du halo A. Cela peut résulter du fait que le profil du halo G est sensiblement plus épais. Le halo A est donc le plus performant, c'est donc sur celui-ci que seront étudiés les appendices.

Comparaison des différents appendices

Afin d'améliorer l'écoulement d'air en aval du halo, plusieurs écuries ont choisi d'y fixer des appendices de différentes formes. Nous avons repris cette démarche en concevant plusieurs appendices inspirés de modèles réellement utilisés. Plus précisément, trois formes distinctes ont été retenues : un aileron simple, un aileron triple et des générateurs de vortex. Le design de ces pièces sur un logiciel de CAO a nécessité une certaine technicité pour reproduire au mieux les géométries complexes que l'on rencontre sur les circuits. Nous avons testé ces différents appendices dans les configurations de l'étude du halo A afin de comparer leurs performances à celles d'un halo vierge.

Ci-dessous [tableau 5Y] figurent les modèles réels et ceux conçus pour les besoins de l'étude.



[tableau 5Y]

Aileron simple

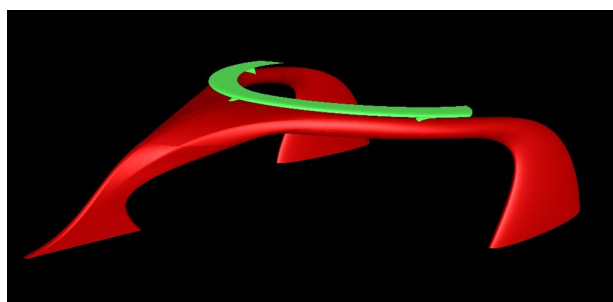


fig aileron simple

L'appendice ne permet pas de modifier de façon significative la traînée du halo et le flux d'air en aval. En revanche, il contribue à apporter un air plus structuré et à plus grande vitesse [fig] au niveau de la prise d'air.

Sur les figures suivantes, les couleurs chaudes correspondent à un taux de rotation négatif et les couleurs froides à un taux de rotation positif. On observe bien deux boucles de convection qui tournent en sens inverse dans le cas avec appendice [fig]. De plus ces boucles sont plus symétriques et longues dans le cas du halo modifié que celui non modifié. Les écoulements sont donc plus structurés derrière le halo avec l'appendice.

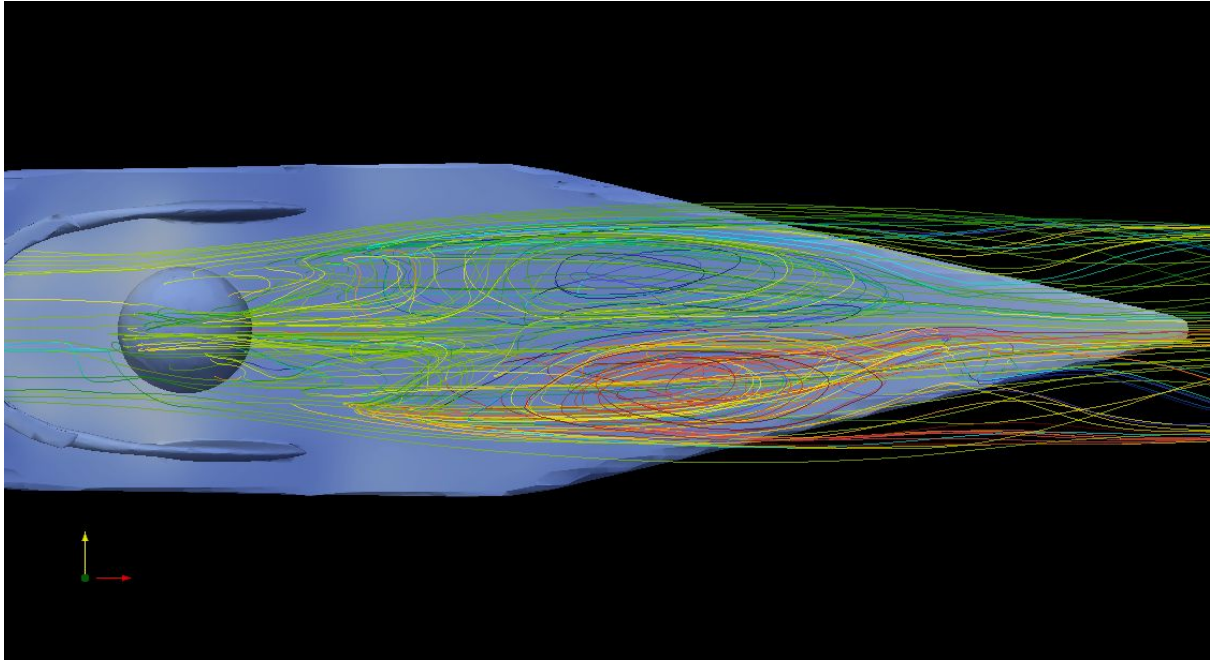


fig: streamline colorées par le taux de rotation sur le halo avec appendice.

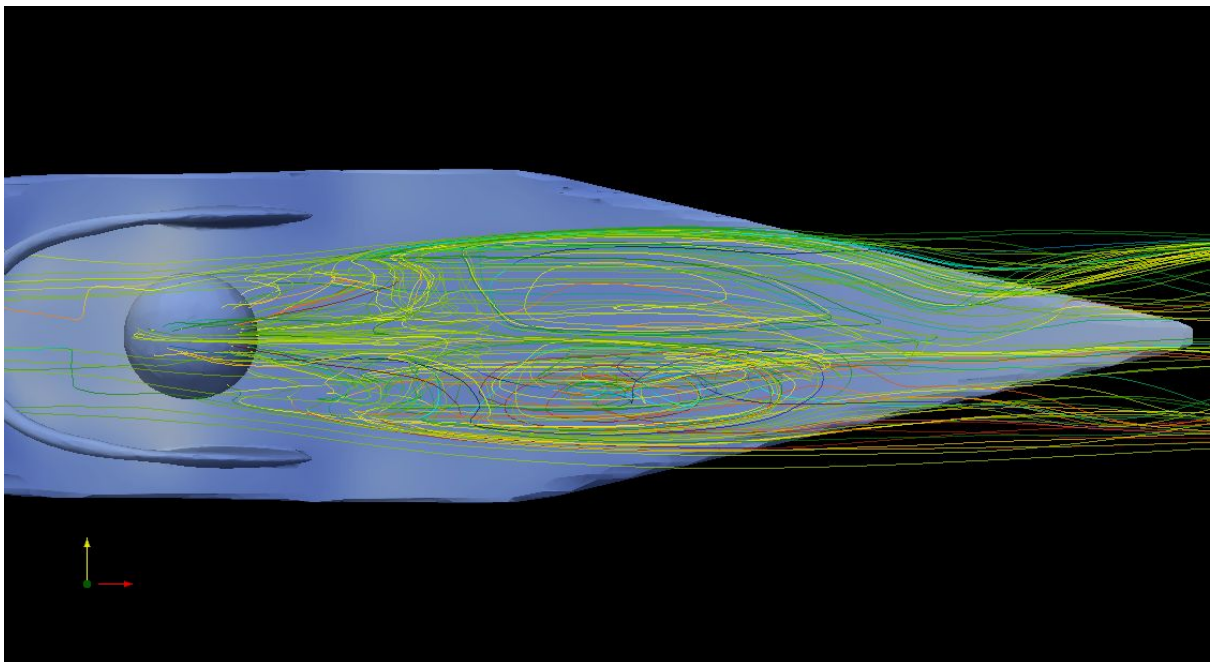
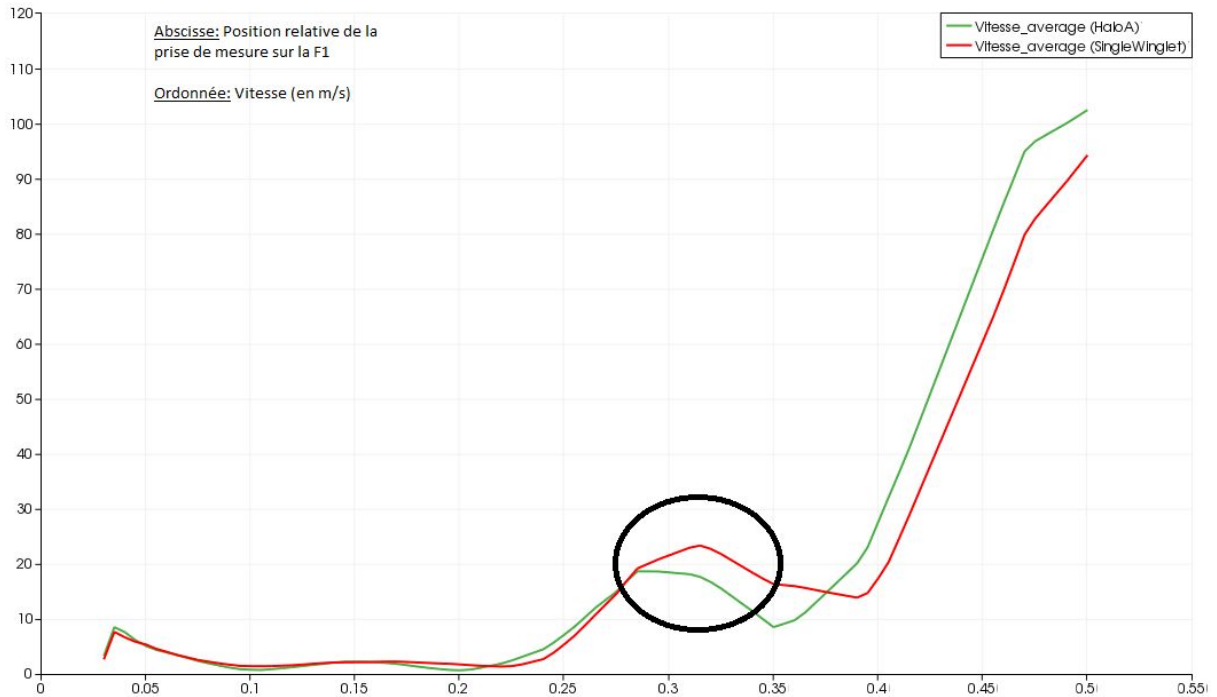


fig: streamline colorées par le taux de rotation sur le halo sans appendice.

On remarque qu'au niveau de la position à 0.3 sur le graphique, qui correspond à la prise d'air du moteur, la norme de vitesse est beaucoup plus importante dans le cas du halo avec appendice.



[figure] vitesse en fonction de la position

Aileron triple

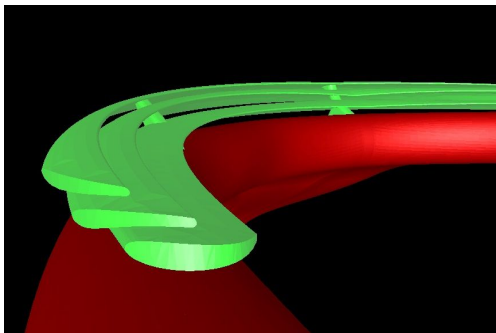
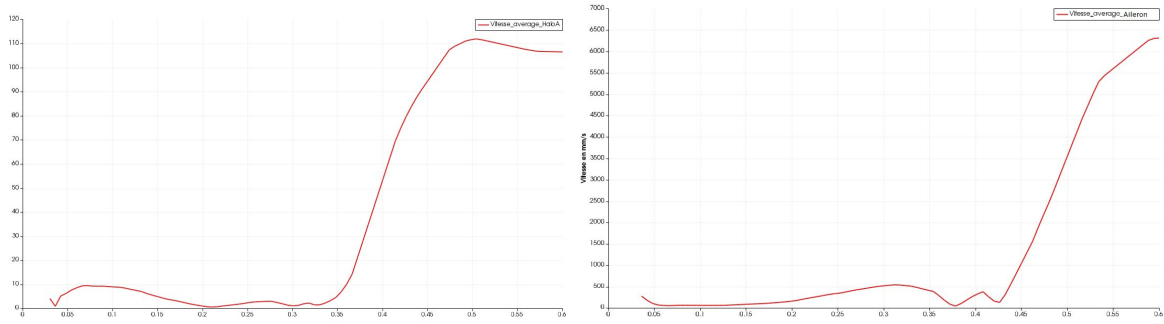


fig aileron triple

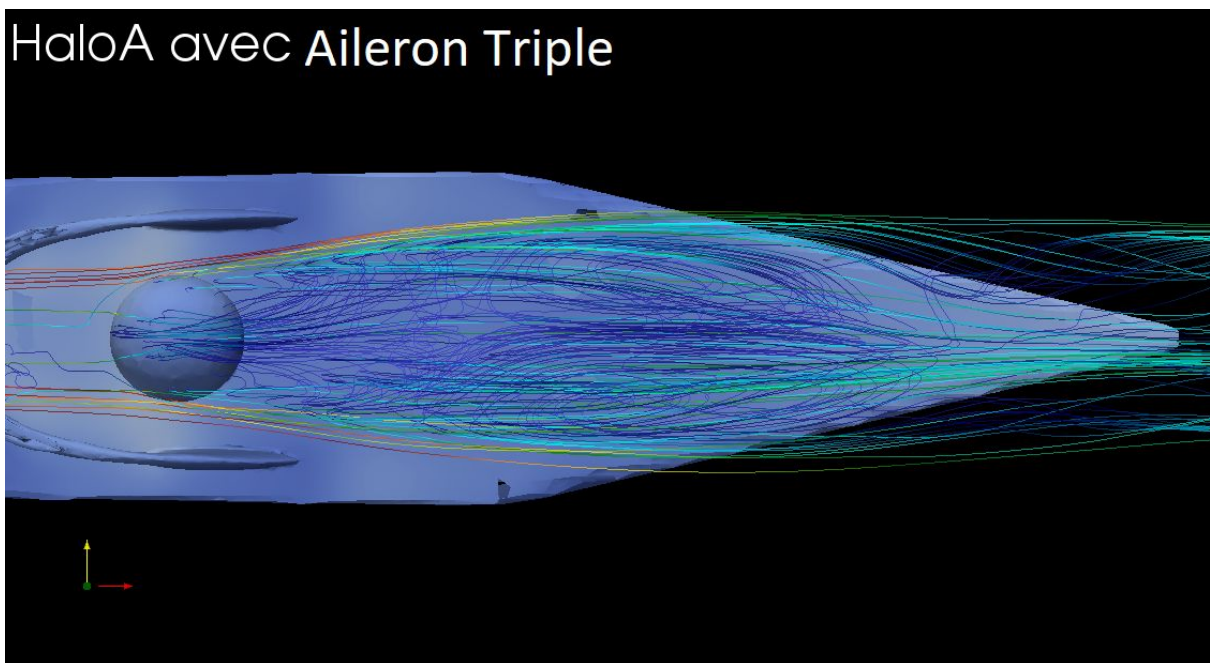
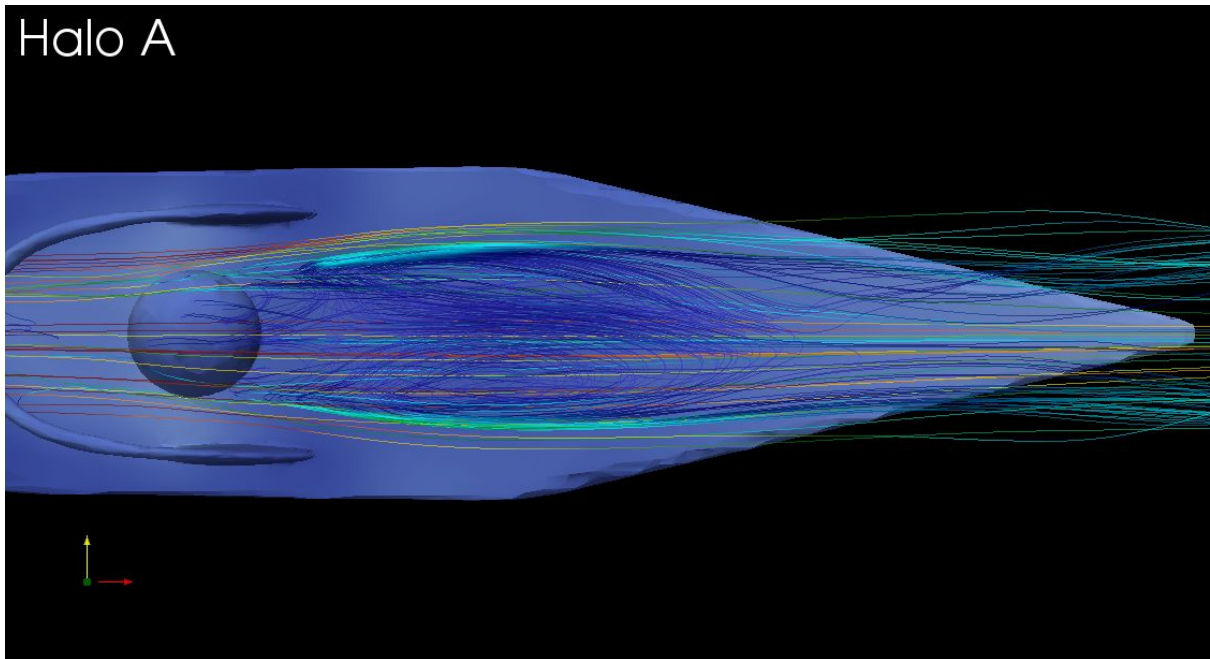
L'appendice aileron triple ne permet pas de diminuer de façon significative la traînée. L'air obtenu au niveau de la prise d'air du moteur est de norme de vitesse plus importante mais le flux est moins structuré.

On remarque qu'au niveau de la position à 0.3 sur le graphique [fig], qui correspond à la prise d'air du moteur, la norme de vitesse est plus importante dans le cas du halo avec appendice.



[fig]

En revanche le flux est plus déstructuré dans le cas du halo avec appendice [fig].



Générateurs de vortex

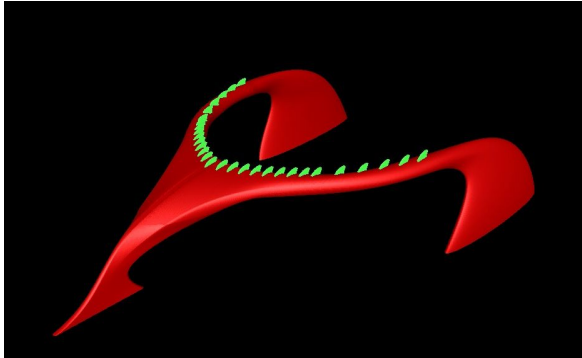
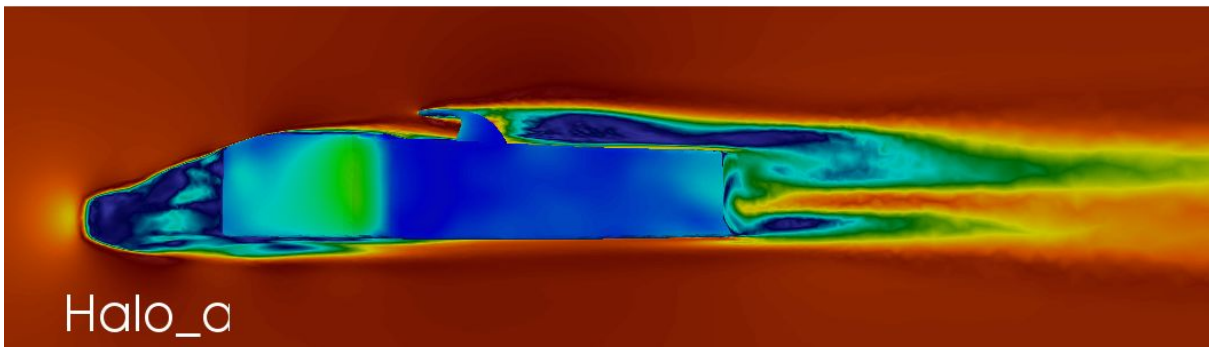


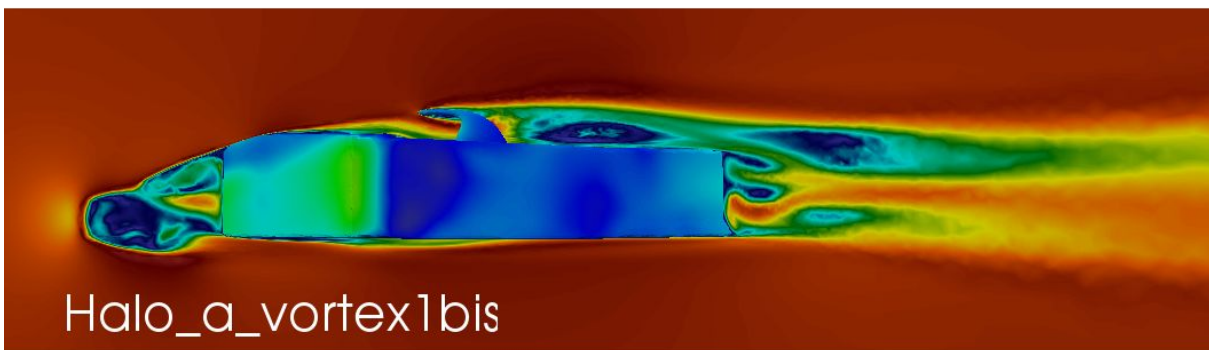
fig vortex

L'appendice ajouté vise à créer des petits vortex juste derrière le halo. Il permet de réduire la traînée à l'arrière du halo et à obtenir un flux d'air propre plus rapidement [fig vortex]. En revanche, il contribue aussi à diminuer la vitesse de l'écoulement au niveau de l'entrée d'air [fig], ce qui est un effet indésirable.

Les générateurs de vitesse permettent d'obtenir une traînée plus restreinte [fig coupe].



Halo_a



Halo_a_vortex1bis

fig coupe en vitesse

En revanche la norme de vitesse de l'air au niveau de l'arrivée moteur est plus faible dans le cas du halo avec appendices que dans celui du halo simple [fig].

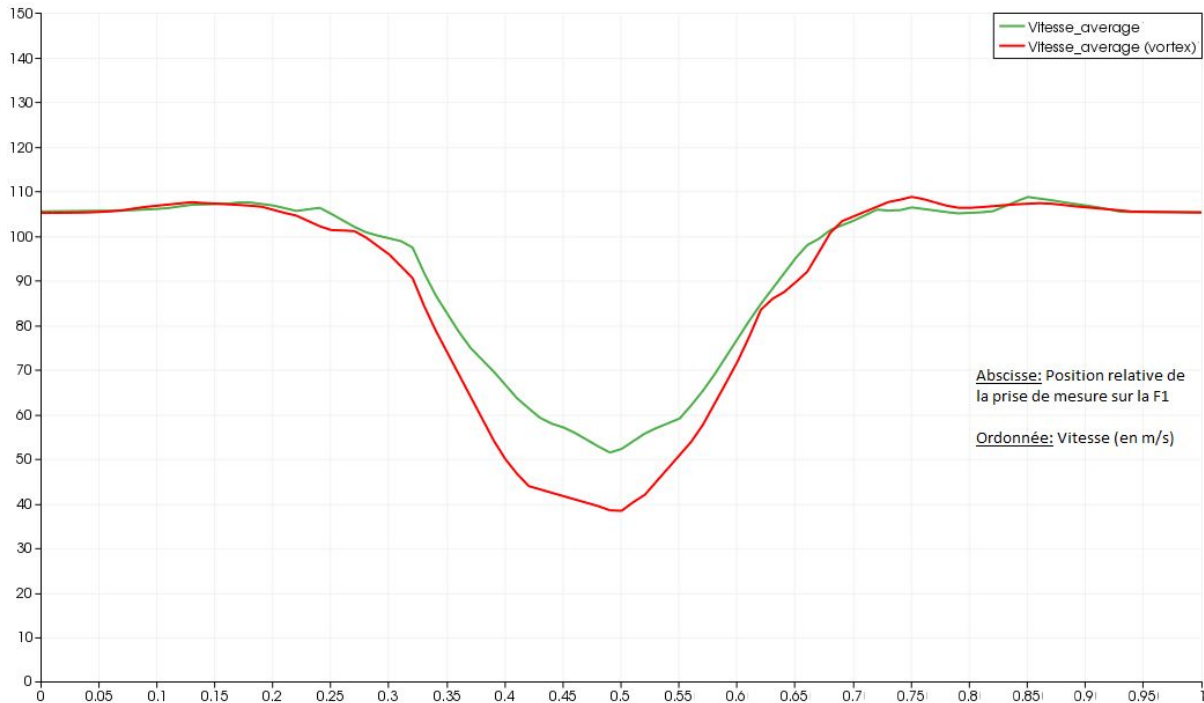
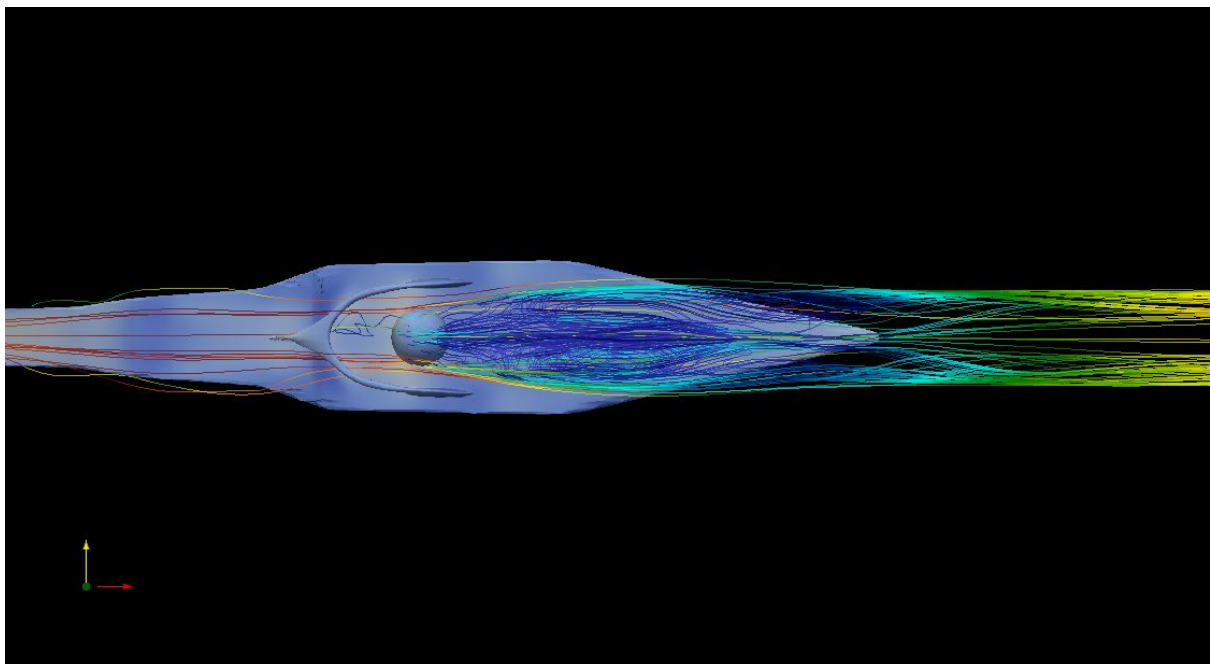
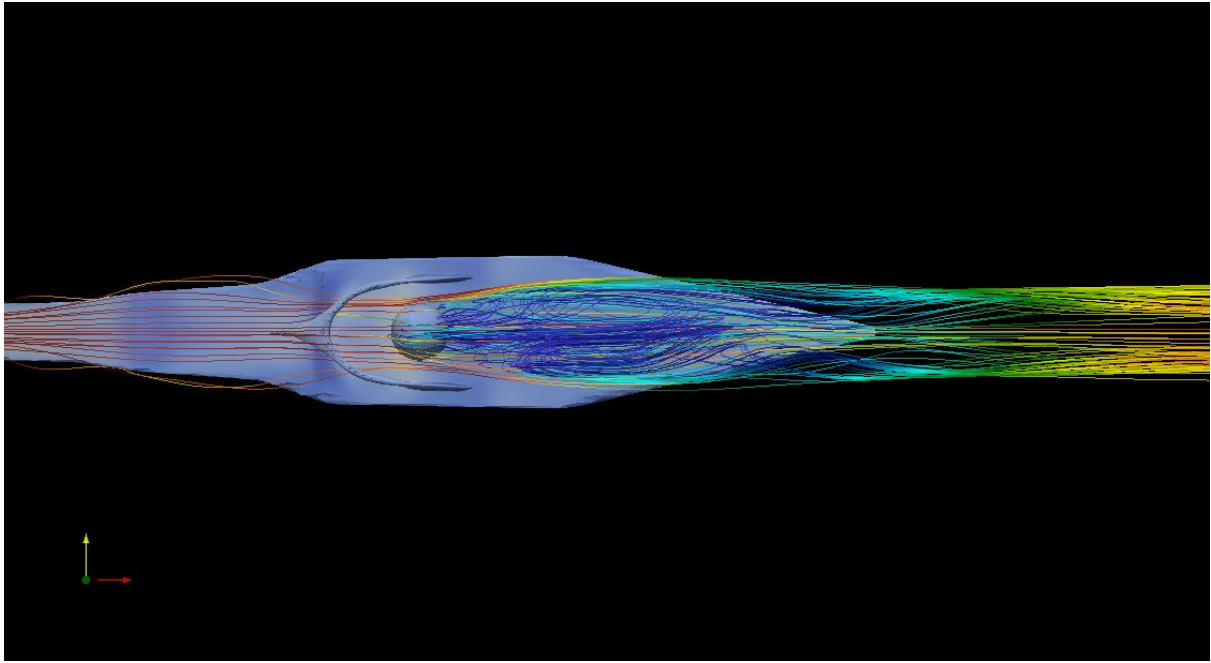


fig vitesse en fonction de la position

De plus, l'écoulement est plus structuré [fig] avec le halo doté d'appendices. Les boucles de convection sur la partie arrière de la forme sont plus distinctes avec les vortex. Puis, à l'arrière de la forme, le flux est scindé pour le halo simple et moins rassemblé qu'avec le halo avec vortex. En revanche, la traînée au niveau de l'entrée moteur est plus large sur l'entrée d'air avec les générateurs de vortex. Une piste d'amélioration serait de jouer sur l'inclinaison et la disposition de ces générateurs pour centrer l'écoulement resserré sur l'entrée moteur.



[fig] halo simple



[fig]ligne de courant pour le cas du halo avec vortex

Conclusion

Cette étude approfondie a permis de mettre en exergue l'impact de l'ajout d'un halo sur une monoplace de Formule 1. Après avoir confirmé que la turbulence de l'écoulement et la traînée étaient augmentées, les diverses simulations ont donné lieu au choix d'une forme de halo parmi plusieurs proposées. Des expérimentations physiques sont venues confirmer ces résultats. La deuxième partie de l'étude a ensuite porté sur l'optimisation de cette forme : de contrainte, le halo est devenu opportunité, en rendant possible l'ajout d'appendices améliorant l'aérodynamisme de la voiture

D. Aérodynamisme de la formule 1

1. Contexte de l'étude

L'étude se porte maintenant sur une voiture de Formule 1 complète : le groupe a relevé le défi de rester fidèle à sa géométrie extrêmement complexe. Une méthode **CFD** (Computational Fluid Dynamics) novatrice de simulation numérique multi-échelle des écoulements a été utilisée. Le groupe s'est mis dans la peau d'ingénieurs : nous sommes parti d'une forme imposée basique de Formule 1, nous avons étudié le comportement global des flux d'air, puis nous avons cherché à optimiser la voiture selon trois critères qui sont ceux des ingénieurs en Formule 1 :

- 1- **Générer** un maximum d'**appui** (aussi appelé **déportance**) afin de plaquer la voiture au sol pour aller le plus vite possible en virage.
- 2- **Minimiser** l'effet de la **traînée** (force qui s'oppose au mouvement de la voiture). Elle dépend de la résistance de la voiture à la pénétration dans l'air.
- 3- **Refroidir** certaines pièces comme par exemple les disques de frein ou le moteur, et donc s'assurer de la qualité de l'air pénétrant la voiture.

Nous partons d'une Formule 1 basique (**Figure 1.0**), et de deux formes basiques de Halo pour nos premières simulations ainsi que deux Halos simples (**Figure 1.1** et **Figure 1.2**)

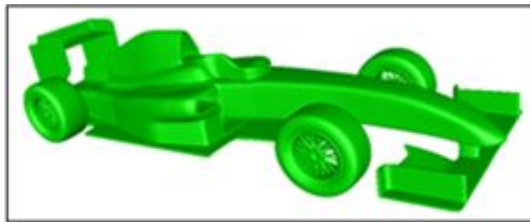


Figure 1.0 : Formule 1 basique



Figure 1.1 : Halo A

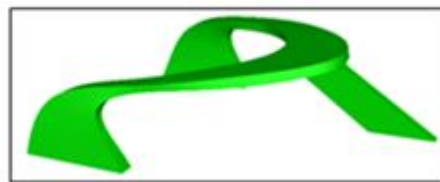
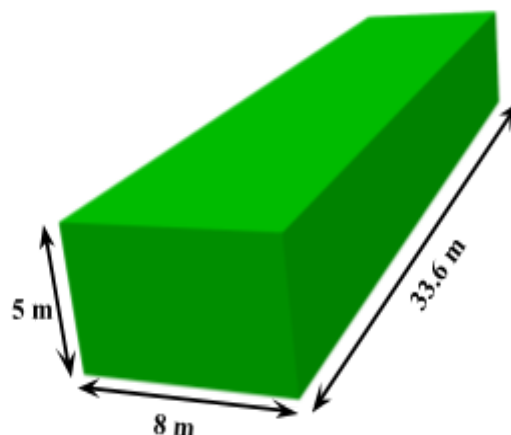


Figure 1.2 : Halo B

Nous avons créé une soufflerie numérique sur le logiciel **GLPre** au sein de laquelle les écoulements d'air seront visualisés (**Figures 1.3** Et **1.4**) :

Figure 1.3 : Visualisation de la soufflerie numérique



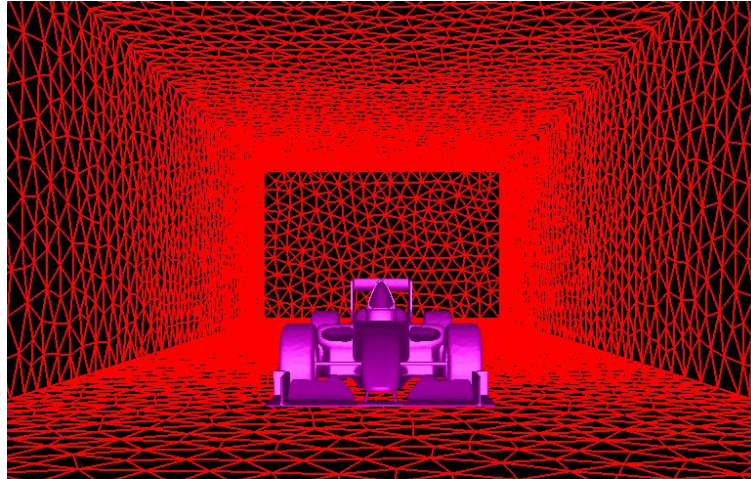


Figure 1.4 : Représentation de l'intérieur du domaine de calcul

On discrétise ensuite tout l'espace à l'intérieur de la soufflerie en le maillant à différentes échelles selon les zones d'intérêt, ce qui correspond ici à 2 millions de points soit $2 \times 4 = 8$ million d'inconnus à déterminer (trois inconnues pour le vecteur vitesse et une pour la pression). Notre groupe a profité d'un processeur de plus de 2000 cœurs pour faire tourner les calculs (chaque calcul utilisant 40 cœurs, jusqu'à 80 pour les plus coûteux, plusieurs calculs pouvant être lancés en parallèle). Le maillage multi-échelle est visualisé **Figure 1.5** avec le logiciel de post-traitement Paraview :

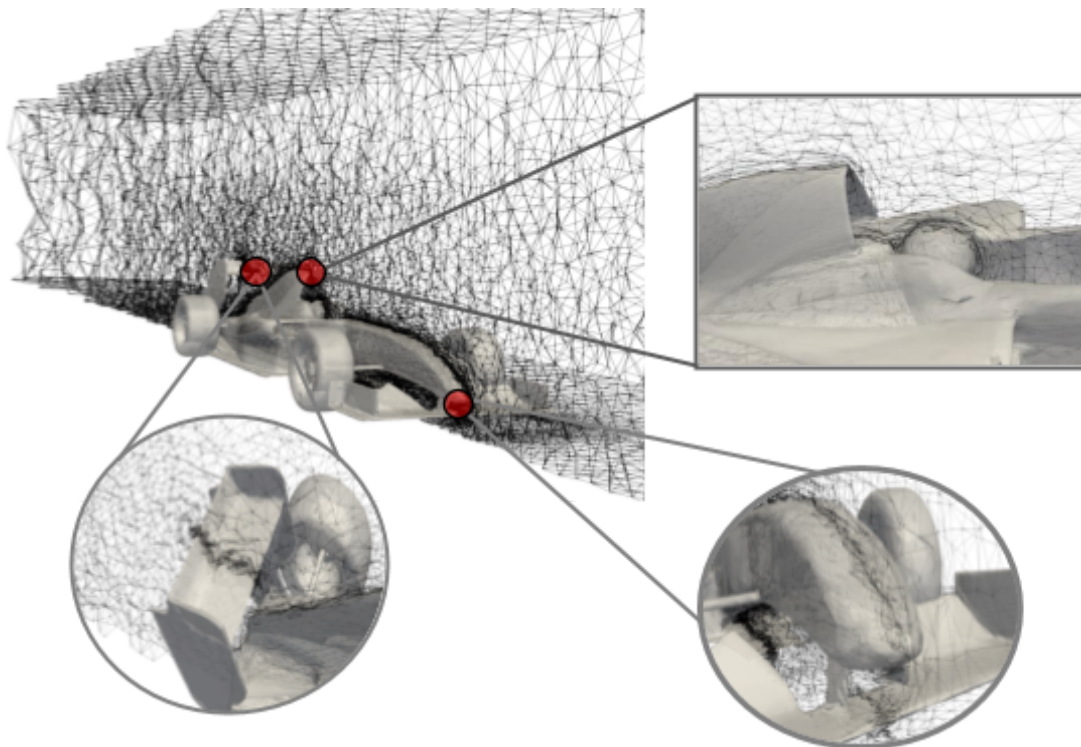


Figure 1.5 : Visualisation du maillage multi-échelle

1. Premières analyses et influence du Halo

Nous avons choisi un flux d'air incident s'écoulant à 50 m/s que nous représentons par ses lignes de courant. Nous avons en premier lieu tenter de confirmer ou infirmer le choix de nos camarades quant à l'utilisation du Halo A et non du Halo B.

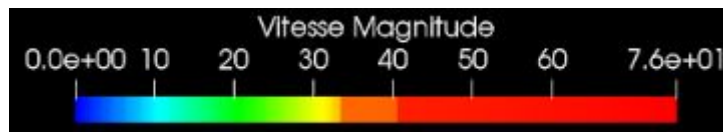


Figure 1.6 : Echelle des vitesses représentées sur les écoulements (en m/s)

La vitesse de l'écoulement d'air est visible en chaque point de la ligne de courant par sa couleur, selon la légende ci-dessus (**Figure 1.6**).

Nous représentons **Figure 1.7** et **Figure 1.8** les lignes de courant s'écoulant à travers les deux Halos :

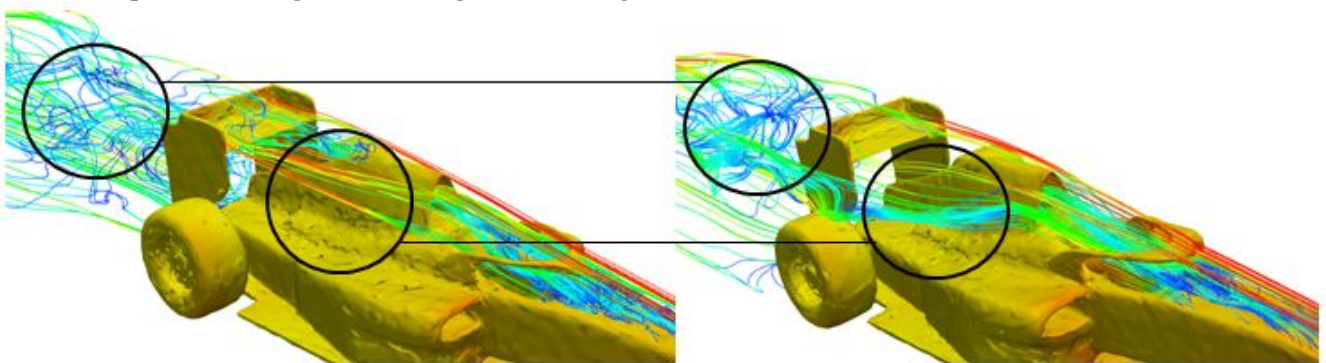


Figure 1.7 : F1 basique avec Halo A

Figure 1.8 : F1 basique avec Halo B

Nous avons noté qu'au premier abord les effets des deux Halos semblent similaires : ils ralentissent tous deux l'écoulement et créent des turbulences visibles à l'arrière de la voiture, augmentant la force de traînée. Néanmoins, le Halo A semble moins dévier le flux incident d'air, favorisant la déportance au niveau de l'aileron arrière.

De plus, nous avons représenté **Figures 1.9** et **1.10** la partie du flux d'air qui passe au niveau du halo et de la tête du conducteur. Nous remarquons que le conducteur d'une voiture équipée du Halo A reçoit un flux d'air moins intense qu'une voiture équipée du Halo B, améliorant son confort lors de la conduite :

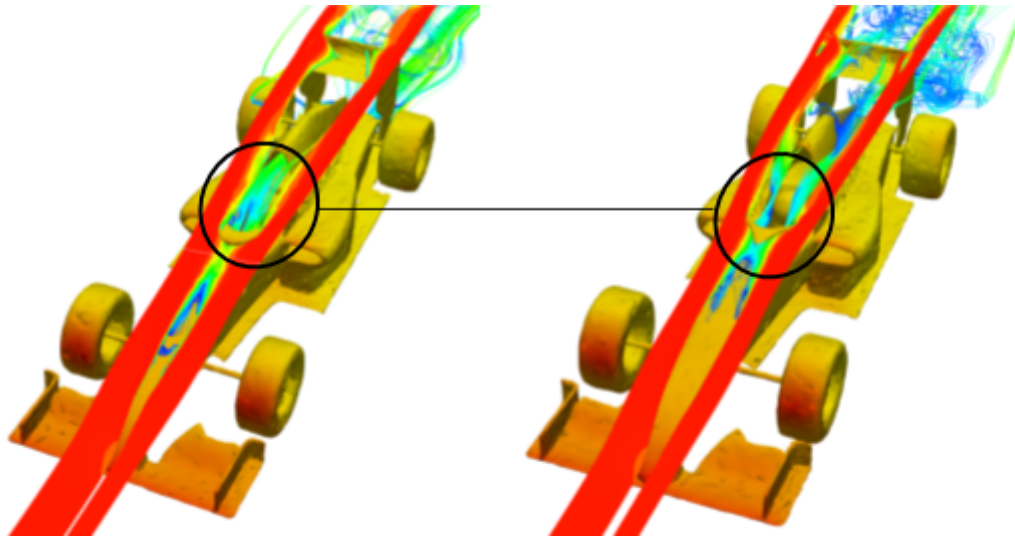


Figure 1.9 : F1 équipée du Halo B

Figure 1.10 : F1 équipée du Halo A

Nous avons ensuite effectué des simulations d'écoulement sur la F1 (avec le Halo A et sans). Ils mettent en évidence les nombreux défauts aérodynamiques de la Formule 1 non-améliorée, même sans Halo, représentés (**Figures 1.11 et 1.12**) :

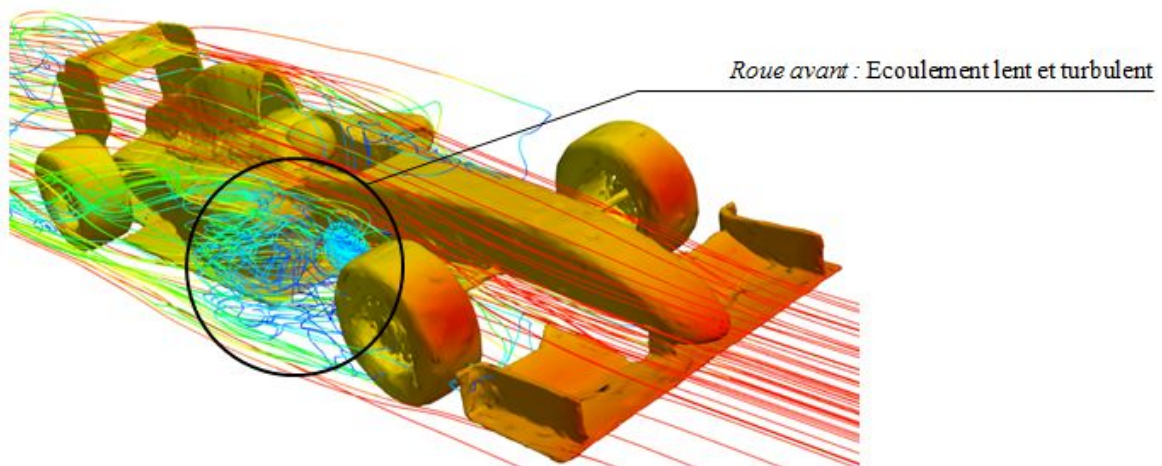


Figure 1.11 : Visualisation des défauts à l'avant de la F1 sans halo

Nous avons remarqué que les roues rendent l'air particulièrement **turbulent** (voir Lexique) et le ralentissent. L'efficacité aérodynamique de certaines pièces de la voiture est ainsi fortement amoindrie : la forme aérodynamique du châssis perd son intérêt lorsqu'il reçoit de l'air sale (turbulent ou lent).

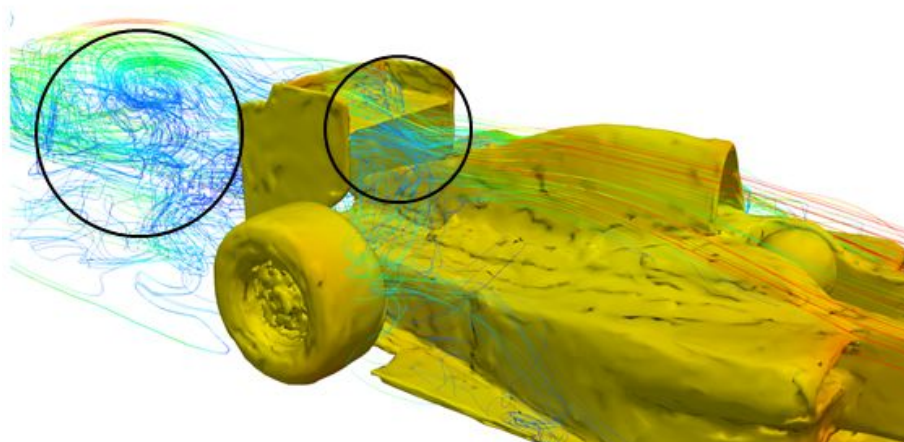


Figure 1.12 : Visualisation des défauts à l'arrière de la F1 sans halo

De même l'aileron arrière reçoit presque exclusivement de l'air lent et turbulent, notamment à cause de l'action de la roue arrière. Son effet déportant est alors fortement réduit et la traînée augmente. En effet, on observe à l'arrière de l'aileron un flux d'air lent et non-directionnel (**Figure 1.12**).

Nous avons ensuite étudié l'impact de la présence d'un Halo sur la voiture (**Figure 1.13**). Nous remarquons qu'il réduit l'efficacité de l'aileron arrière (flux d'air incident plus lent et moins important) (1), augmente la quantité d'air ralenti dans l'entrée d'air arrière du moteur (2), et augmente la traînée (3).

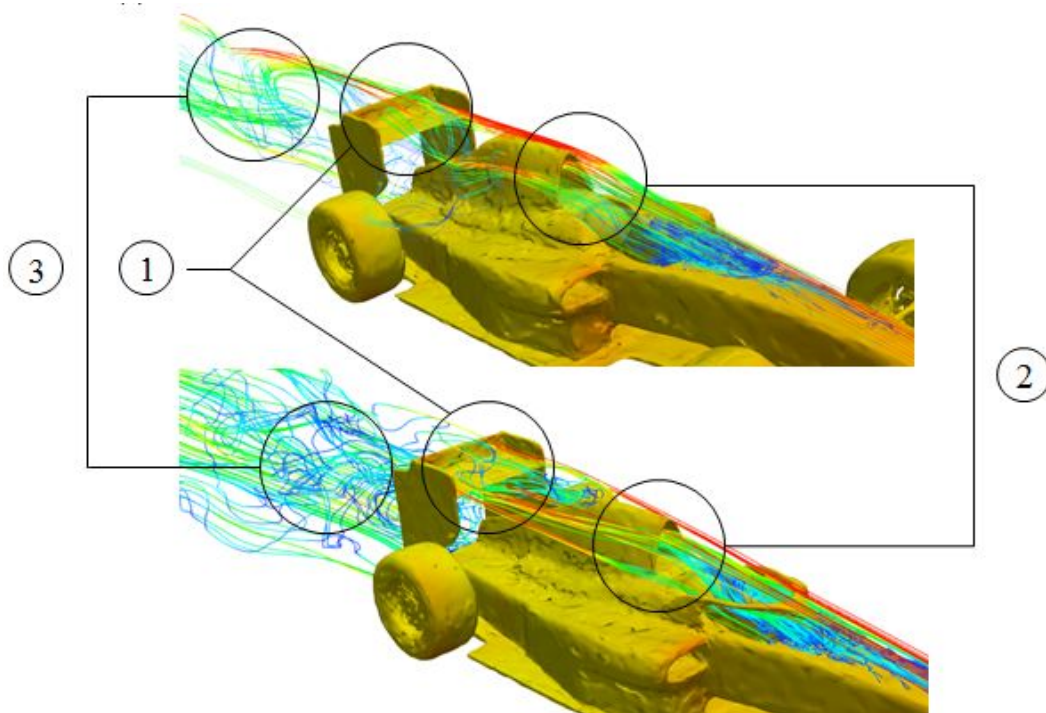
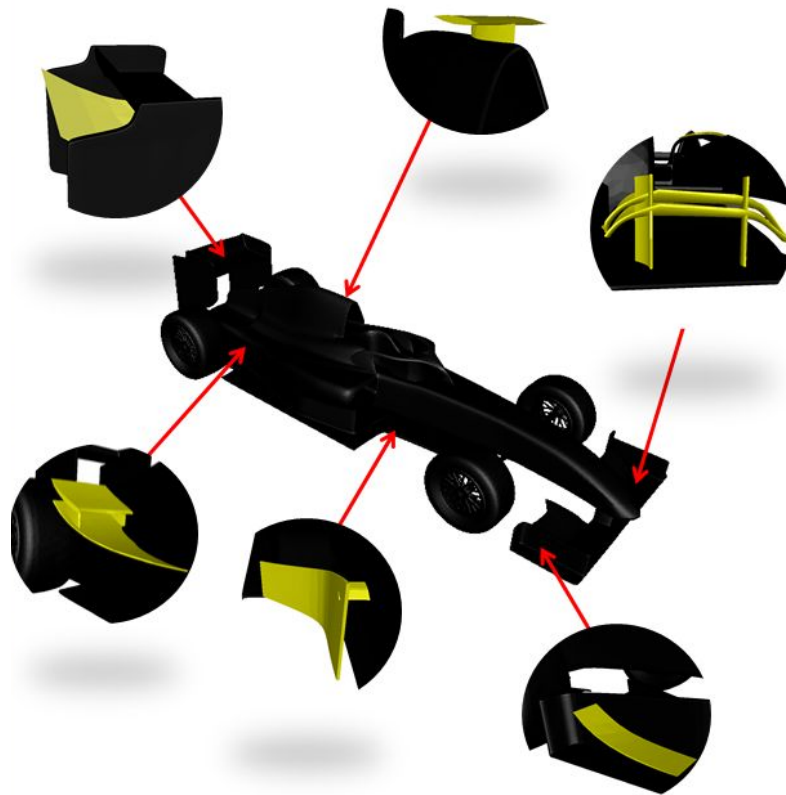


Figure 1.13 : Comparaison des écoulements entre deux F1, avec et sans Halo

Nous avons donc cherché à améliorer la Formule 1. Notre démarche est la suivante : après avoir repéré les défauts de la F1 de base, et en nous inspirant des voitures déjà existantes (notamment la Renault de Alonso de 2006 et la Ferrari de Vettel de 2017), nous avons dessiné de nouvelles pièces (avec l'aide du groupe Halo, merci à Antoine de Pesquidoux). Nous les avons réalisées sur SolidWorks, elles sont présentées **Figure 1.14**. Nous avons également intégré le Halo amélioré obtenu par nos camarades.



2. Présentation des appendices

1. Flaps de carénage (latéraux) et flaps avants

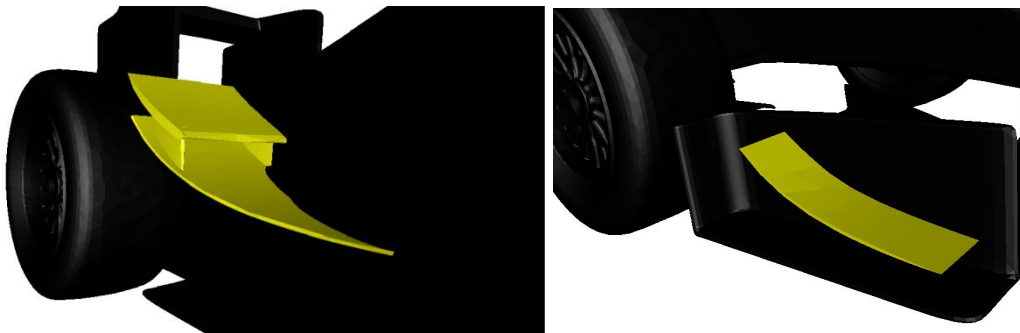


Figure 1.15 : Visualisation des flaps de carénage (à gauche) et des flaps avant (à droite)

Les roues sont sources de grandes pertes d'efficacité aérodynamique pour une monoplace. Elles créent de l'air sale qui est lui-même responsable d'une augmentation de la traînée et qui diminue l'efficacité des autres appendices de la monoplace. Il faut donc conduire l'air au-dessus des roues. C'est le rôle des flaps de carénage et des deux flaps avant (**Figure 1.15**). Dans cette configuration, les supports sont incurvés vers l'intérieur afin de diriger une partie du flux de l'air vers le flap arrière et ainsi maximiser son effet sur la déportance (**Figure 1.16 et 1.17**)

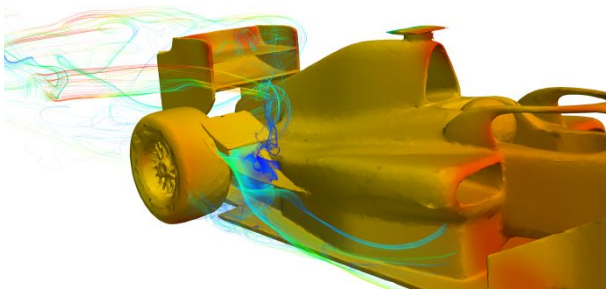


Figure 1.16 : Visualisation de l'écoulement au niveau du flap de carénage sur notre F1.

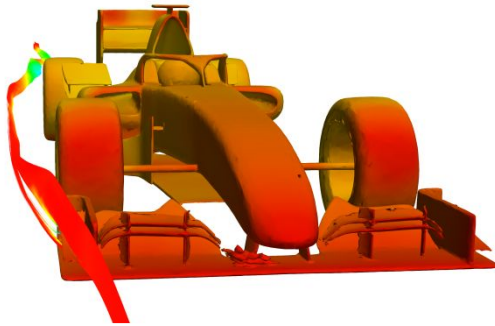


Figure 1.17 : Visualisation de l'écoulement au niveau du flap avant sur notre F1.

2. Les déflecteurs et les appendices avant

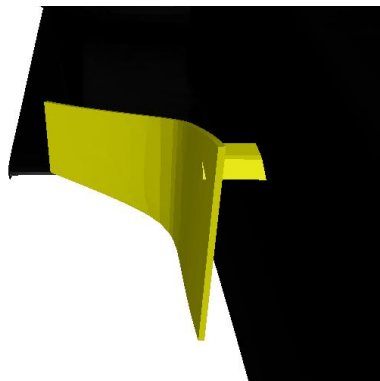


Figure 1.18 : Visualisation du déflecteur latéral droit

Les déflecteurs doivent diriger l'air autour de la voiture et vers les radiateurs (**Figure 1.18**). Nous avons placé le déflecteur plus haut, juste derrière la roue, pour permettre au flux d'air canalisé de pénétrer dans le ponton et ainsi atteindre les radiateurs (**Figures 1.19 et 1.20**).

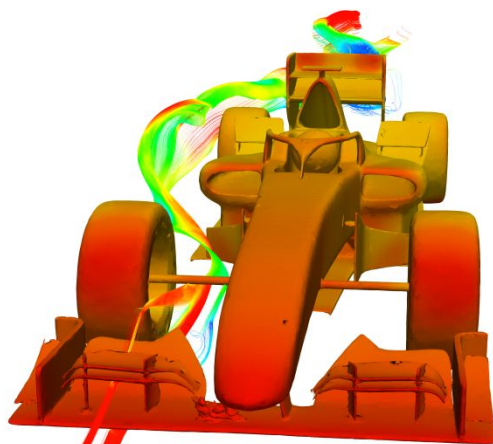


Figure 1.19 : Visualisation de l'écoulement au niveau du déflecteur sur notre F1.

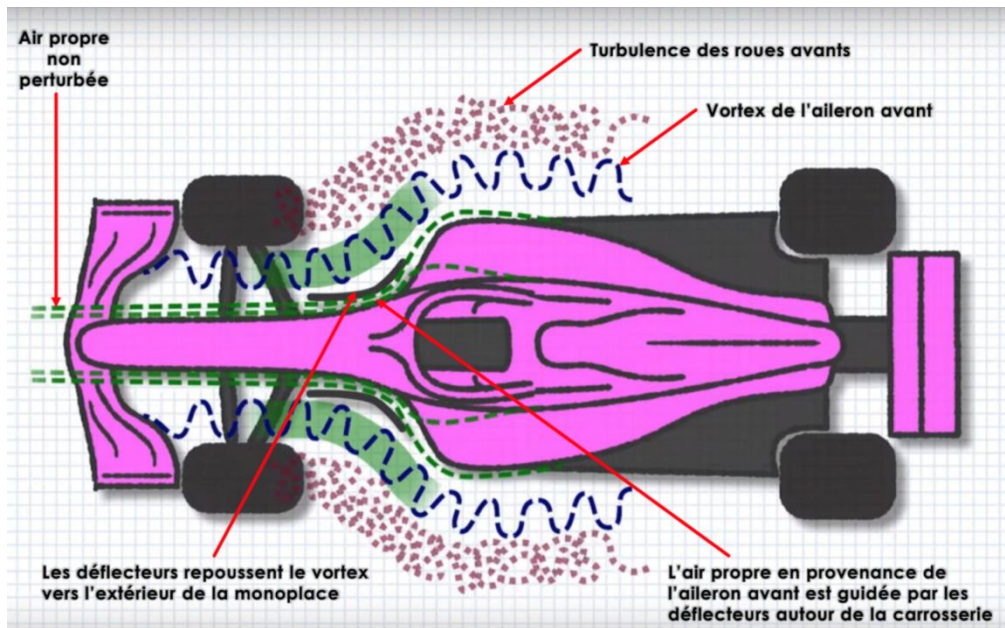


Figure 1.20 : Rôle des appendices avant et des déflecteurs (extrait présentation D. Madier)

Néanmoins les ingénieurs doivent se plier aux exigences de la FIA et n'ont pas la liberté de placer des appendices sur tout l'aileron avant (Figure 1.21) :



Zone dans laquelle la FIA interdit de placer des appendices. Elle permet d'envoyer de l'air propre non perturbé à l'intérieur des déflecteurs pour alimenter les radiateurs.

Figure 1.21 : F1 de Vettel en 2018 pour Ferrari

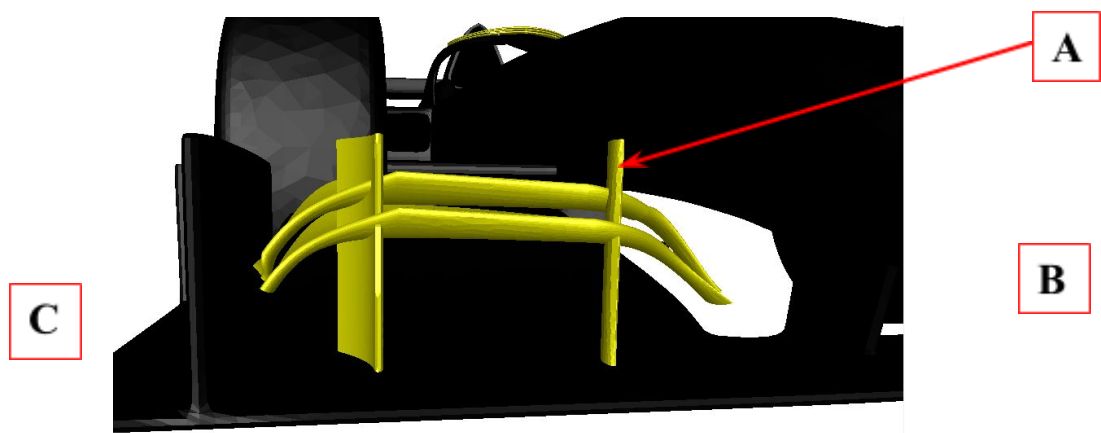


Figure 1.22 : Visualisation du déflecteur avant gauche

Les appendices sur l'aileron avant (**Figure 1.22**) ont pour but de générer des vortex afin de chasser l'air sale provenant des roues avant avec l'aide des déflecteurs afin d'envoyer de l'air propre sur l'arrière de la voiture pour notamment maximiser l'efficacité de l'aileron arrière. (**Figure 1.23**)

Sur notre modèle, l'appendice **A.** est incurvé afin de diriger le flux de l'air vers la partie **B.** qui génère les vortex. Au niveau de **C.**, cela permet en plus d'orienter le flux de l'air à l'extérieur de la roue avant.

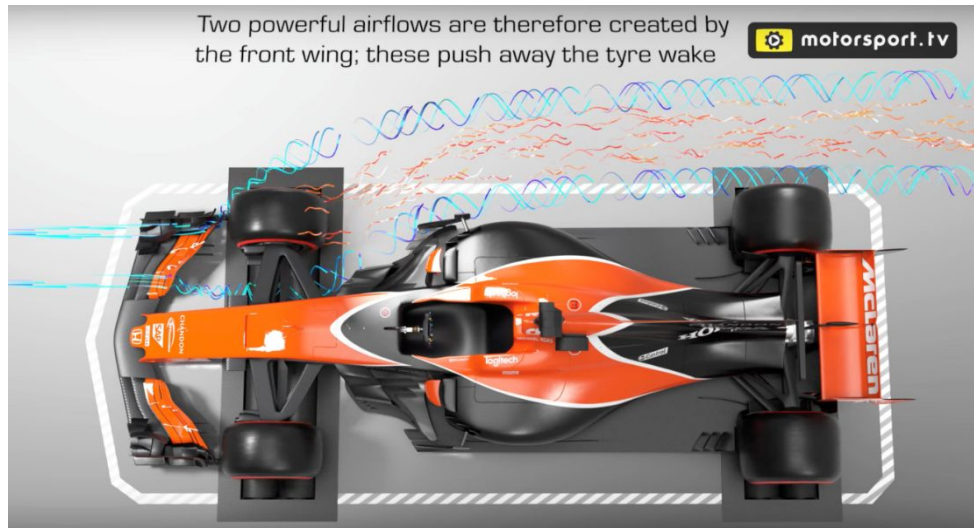


Figure 1.23 : Visualisation de l'effet du déflecteur avant droit (*extrait de MotorsportTV*)

Les **vortex** (flux d'air suivant des lignes de courant hélicoïdales, voir Lexique) sont très efficaces pour dévier le flux d'air perturbé provenant des roues avant. Le vortex se forme sur la partie incurvée à l'extrémité des appendices sur l'aileron avant (**Figure 1.24**).

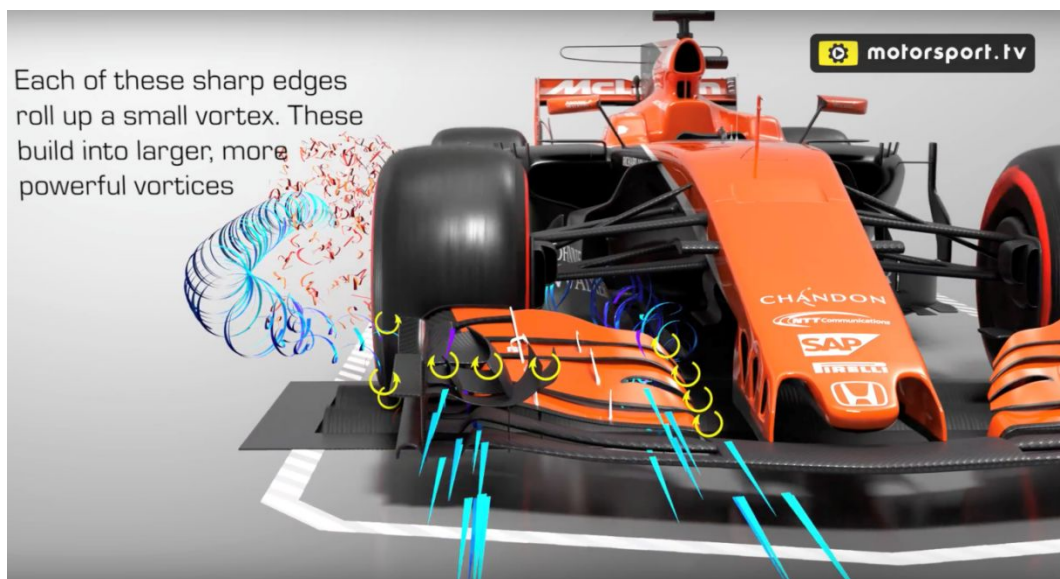


Figure 1.24 : Création de vortex par les appendices avant (*extrait de MotorsportTV*)

L'air qui passe au-dessus du flap a une vitesse plus grande que celui passant au-dessous. Un différentiel de pression est créé, si bien qu'en bout de flap l'air à haute pression tend à rejoindre l'air à basse pression : un vortex est ainsi créé en bout de flap (**Figure 1.25**).

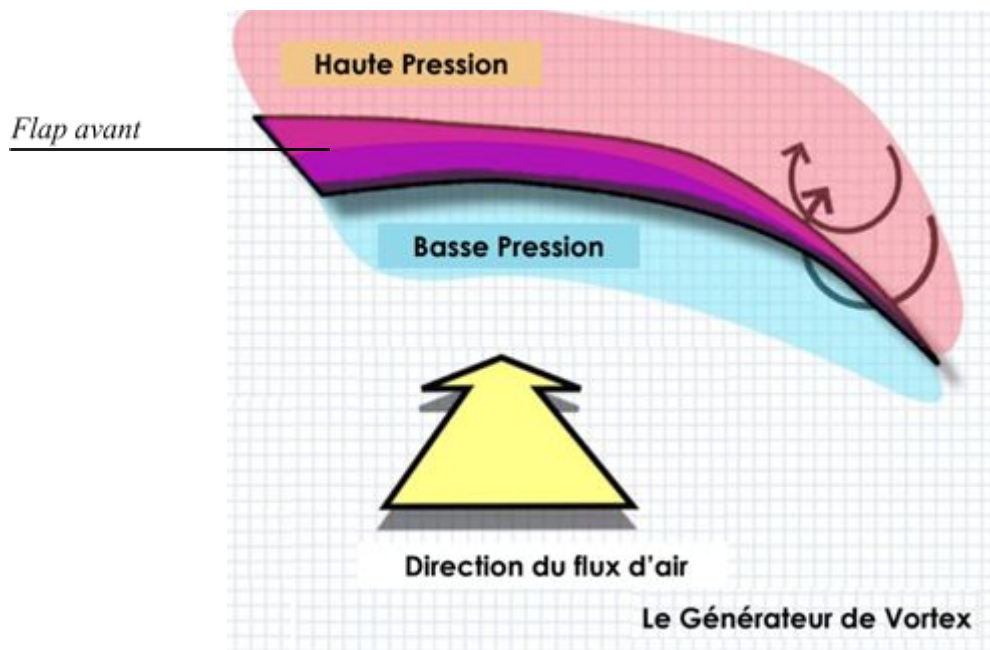


Figure 1.25 : Explications de la création des vortex par les appendices avant

Enfin la partie centrale des appendices a pour rôle de générer de l'appui : l'air qui passe au niveau de cette partie n'est pas déviée et accroît le maintien de l'aileron avant sur le sol (**Figure 1.26**).

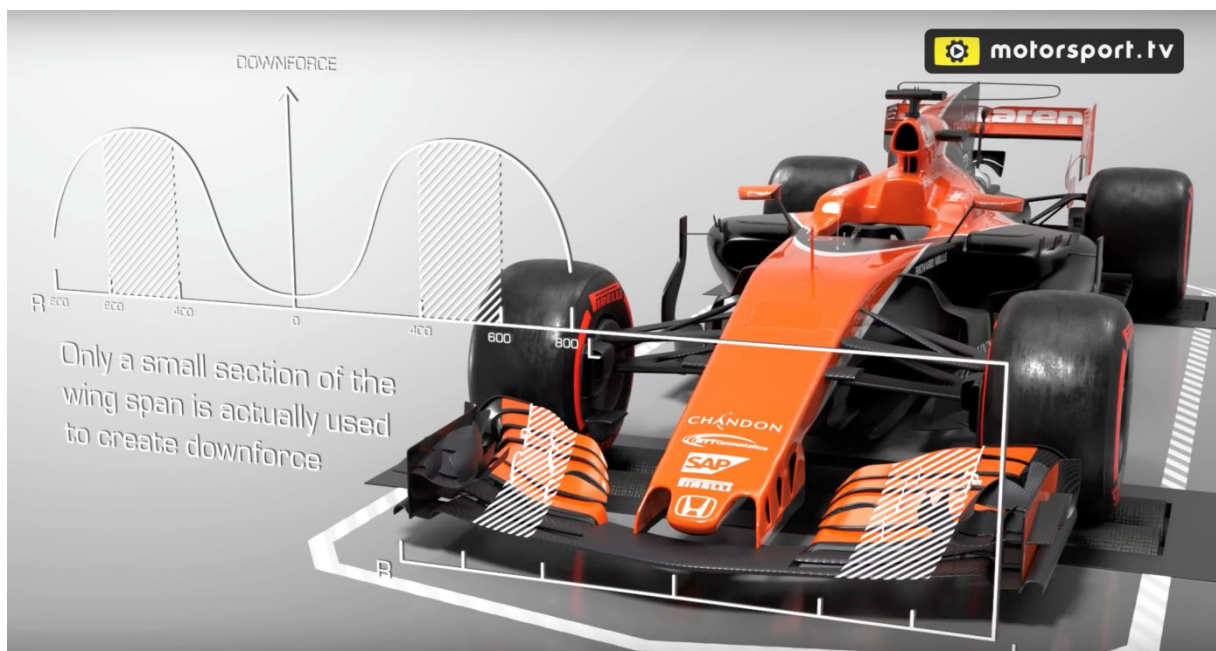


Figure 1.26 : Appui avant favorisé par les parties centrales de l'aileron avant

Ils réduisent cependant le volume d'air vers les radiateurs gênant au refroidissement du moteur mais améliorent l'aérodynamisme et ainsi augmentent la vitesse (**Figure 1.27**). Il y donc un compromis à réaliser entre les deux.

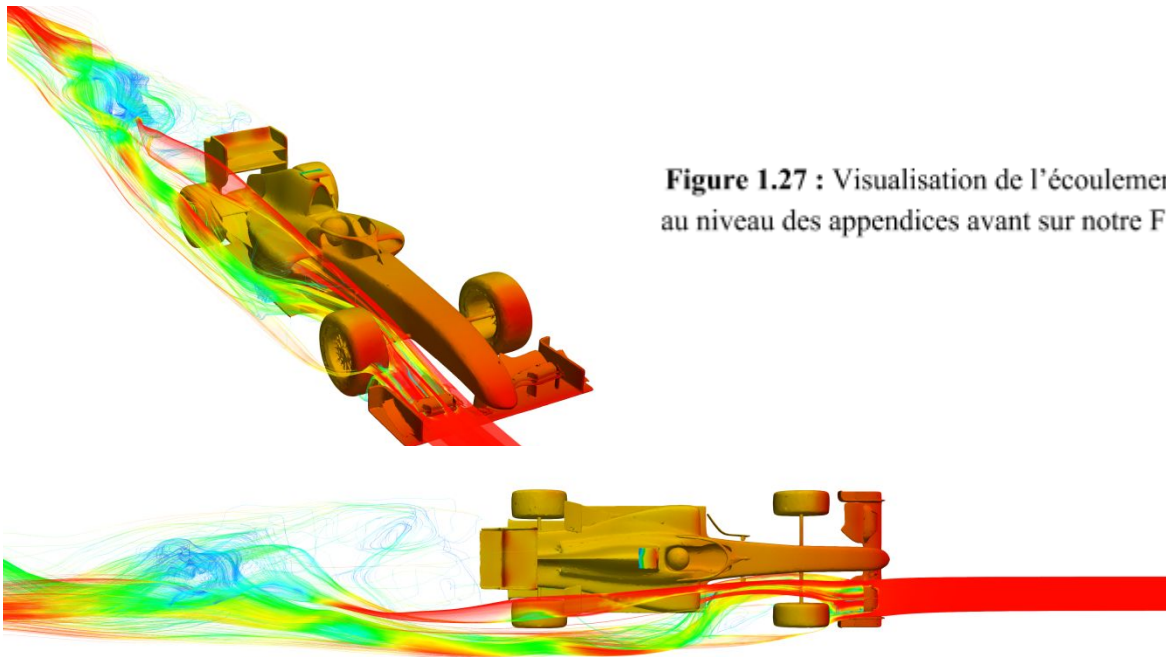


Figure 1.27 : Visualisation de l'écoulement au niveau des appendices avant sur notre F1.

3. *Flap arrière*

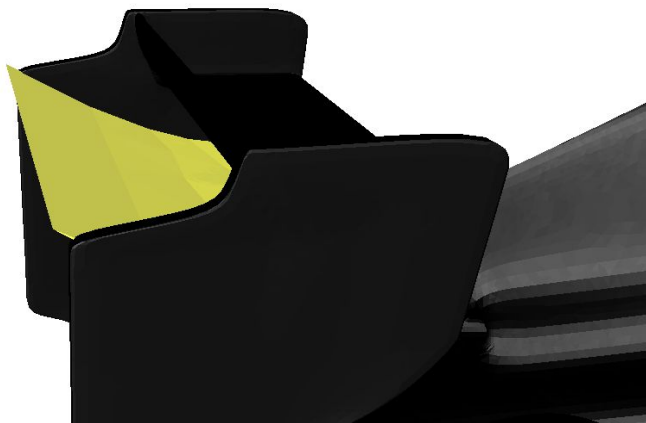


Figure 1.28 : Présentation du flaps arrière

Nous avons créé un deuxième aileron arrière, plus grand que celui situé sur la voiture originale, que nous avons placé en dessous du premier. Il permet en théorie d'augmenter l'appui aérodynamique. Les ingénieurs ont même la liberté de modifier son inclinaison en fonction de la rapidité du circuit (s'il présente beaucoup de virages ou non). Comme on le voit sur la **Figure 1.29**, l'air s'engouffre entre les deux flaps de l'aileron arrière et ainsi crée de l'appui au niveau de l'appendice.

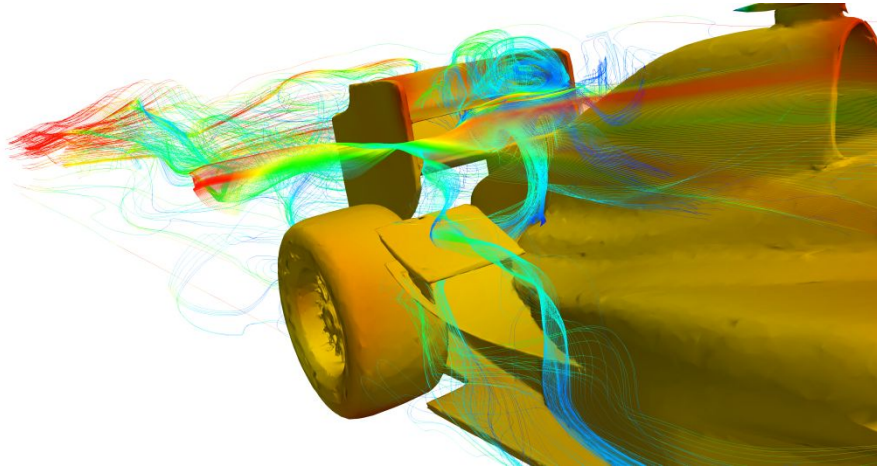


Figure 1.29 : Visualisation de l'écoulement au niveau du flap arrière avant sur notre F1.

4. *Rôle du T :*



Figure 1.24 : Présentation du T

Le T est un appendice qui a été dessiné pour aider le pilote à s'extirper de la voiture lors d'un accident si la voiture est retournée. Il ne joue pas en faveur ou en défaveur de l'aérodynamique de la voiture, nous l'avons dessiné pour se rapprocher au plus d'une monoplace moderne.

Par ailleurs, en observant les Formules 1 existantes, nous nous sommes rendus compte que certaines ne présentent pas d'appendice au niveau de l'aileron arrière, mais plutôt un aileron « de requin » au-dessus l'entrée d'air située derrière la tête du conducteur. Nous en avons créé un, toujours avec SolidWorks, et nous avons comparé les deux Formule 1 améliorées, en vue de déterminer la meilleure.

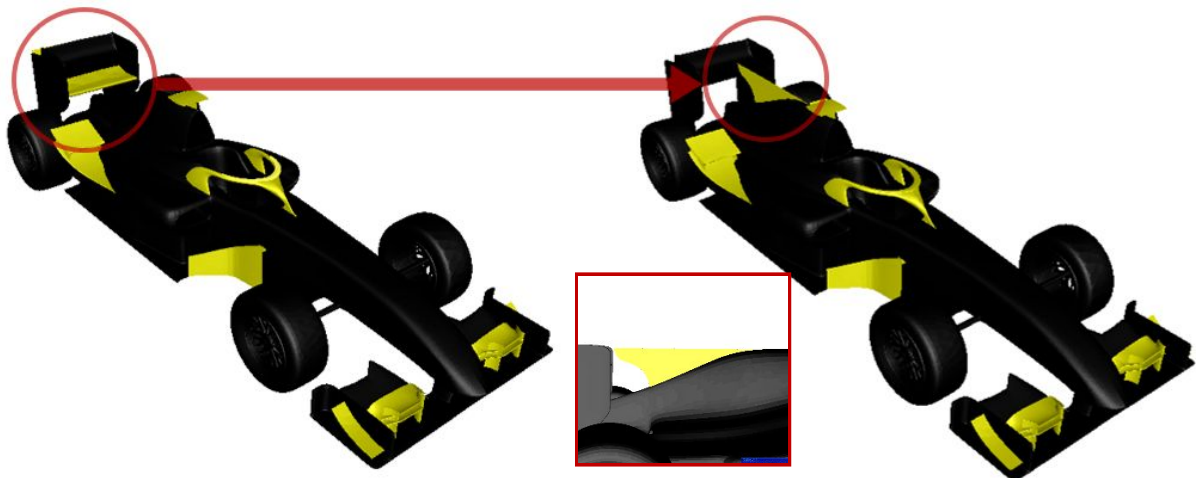


Figure 1.25 : Remplacement de l'aileron arrière par un aileron de requin

L'aileron requin a un triple rôle :

- Stabiliser les flux d'air qui frappent l'aileron arrière qui est habituellement soumis aux turbulences ascendantes générés par l'aileron avant et les éléments de suspension.
- Les turbulences générées par la boîte à air et le châssis se trouvent exactement à la même hauteur que l'aileron arrière. L'aileron de requin sert à aligner les structures aérodynamiques sur toute sa longueur du capot, ce qui améliore leur répartition sur toute la surface de l'aileron arrière.
- L'aileron de requin peut servir à stabiliser la voiture en virage, il utilise la force latérale du virage pour améliorer l'appui et réduire la traînée.

Ils sont indispensables mais leur efficacité est difficile à quantifier. Ils ont disparu en 2011 avec l'interdiction du F-duct et le rehaussement de l'aileron et sont réapparus en 2017 avec l'abaissement de l'aileron arrière.

Sur notre modèle, l'aileron de requin est incurvé afin de rapprocher les tourbillons qui se forment derrière l'aileron et ainsi pousser la monoplace.

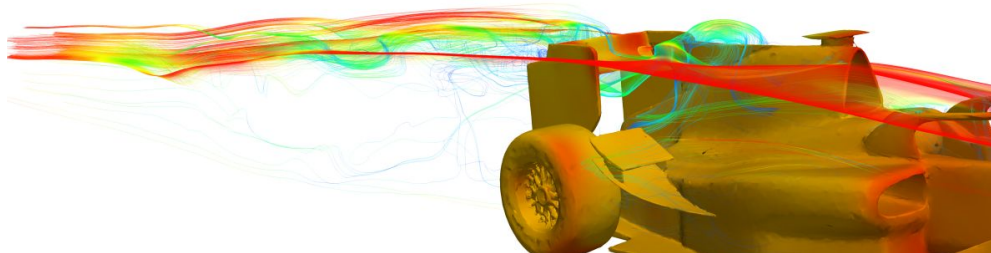


Figure 1.26 : Ecoulement au niveau de l'aileron de requin

Les turbulences ascendantes (**Figure 1.26**) sont stabilisées par l'aileron requin.

Nous avons évalué les performances globales des Formule 1 améliorées, que nous avons comparées aux performances de la monoplace de base. Des analyses visuelles de l'écoulement ont été réalisées par une série de clips, ainsi qu'une comparaison des performances aérodynamiques globales des voitures (par calculs des résultantes de la force de traînée et la déportance).

3. Présentation et analyse des résultats

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS (1)

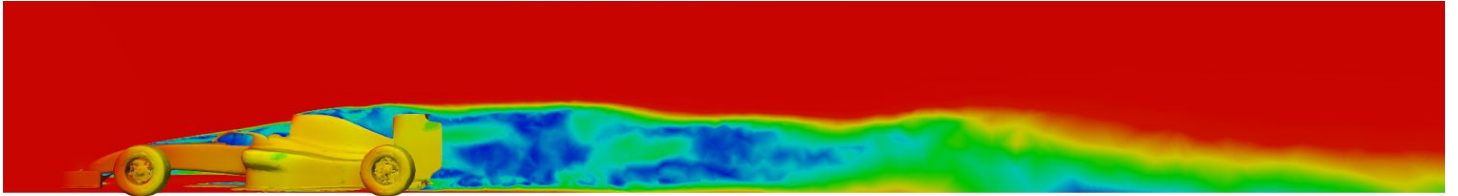


Figure 1.27 : Coupe sagittale F1 basique

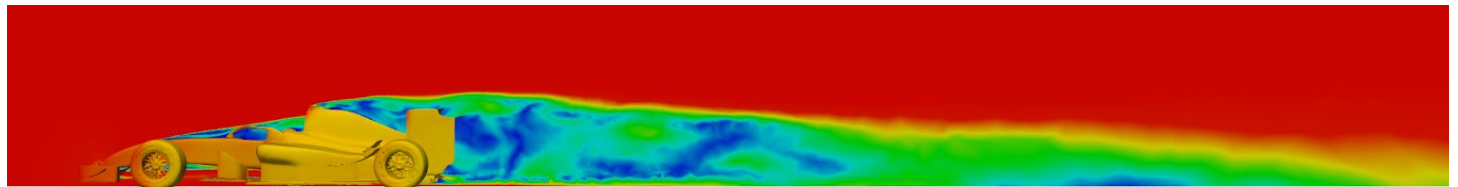


Figure 1.28 : Coupe sagittale F1 améliorée avec aileron arrière

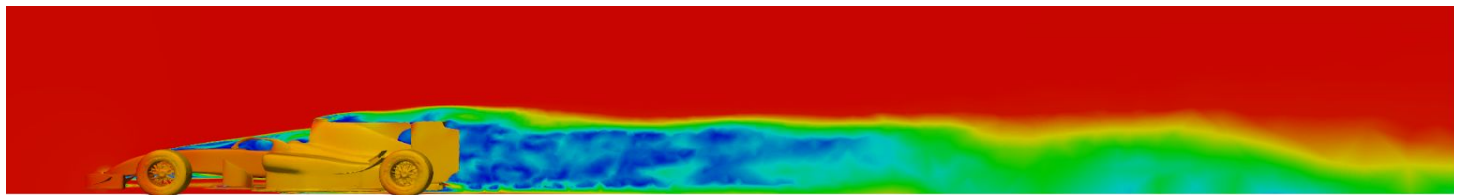


Figure 1.29 : Coupe sagittale F1 améliorée avec aileron de requin

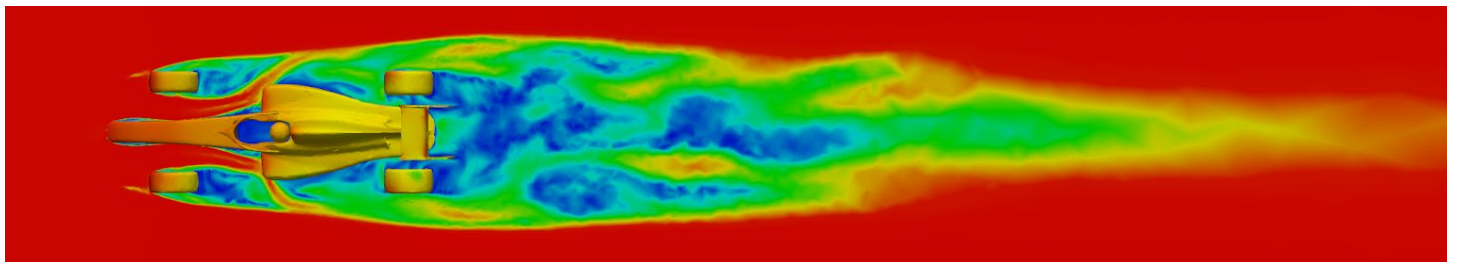


Figure 1.30 : Coupe transverse F1 basique

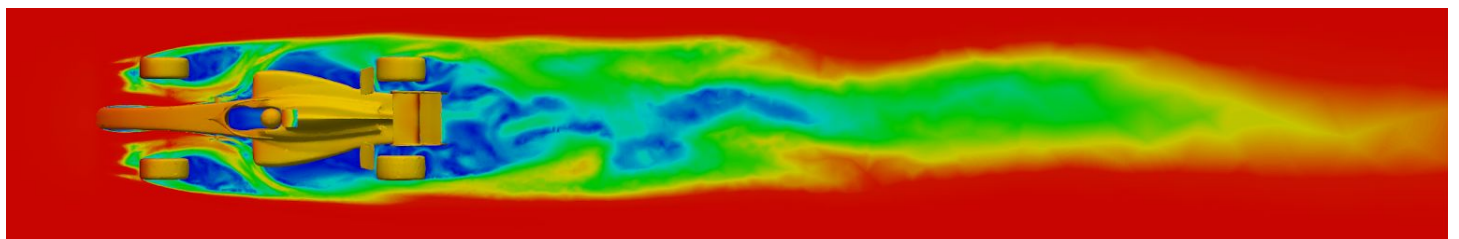


Figure 1.31 : Coupe transverse F1 améliorée aileron arrière

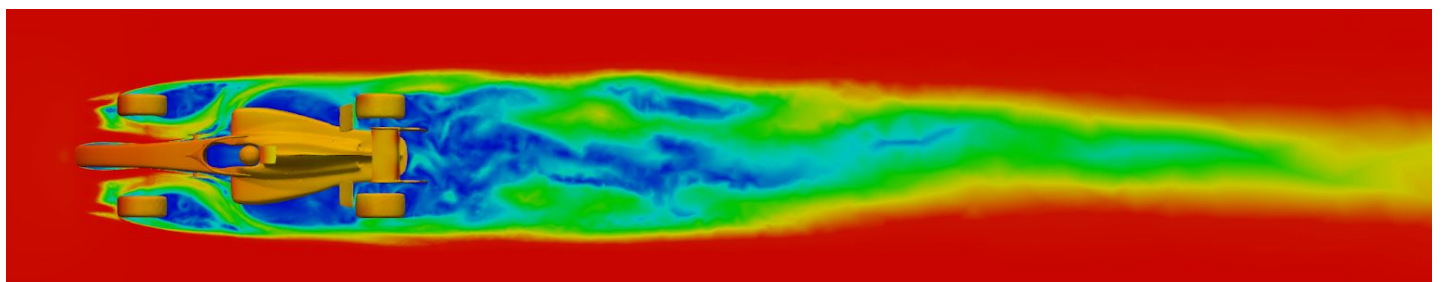


Figure 1.32 : Coupe transverse F1 améliorée aileron de requin

Figure 1.33 : Coupe frontale F1 de base

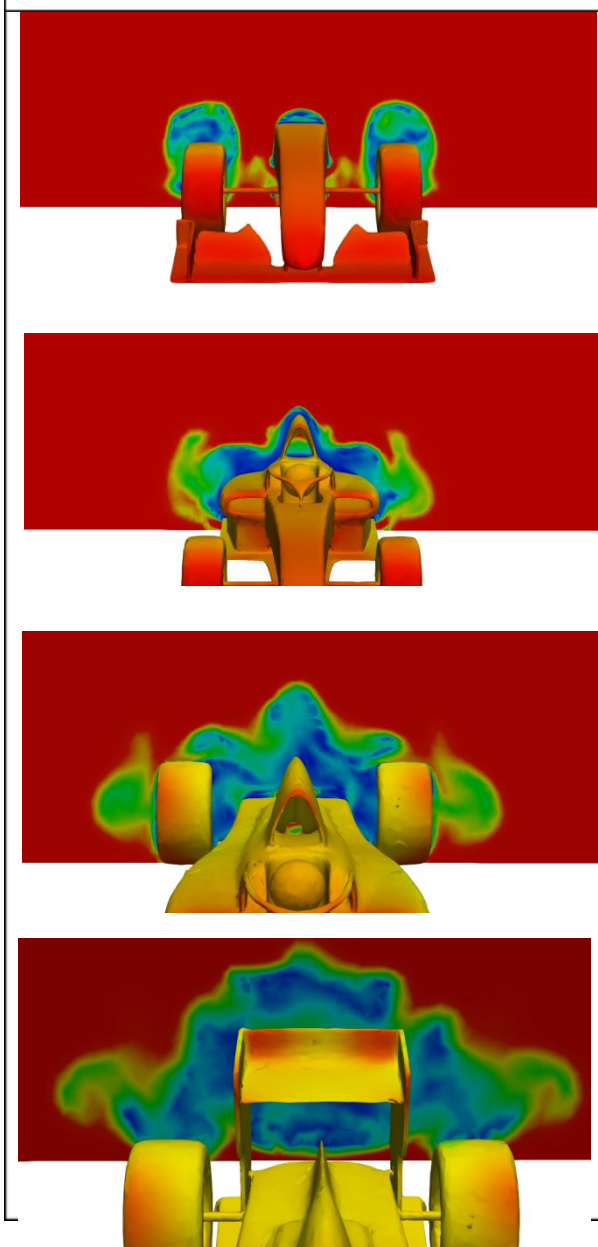


Figure 1.34 : Coupe frontale F1 aileron arrière

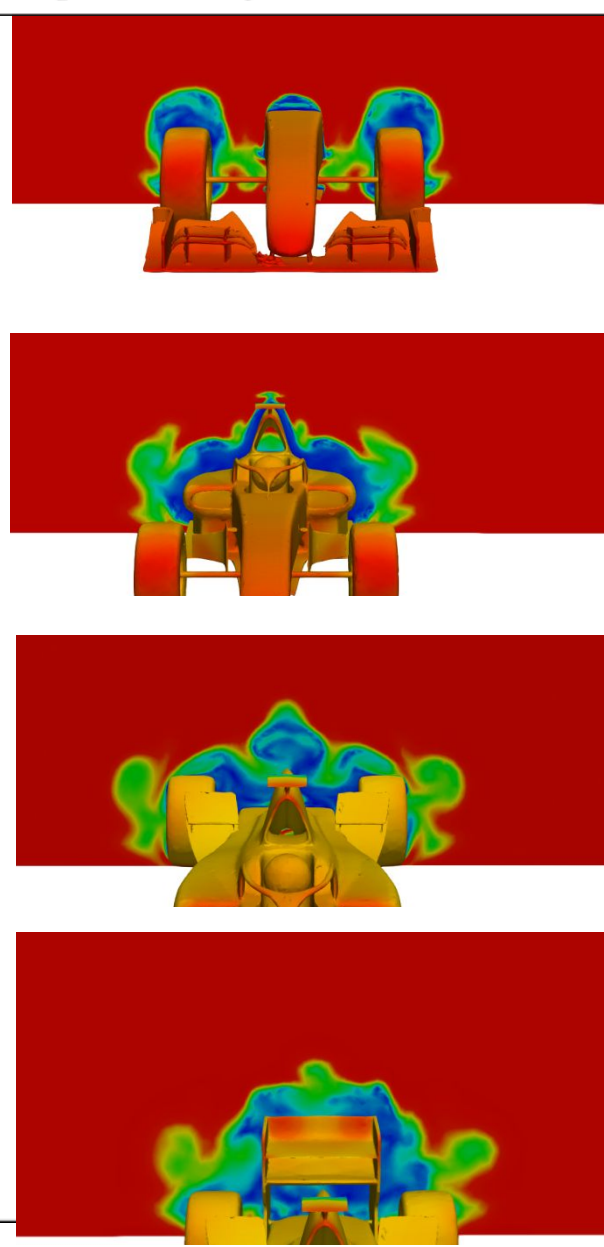
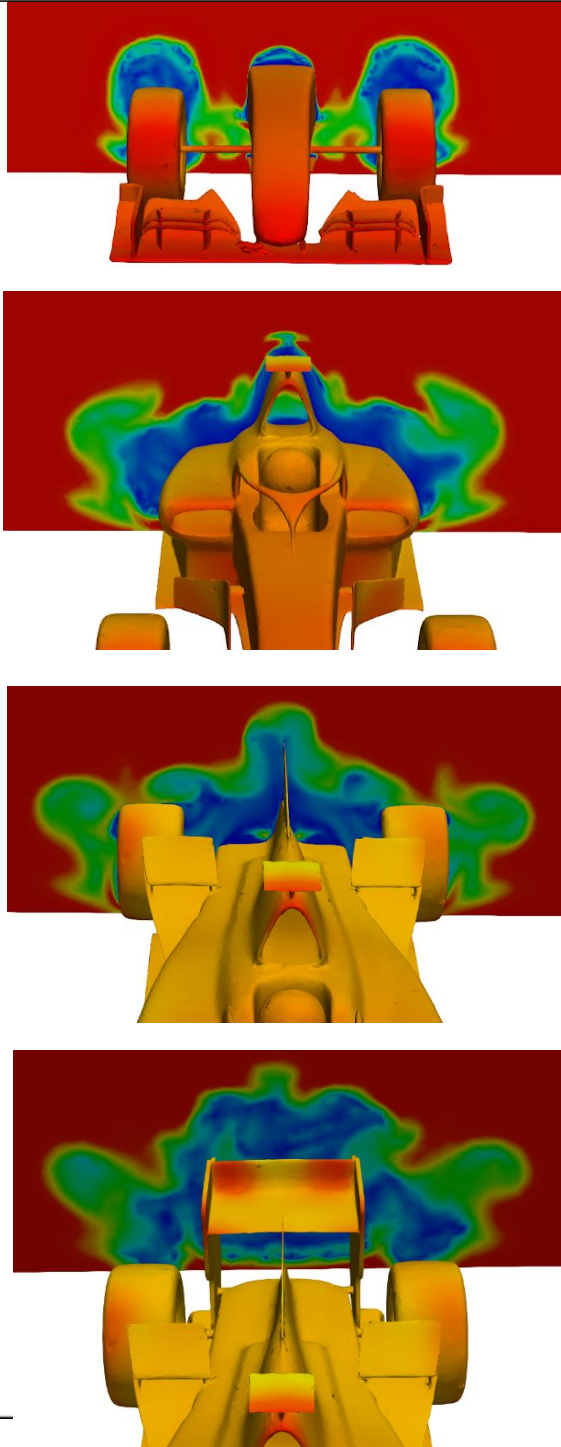


Figure 1.35 : Coupe frontale F1 aileron requin



INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS (1)

Sur les coupes sagittales (**Figures 1.27-1.29**), transverses (**Figures 1.30-1.32**) et frontales (**Figures 1.33-1.35**) des écoulements nous avons pu faire des interprétations au niveau visuel seulement. En effet, plusieurs caractéristiques sur la vitesse du flux d'air généré permettent de faire des remarques sur la traînée de la voiture. Nous nous sommes focalisés sur la zone à l'arrière de la voiture (de l'aileron arrière jusqu'à quelques mètres derrière la voiture) car c'est dans cette zone là que la traînée a le plus d'effet. Pour visionner une baisse de traînée il faut regarder :

- Si la zone de vitesse est homogène (unicolore selon l'échelle), car plus elle est homogène moins il y a de différences de pression, donc de turbulences et donc moins de traînée
- Si l'air au niveau du sol derrière la voiture s'écoule à basse (plus l'air y est lent moins il y aura de traînée)
- Si le flux d'air derrière la voiture reste collé et stabilisé (forme rectangulaire ou triangulaire de la zone d'air lent derrière la voiture)

En regardant les coupes réalisées sur les différentes versions de F1 étudiées nous avons remarqué que sur les deux voitures améliorées tous ces trois critères étaient réunis. Ainsi une simple analyse visuelle du flux d'air en sortie de la voiture nous a permis d'affirmer qu'il y a bien eu une amélioration de la traînée entre le premier modèle de F1 et les deux modèles améliorés.

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS (2)

Sur ParaView, nous avons calculé à la fois les forces de portance et de traînée exercées sur la F1 entière (basique, avec aileron arrière, ou avec aileron de requin). Pour arriver à ces résultats il nous a fallu d'abord générer la surface de calcul (surface de la F1) et calculer les normales en chaque point de cette surface. Finalement le module de calcul de ParaView nous a permis de calculer les forces de traînée et portance par produit scalaire de la vitesse du flux d'air en chaque point, de la normale en chaque point et de la direction (Z pour la portance, X pour la traînée). Le logiciel a intégré sur toute la surface de calcul pour fournir la résultante totale sur toute la voiture.

Formule 1 Forces	Version basique	Version 1 (avec flaps arrière)	Version 2 (avec aileron requin)
Portance (kN)	163,93	124,73	152,36
Traînée (kN)	754,43	698,40	679,52

Figure 1.36 : Tableau récapitulatifs des résultantes aérodynamiques

Nota Bene : Les valeurs numériques obtenues sont surestimées par rapport à celles qu'obtiennent les ingénieurs en Formule 1 pour les mêmes caractéristiques (l'appui d'une Formule 1 roulant à 180 km/h, soit 50 m/s, équivaut environ à son poids, soit **6kN**, source : www.news.sportauto.fr). Néanmoins, nous les conservons car elles permettent de comparer les performances des différents modèles de voiture.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS (2)

Notons premièrement que plus la force de portée est faible, plus la force de déportance est importante. Nous en avons donc déduit que la F1 avec flaps arrière génère plus d'appui sur la piste que la F1 basique ($124,73 \text{ kN} < 163,93 \text{ kN}$). La voiture avec aileron de requin génère elle aussi plus d'appui que la F1 basique ($152,36 \text{ kN} < 163,93 \text{ kN}$) mais elle n'a pas d'effet de déportance aussi important que la F1 avec aileron arrière ($152,36 \text{ kN} > 124,73 \text{ kN}$).

Nous sommes après passé au calcul de la force de traînée car plus celle-ci est importante, plus la voiture sera freinée par l'air qu'elle traverse. On observe là aussi une amélioration de la traînée sur chaque modèle de F1 avec appendices. La voiture avec flaps arrière génère moins de traînée que la F1 basique ($698,40 \text{ kN} < 754,43 \text{ kN}$), il en va de même pour la F1 avec aileron de requin ($679,51 \text{ kN} < 754,43 \text{ kN}$). Nous avons aussi remarqué que la F1 avec aileron de requin était plus performante que celle avec aileron arrière au niveau de la traînée ($679,51 \text{ kN} < 698,40 \text{ kN}$).

Mais nous avons choisi d'illustrer l'efficacité des deux nouvelles voitures en montrant que chacune était adaptée à un type de circuit différent. En effet, une des voitures génère beaucoup d'appui mais a un coefficient de traînée important alors que l'autre a un faible coefficient de traînée mais ne génère pas autant d'appui. Ainsi chaque modèle amélioré a son intérêt : une voiture générant plus d'appui est intéressante sur un circuit avec beaucoup de virages (car l'appui permet de garder une vitesse importante lors d'un virage), alors qu'une voiture avec moins de traînée est préférable sur un circuit contenant beaucoup de lignes droites car la voiture peut accélérer plus rapidement et atteint une vitesse de pointe plus élevée.

Ainsi chaque voiture avec appendices témoigne bien d'une amélioration des performances aérodynamiques, et en plus nous avons pu produire des voitures qui sont adaptées à des types de circuits différents (chose qui intéresse fortement les écuries).

4. Conclusion

Nous sommes partis d'une voiture de Formule 1 basique que nous avons analysé puis amélioré par la création d'appendices. Nous avons produit deux voitures améliorées, et au regard de nos tests, chaque voiture avec appendices témoigne bien d'une amélioration des performances aérodynamiques, et en plus nous avons pu produire des voitures qui sont adaptées à des types de circuits différents (chose qui intéresse fortement les écuries).

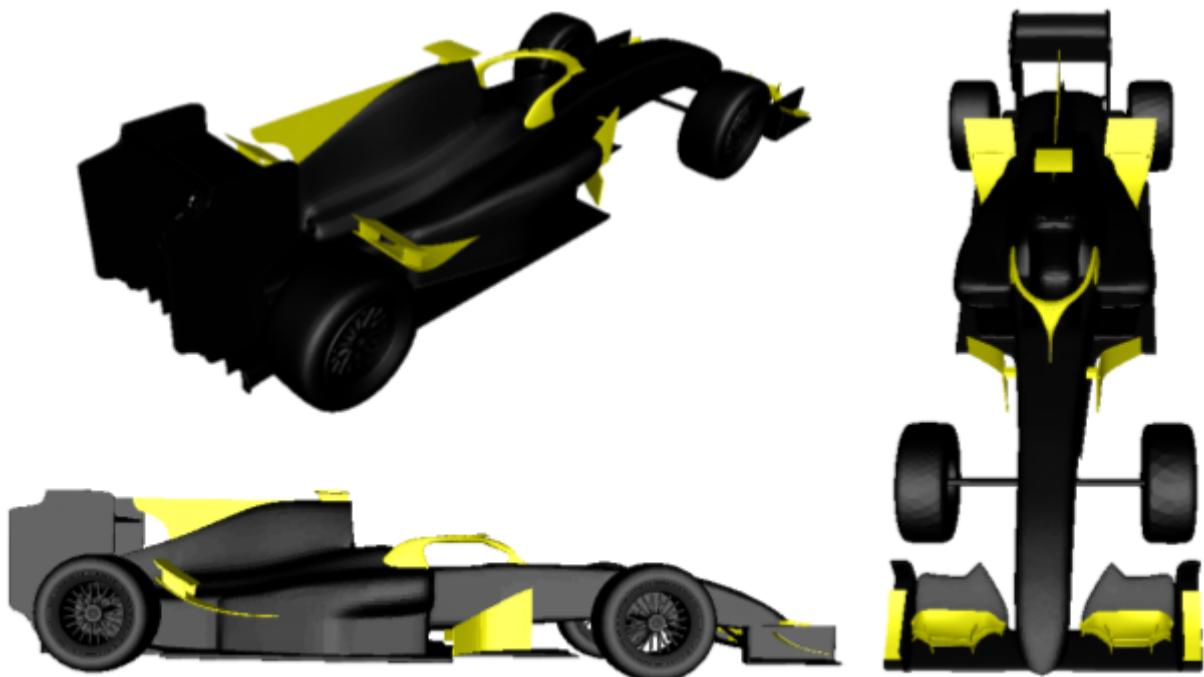


Figure 1.37 : Formule 1 modèle final, avec aileron de requin

LEXIQUE :

Appui (ou déportance) : Force qui plaque la voiture au sol, grandit en norme avec la vitesse du véhicule (opposé de la portance en aviation)

Traînée (*drag* en Anglais) : Force s'apparentant à la résistance de l'air à l'avancement du véhicule, elle cause une augmentation de la quantité de carburant consommée

Turbulence : Irrégularité de la direction empruntée par une ligne de courant. Elle peut être créée par une différence de pression existant au niveau d'une surface : l'air incident rend la pression à l'avant de la pièce plus importante qu'à l'arrière, qui s'y engouffre de manière plus ou moins contrôlée (par la forme des pièces), augmentant le phénomène de traînée.

Vortex : Flux d'air dont les lignes de courants suivent des trajectoires hélicoïdales. Les ingénieurs en créent pour évacuer l'air perturbé proche de la voiture.

Séminaire innovation et stratégie automobile

Ce séminaire a été tenu par une enseignante-chercheur à l'école des Mines, Sophie Hooge, chercheur en gestion scientifique, principalement de conception. Ancienne employée de Renault, où elle a fait sa thèse, ce séminaire était guidé par l'exemple de cette entreprise française.

Celui-ci avait pour but une prise de conscience du niveau de technicité atteint au sein des véhicules modernes, des contraintes de conception qui en découlent et donc une découverte de l'organisation ainsi que des stratégies d'une entreprise telle que Renault autour de quelques modèles particuliers.

Marché

Tout d'abord, quelques chiffres. L'industrie automobile aujourd'hui, c'est :

- 100 million de voitures neuves vendues par an dans le monde
- 30% du marché mondial qui est représenté par la Chine, 15% pour les Etats-Unis
- en 2015, 180 véhicules pour 1000 habitants en moyenne (600 aux États-Unis)
- +143% du taux d'équipement en Asie (hors Japon et Corée du Sud)

Ces chiffres permettent de cerner à la fois l'ampleur des entreprises du secteur automobile, et les marchés qui sont à conquérir, à exploiter et à satisfaire. Ainsi, l'Europe est principalement un marché de renouvellement, ce qui guidera, comme on le verra ensuite, la stratégie de Renault sur certains modèles. L'Afrique, quant à elle, représente seulement 1% du marché mondial avec pourtant une augmentation de 35% de sa consommation en 2016. La seconde main a donc une place prépondérante sur ce continent dont la plupart des pays restent encore aujourd'hui peu développés. En revanche, la Chine avec 30% de part de marché mondial, est un client privilégié pour cette industrie. Pourtant, l'Etat et les constructeurs chinois sont extrêmement virulents et imposent une alliance ainsi que la majorité des parts pour toute entreprise européenne qui tente de s'implanter dans ce secteur, favorisant par là le transfert de technologie. Par ailleurs, les constructeurs chinois développent maintenant des véhicules électriques comparables voire d'une qualité supérieure aux modèles européens. Ainsi, outre la difficulté de s'implanter sur ce marché, le risque de conquête des chinois du marché européen a inquiété un moment les entreprises locales. Cependant, la législation autour de la sécurité des véhicules en Chine étant peu développée, et l'implantation de celle-ci ayant un coût non négligeable (notamment en temps pour ce qui est de la course technologique), les industriels chinois ne se penchent pas véritablement sur la conquête du marché européen.

Une fois les différents marchés fixés, les constructeurs fixent le cahier des charges et, de ce fait, déterminent les raisons principales pour lesquelles leurs clients achètent une voiture :

- besoin de déplacement
- entreprise : énormément de voiture de fonction.
- et surtout, le statut. La voiture reste un signe extérieur de réussite et attire pour cela dans de nombreux pays.

Finalement, ce marché est en forte croissance et présente des enjeux stratégiques mais aussi et surtout environnementaux. Il est en effet impossible d'équiper le monde entier avec les véhicules que nous utilisons aujourd'hui dans les pays occidentaux, au risque de dépasser de façon outrageuse les objectifs fixés par les accords de Paris en 2015 (stratégie des 2°C).

Stratégie de conception

Quels sont les critères de choix pour une voiture ?

- Le design avant tout. Le marché est tellement concurrentiel que les performances techniques des véhicules sont largement similaires d'un modèle à l'autre.
- L'habitabilité.
- Les performances, il est tout de même nécessaire qu'elles soient conformes aux véhicules en vente en même temps.
- Le prix et l'entretien.

Ces divers critères définissent la stratégie des équipes chargées du développement de nouveaux modèles. Par exemple, le marché étant saturé, une variation de prix d'environ 100€ sur une voiture peut faire perdre des milliers de vente. En outre, cet écart sur le prix final ne représente qu'environ 20€ sur le prix de production à cause de la marge, des processus de test, du coût de développement etc. Pour cela, les entreprises ont un besoin constant d'optimisation et d'innovation.

Par ailleurs, il existe un autre domaine absolument nécessaire à étudier dans le développement d'un véhicule : la stratégie commerciale. Quel est le comportement d'un client lors de l'achat d'une voiture ? Celui-ci a été étudié et décrit de façon très précise :

1. Regard, évaluation du design.
2. On ouvre et on referme la portière car le bruit de fermeture est dans l'esprit collectif un gage de qualité.
3. Idem avec le coffre.
4. Puis on entre dans la voiture et on tapote le tableau de bord, idem ceci constituerait un gage de qualité.

Conséquences : chez Renault comme dans tous les grands constructeurs, une équipe est consacrée à temps plein à l'élaboration du bruit de fermeture du coffre et des portières pour chaque modèle. De plus, chaque nouveau concept est accompagné de la

création de nouvelles couleurs parce que cela a une importance primordiale sur la vente. Par exemple, la Clio 4 a été commercialisée dans 4 différentes couleurs, dont un nouveau rouge pétant. La voiture s'est vendue à 75% dans cette couleur, les ventes ayant augmenté de 10% sur le précédent modèle en parallèle, du jamais vu chez Renault.

Ainsi, outre les études fondamentales en R&D sur les performances des véhicules, sans cesse accrue, on constate que chaque détail compte dans cette industrie, ce qui confirme qu'il s'agit bien d'un domaine d'expertise conséquent. Une voiture est au paroxysme de contraintes de conception, et elle donne lieu à une industrie qui a la plus grande maîtrise des coûts et des délais, bien devant l'aéronautique.

Innovation

Nous avons abordé ce point à travers une confrontation entre le modèle de la Clio 4 et celui de la Twizy. Deux concepts complètement différents qui mènent à une gestion d'équipe ainsi qu'à des contraintes fondamentalement opposées. En effet, la Clio 4 est, comme son nom l'indique, issue d'une ligne de produits déjà existante. Elle vise donc un type de clientèle chez Renault : les fidèles de la marque, sur une tranche d'âge d'environ 50/60 ans, qui ne demandent qu'à être rassurés tout en achetant un modèle innovant dans ses performances techniques. C'est de ce type d'attente que naît le principe de *conception réglée*. Le principe ? On garde la base et on innove sur chaque petit morceau du véhicule. Ainsi, la Clio 4 est en tout point meilleure que la précédente : sur la tenue de route, les matériaux, le moteur, l'aérodynamisme, l'équipement... mais elle reste une clio et en ce sens reste attractive au type de client décrit plus haut.

La Twizy s'inscrit dans une toute autre gamme de véhicule : celle de la *conception innovante*. Il s'agit là de mettre au point de nouveaux concept, design et parfois même technologie. On parle de **conception de rupture**.

Lors de leur lancement, l'évaluation des projets d'innovation permet de définir le cadre dans lequel ceux-ci se placent à travers différents points :

- la nature des critères (testable, répétable...)
- leur domaine de validité et de précision
- la nécessité d'imposer un référentiel fini pour les ingénieurs, ne pas leur rajouter des critères au milieu de leur travail
- les outils de contrôle et de pilotage

Ceci donne lieu par la suite à la mise en place de la **coordination** des équipes, c'est-à-dire à un paramétrage de l'action collective.

Ensuite vient le temps de l'évaluation de la valeur de l'innovation, réalisée par ceux qui définissent les critères pour la coordination sous quelques points à nouveau :

- nature de la désirabilité
- valeur de l'objet
- valeur du collectif (excellence industrielle, ergonomie...)

Ceci permet de nourrir la **cohésion** des équipes dont le but est la motivation et l'apport d'une finalité dans l'action collective.

Synergie Formule 1/voiture de série

La première question à se poser pour répondre à cela est : pourquoi les entreprises automobiles font de la Formule 1 ?

- pour apprendre
- pour faire apprendre
- pour l'impact médiatique considérable
- pour la visibilité, l'image de marque : c'est une vitrine !

A priori, les entreprises qui travaillent dans le domaine de la Formule 1 aujourd'hui le considère comme un métier de conquête. Il s'agit là principalement d'une stratégie commerciale, d'une recherche de visibilité pour la marque. Le but est de faire rentrer dans la tête du public que ce sont des voitures hautement technologiques. Le but c'est de montrer qu'une Renault peut concurrencer une Ferrari ou une Mercedes en fin de compte !

Bien sûr, les avancées technologiques de la Formule 1 bénéficient quand même au secteur des voitures de série sur :

- les matériaux. Dans le but de réduire le poids des voitures, les ingénieurs en Formule 1 travaillent beaucoup dans ce domaine et l'implémentation est facilitée par le fort budget dont ils disposent, ce qui permet des tests réels.
- le système KERS (Kinetic Energy Recovery System) issu de la formule 1 et qui est aujourd'hui installé dans la plupart - sinon tous - des véhicules électriques.

Conclusion

On retiendra ainsi de ce séminaire l'extrême précision des entreprises automobiles, tant dans leurs produits finaux dont la technologie est considérable, que dans leur conception qui est réglée de manière hautement minutieuse. Les entreprises concernées se confrontent à un public de plus en plus divers, ce qui les pousse à développer à la fois des conceptions réglées et innovantes, mais aussi d'utiliser la Formule 1 comme une vitrine, qui touche de nombreux acteurs internationaux. Bénéficiant par ailleurs des avancées établies dans ce domaine, ces industries sont capables d'innover très rapidement sur un spectre très varié : énergie, matériaux, design, procédés industriels...

On reconnaît bien une industrie qui compte parmi les plus grosses de France, mais aussi dans le monde entier, et qui emploie aujourd'hui, de par son réseau d'usines mais aussi de fournisseurs, un nombre considérable d'acteurs.

F1 Renault Sport

We visited the laboratory and factory of Renault Sport Racing F1 in Enstone, England. This place is where all Renault Formula 1 cars are conceived and produced.

We first attended a general presentation on F1 aerodynamics, by the aerodynamics manager of the technical center. Then, we were allowed to visit their facilities, from the Design Office to the actual factory.

Renault Sport

At Renault Sport, F1 engines are produced in France and the chassis in England. Renault used to own the factory until 2011 when it was overtaken by Lotus. They bought it back in 2015 with a new objective: reach the top three F1 constructors within 5 years. More precisely, the aim is to be a real challenger for the F1 championship in 2021.

Therefore, Renault Sport invests tremendous amounts of money on their car development. Unfortunately, the exact data is confidential.

F1 aerodynamics

Why is aerodynamics so important in F1?

The FIA imposes very strict legislation on every aspect of the car performance.

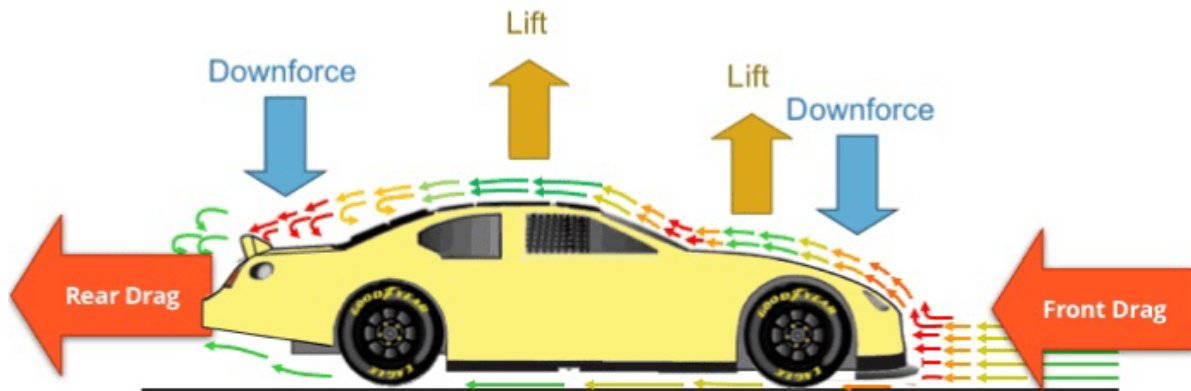
- Drivers : hard selection. In any case, engineers have no, or little, impact on this aspect of the sport.
- Engine : 1.6L, V6, turbo, hybrid.
- Tyres : produced by Pirelli, no modification possible. All teams have to use the same tyres. But there are still a few options for the tyre type.
- Aerodynamics : some regulated parts but also areas with great freedom for aerodynamics engineering.

As for the halo specifically, teams have to use halos produced by an FIA certified factory. However, they can add appendices up to 2 cm on top of it, as long as they are not movable technologies.

Aerodynamics aims

The aim to work on aerodynamics is to reduce the drag while maximising the downforce [fig]. The drag force reduces car velocity. Downforce enables the car to stay

stable and adhere to the road which is essential to prevent accidents, especially during turns, it also allows the car to take turns faster.



[fig] forces on a car

However, increasing the downforce requires adding appendices and parts, which in return increases drag. Similarly, reducing drag requires sometimes taking off appendices, which in return reduces the downforce. But is one better than the other?

There is no clear answer to the question according to the Renault Sport engineers we met. Indeed there are very different types of circuits where sometimes downforce is more necessary and other times when drag needs to be at its lowest. To adapt to these constraints, engineers create an idealized circuit (because it is impossible to test every combination possible between turns and straight lines). They then measure the success rate to determine which possible combination is the best. To illustrate this, the engineers at Renault Sport highlighted all the changes in the designs of rear wings, that all adapt to a different needed downforce to drag ratio.

Aerodynamics impact of different parts of the car



[fig] different parts of a F1

The F1 engineers at the facility we visited highlighted different parts and their uses on an F1 car, they are as follows.

Front wing [fig] :

- Produce downforce
- Control the front tire wake
- Set up specific flow structures for the front of the car floor (important in increasing downforce)

Diffuser [fig] :

- Draw more air from underneath the car floor
- Generate downforce

Side Flap [fig] :

- Avoid low pressure on top of the car
- Create vortex travelling along the car to draw tire wakes away from the car

Rear Wing [fig] :

- Create downforce
- Stabilize the air flow coming from the front of the car and engine intake

Future in aerodynamics

Actual research focuses on

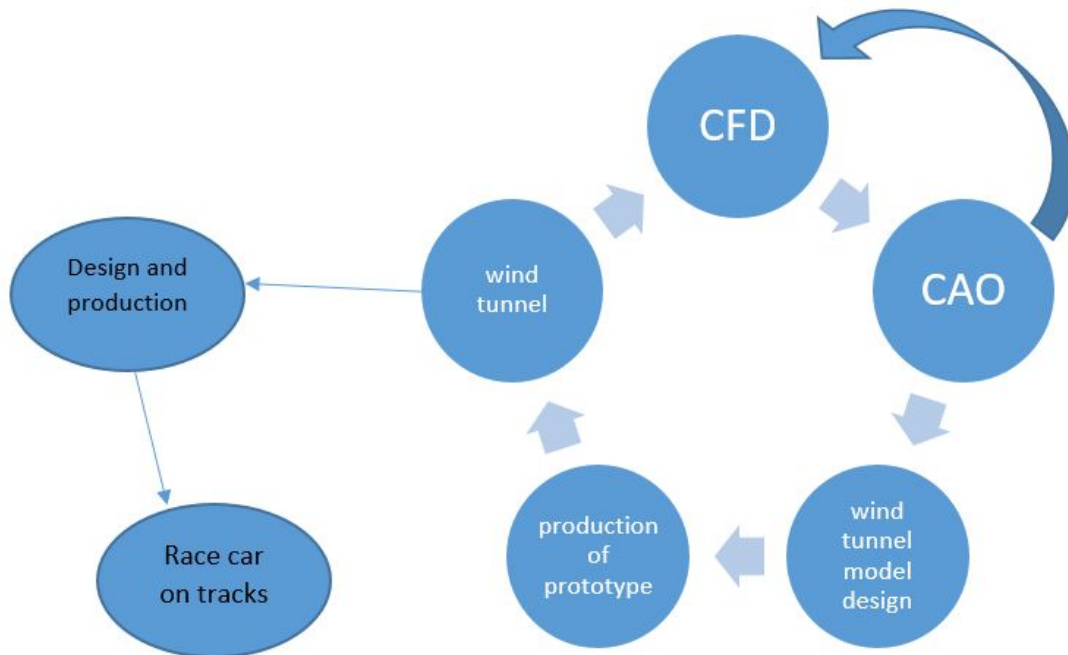
- how to improve the aerodynamics of the new device introduced by the FIA: the halo.
- how to cool electronic devices and brakes
- how to control vortex produced all around the car to deflect turbulent air

Design analysis and validation processes in F1

Engineers working on the aerodynamics of the F1 car follow different processes in the conception and design of the car. They first use CFD (Computational Fluid Dynamics) to design and analyse the aerodynamics of the car. They later on use the Wind Tunnel Tests to validate the designs and prototypes. This gives the engineers multiple different solutions, they then observe how these solutions behave in real life with On Track Testing, and in Simulation.

However, engineers are not as free as they seem in regards to testing. Indeed very strict regulations exist on the number of hours they are allowed on each testing session (the FIA restricts On Track Testing to very few hours). However they use Simulations abundantly

since the FIA imposes no limits on those. Down below is a diagram showing the process line in designing and analysing the aerodynamics of an F1 car.

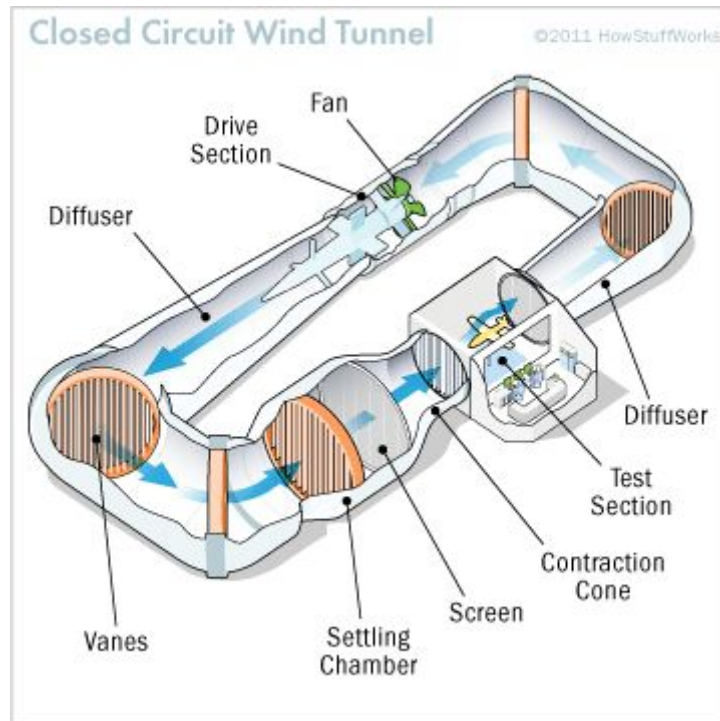


All of the parts of the car concerning aerodynamics are designed solely by the team engineers. And through testing they try to get the best correlation possible between CFD, Wind Tunnel tests, and On Track Testing (a better correlation leads to a more realistic validation of the designs).

Wind tunnel testing

While at the Enstone Facility, we were able to visit their Wind Tunnel used for testing. The Wind Tunnel at the Enstone F1 Renault Sport Facility is a rolling road system with the possibility to impose yawl. The speed of the rolling track can go up to 50 m/s, and the laminated air is delivered by a system of tunnels and turbine. First a huge turbine accelerates the air in the tunnel. After the air is accelerated, there is a broadening of the canal to slow it down. There is then a brutal tightening of the tunnel to accelerate the air once again whilst keeping it “clean” (a “clean” air is a laminated air flow).

The car finally faces a flow of “clean” air into which the engineers inject colored gases to visualize airflow lines. The following diagram illustrates this closed circuit wind tunnel [fig]. The size of the car model used for the Wind Tunnel tests is restricted by the FIA: it needs to be at most 60% of the original size.



[fig] wind tunnel diagram

The engineers do not only visualize the airflow lines, they also measure pressure on different parts of the car, the drag and downforce of the car, etc. To do this they use diverse methods such as:

- Pressure rakes
- Surface flow visualization
- Floor tapping to measure pressure from underneath the car
- Off- body measurements (but these influence the airflow)
- Stereo PIV: measures pressure with lasers. Laser pulses to take pictures of the airflow in between very short time spans, they can then determine the velocity field. This method is done at a distance so there is no intrusion and so influence on the airflow.

Aerospace and Formula 1

Formula 1 engineering has various similarities with aerospace and aeronautics. First, engineers often work in these two domains during their career. Second, both have to respect strict safety regulations. However, development cycles are far shorter in Formula 1 than in aerospace. Therefore, F1 is often considered as the experimental laboratory of aeronautics. They both use state of the art technology but F1 can create a new aerodynamics device and use it right away in the next race to test it.

While at the facility, the engineers told us that Renault Sport has developed a partnership with Boeing. We visited the huge supercalculator of 18000 core processors given by Boeing to Renault Sport. This machine is needed to launch precise aerodynamics simulation.

Furthermore, these two companies develop in collaboration new techniques to study and improve the aerodynamics of their products. For example, they recently developed a new way of using 3D printing to produce anisotropic objects. Additive printing is often used to test new parts on planes or cars. However, this technique creates objects in layers which is not the case in usual industrial process for aluminium for example. It therefore has different aerodynamics properties hence the need to obtain anisotropic pieces.

This close relationship between Renault Sport and Boeing illustrates the tight bond linking Formula 1 industry and aeronautics.

The halo

The aerodynamics engineers at Renault Sport told us that they also have to adapt to the FIA regulations introducing new safety parts such as the halo. They however have some freedom to build on these parts: the FIA allows 20 mm of creativity space on top of the halo. The engineers use this space to design small parts stabilizing the airflow coming into the engine air intake.

The halo has also mechanical and structural constraints. According to the FIA it has to resist to 100 kN frontally and laterally, and the FIA is aiming to raise this charge to 150kN for 2019. The Renault team has already achieved 150 kN. The halo should have a thickness of 4 mm for the tubes (it has a tubular structure).

But the engineers are also frustrated by the insertion of this new part on the car since it hinders the quick change of pedals by the technicians during the race. And further analysis need to be made around the fixation points since they are critical. For this they use very high strength steel on the fixations (theses parts are under huge stress), and not titanium like on other parts of the car.

This then needs more testing, simulations, measures and etc. in order to better insure the security of the driver and functionality of the halo. Therefore the same sort of correlation in the design of aerodynamic parts is needed for the halo design and testing.

Interview

❖ *Quelle place tient la Formule 1 au coeur des priorités de la FIA ?*

La Formule 1 est au coeur des discussions de la FIA, en tant que discipline reine dans le domaine.

❖ *Les autres sports mécaniques suivent-ils les mêmes prérogatives que la Formule 1 ?*

Pour les différents championnats du monde, c'est-à-dire les rallyes, les grands prix de Moto Gp etc., l'organisation est la même que celle de la Formule 1.

On peut dresser le schéma de cette organisation suivant 3 familles principales d'acteurs :

- les organismes officiels qui régulent ces sports : la FIA pour tous les sports automobiles, associée avec la FIM pour la moto GP. La FIA régule à la fois les éléments techniques et sportifs. Ces organisations s'assurent de la neutralité des championnats du monde.
- les promoteurs et organisateurs d'évènements. Les droits, sous certaines conditions de rémunération, sont remis à des sociétés qui organisent et promeuvent les évènements sportifs. Aujourd'hui, ce sont les américains (Liberty Media) qui sont majoritaires. Bernie Ecclestone, à l'époque, gérait par exemple la société qui organisait le championnat, c'est-à-dire dans ce contexte de forte régulation, loue un circuit, s'occupe de la sécurité autour de l'évènement, contacte les écuries, assure le filmage et la vente des images aux télévisions mondiales...
- tous les participants : écuries, pilotes...

Quels que soient les championnats, on retrouve ces 3 familles d'acteurs.

Bien sur, le budget est différent pour chaque championnat mais ceux-ci suivent toujours le même schéma.

❖ *Les ingénieurs de chaque sport sont-ils spécialisés ou se partagent-ils divers domaines ?*

Tout dépend des disciplines. Dans une série mondiale, on a des équipes qui sont en règle générale assez conséquentes et les ingénieurs sont bien souvent spécialisés dans chaque domaine. A nouveau, en F1, ce type de sectionnement est poussé à son paroxysme.

Dans la FIA, ce n'est pas du tout le même schéma. Les équipes sont beaucoup plus restreintes. Ainsi, dans un département technique, certaines équipes sont un peu plus spécialisées dans le domaine de l'aéro, d'autres dans les moteurs etc. Chaque équipe a un domaine et peut intervenir dans différents sports au sein de ce domaine. Dans la FIA, ce ne sont pas du tout les équipes qu'on retrouve à Enstone.

Dans les écuries -les grandes en tout cas- en effet, les ingénieurs sont très très spécialisés, ce n'est pas le même niveau d'expertise. Un ingénieur peut très bien être commissionné spécifiquement pour l'étude de l'aérodynamisme du troisième appendice de l'aileron arrière gauche... On retrouve ce phénomène dans d'autres sports, mais c'est impossible dans une institution comme la FIA.

- ❖ *Je suppose que les normes de sécurité sont accrues pour les motos, comment cela se traduit-il pour les ingénieurs concernés, et dans la réglementation ?*

Ici nous ne sommes plus dans le domaine de la FIA, c'est la FIM. En terme de sécurité, les normes sont drastiques pour l'homologation des circuits. Certains sont en effet homologués F1 mais pas Moto. Par ailleurs, les normes sont très strictes également sur l'équipement (casque, combinaison etc...). Mais, en réalité, il existe peu de réglementation sur le véhicule en soi, comparativement à la F1. Ce sport reste beaucoup plus dangereux : il n'y a pas de coque de survie comme en F1.

- ❖ *Dans l'univers de la Formule 1, les cycles industriels et de développement sont très serrés, est-ce le cas pour les autres sports également ?*

Ceci est fonction principalement du règlement, et de son niveau de permittivité. Les règlements édités impliquent parfois des changements (par exemple le passage, d'une année à l'autre d'un V8 à un V6) tels, que les cycles sont très courts. Il s'agit surtout d'optimisation. Chaque département va chercher à optimiser l'efficacité d'une pièce très précise. En sport mécanique de façon générale, ça n'arrête pas de tester, d'échouer, de tester à nouveau, de prouver... Avec des moyens variables bien sûr, mais ça n'arrête jamais. Les calendriers sont très serrés, quelles que soient les disciplines.

Ce qui se fait de plus en plus en revanche, c'est la simulation. Les effets (déportance, traînée...) que ces outils deviennent indispensable ! Et puis, la simulation a fait de tels progrès qu'on peut faire beaucoup de choses maintenant. Cela développe beaucoup les interactions entre écuries et centres de recherche.

- ❖ *Existe-t-il, selon vous, une synergie/un échange entre les domaines du sport et ceux des véhicules de série dans les industries concernées ?*

On utilise effectivement les sports mécaniques comme un laboratoire particulièrement exigeant, un environnement hyper sévère, donc un lieu d'incubation, de test de solutions qui ont vocation à être déclinées dans des véhicules de série. Aujourd'hui, néanmoins, compte tenu de ce que l'on peut faire en simulation, il n'est pas toujours indispensable de tester sur piste. Tout dépend des domaines. Par exemple, l'hybridation est beaucoup testé lors de la course du Mans (Audi, Porsche, Toyota). les technologies qui en sont issues peuvent être utilisées dans les voitures de série par la suite. Compte tenu de la réglementation CO2 de plus en plus sévère, les constructeurs planchent sur le down-sizing

moteur et la récupération d'énergie. Sur ces exemples, les tests du Mans sont très utiles. Dans certains domaines, les connections sont donc assez directes mais il faut reconnaître aussi qu'il y a beaucoup de domaines dans lequel celles-ci sont faibles. Par exemple, tout le travail sur l'aérodynamisme en Formule 1 est unique et n'a pas de déclinaison dans les voitures de série.

- ❖ *Les considérations environnementales sont-elles au coeur des débats ou les estimez vous anecdotiques par rapport aux attentes sur la technique et la recherche d'audience ?*

Absolument pas anecdotiques ! Autour de la Formule E, michelin a inventé un pneu qui utilise de la silice et qui réduit grandement la résistance au roulement. Il faut savoir que le pneu influence à hauteur de $\frac{1}{4}$ la consommation du carburant. Les préoccupations environnementales sont au coeur de la politique de Michelin. A la fin des années 90, la mise en place d'un forum, Movin'on, qui a pour vocation de réunir l'ensemble des acteurs de la mobilité, pour dégager des solutions durables, est lancé par Michelin. Cet évènement est reconnu comme étant le Davos de la mobilité, l'endroit où se développent les plus belles réflexions sur une mobilité plus durable. D'ailleurs, nous avons été retenu par la Formule E parce que la stratégie et les valeurs de notre entreprise sont en adéquation avec celles de ce nouveau championnat.

Par exemple, les pneus de la Formule E sont faits de telle sorte à ce qu'ils durent l'ensemble du weekend de course, ce qui n'est pas le cas en Formule 1, où les pneus sont sans cesse changés pendant la course. On cherche dans nos engagements à rejoindre cette approche de l'entreprise : moins d'utilisation de matière, recyclage... Nous développons des pneus de compétition mais qui sont capables, comme les pneus des voitures de série, de fonctionner sur route mouillée et sèche. De la même façon, en championnat du monde des rallyes, nous avons divisé par 2 le nombre de pneus pour réduire la fabrication, le transport. Au Mans, ce sont 5 relais (d'une centaine de km), ce qui représente 2 grands prix de F1, qui sont réalisés avec un seul pneu.

Pour ce qui est de la F1 : ces questions sont aussi au coeur des réflexions parce que tout le monde se rend bien compte que la mobilité dans 10/20 ans ne sera plus du tout la même. Les jeunes, c'est-à-dire votre génération, n'a d'ailleurs pas du tout la même vision de la mobilité. Cela s'est traduit par l'arrivée des V6 hybrides qui consomment beaucoup moins qu'avant. La difficulté, c'est qu'il faut être capable d'associer ces orientations à une conservation du spectacle qui fait de la F1 un modèle économique viable.

Ces questions n'ont donc pas du tout la même maturité selon les championnats, mais elles existent dans chacun.

❖ *Quel avenir pour la Formule E ? Pensez vous qu'elle puisse un jour remplacer la F1 ?*

Il est très difficile de pouvoir répondre de façon définitive à cette question. En 2014, personne n'aurait pu prévoir ce qu'il se passe en ce moment. La première course en Chine à cette date a représenté un vrai challenge. Ça a été très compliqué, mais réalisé et finalement tout s'est bien passé ! De même, tout le monde pensait que la saison n'irait pas à son terme, et elle l'a été ! Puis que ce ne serait que l'histoire d'une année mais tout s'est bien passé jusqu'à maintenant. Des questions ont également été soulevées sur l'équilibre financier de la discipline mais celui-ci se porte bien.

En ce qui concerne les performances, les Formule E sont beaucoup plus puissantes et spectaculaires cette année. Lors de la saison 2017, qui s'est terminée cet été, les pilotes étaient obligés de changer de voiture au milieu de la course. On commence dans quelques jours une nouvelle saison, qui voit une nette évolution dans la technologie des batteries avec une puissance accentuée et la possibilité de faire la course entière dans une seule monoplace ! Par ailleurs, l'arrivée de Mercedes, Nissan, Audi et Porsche en 2019 représente une évolution énorme ! Il n'y a jamais eu autant de constructeurs impliqués en même temps dans une discipline. C'est d'ailleurs beaucoup plus qu'en F1.

Donc oui, peut être qu'un jour on peut imaginer que la Formule E remplace la F1. Mais c'est compliqué à affirmer. Il est plus probable que les deux disciplines cohabiteront.

❖ *Nous avons vu que la FIA soutenait des projets de Smart Cities, ont-il pour ambition de contribuer au développement de solutions dans les transports en commun ? Quels sont les projets à ce titre ?*

C'est un projet qui est connexe aux engagements de la Formule E. C'est d'ailleurs un projet tout à fait marginal. Cela étant dit, l'initiative est très cohérente avec la mobilité durable, les nouveaux modes de consommation dans le domaine de l'automobile. Cette initiative est appelée à se développer. Jean Todt y assiste régulièrement. C'est un sujet mobilisateur mais qui, en terme de déclinaison, reste marginale. Il est néanmoins clairement dans la tendance.

❖ *Quel public pour la Formule E ?*

Des études sont menées, mais dont on peut challenger la qualité des résultats. Assez naturellement, pour les circuits de F1, il faut faire une démarche pour se déplacer. Le public est volontaire. En Formule E en revanche, les courses ont lieu en plein centre ville. Le public est plutôt plus familiale, plutôt plus jeune, plutôt plus connecté. La moto accueille elle aussi l'électrique dans le pinacle des sports moto : la Moto GP. C'est une démarche assez astucieuse car aujourd'hui ils sont plus éloignés de l'écologie que dans le domaine de l'auto. On va entendre parler plus de l'électrique dans les sports automobiles.

- ❖ *Nous avons vu que dans l'organisation des championnats de Formule E, l'ensemble des processus étaient optimisés afin de réduire, à toutes les échelles, l'empreinte environnementale de ces évènements, est-ce une réalité ?*

C'est une réalité dans la mesure où systématiquement ce sont des solutions de type énergie verte qui vont recharger les batteries, les véhicules utilisés pour le transport sont le plus possible électriques, l'optimisation des processus est aussi une démarche qui est très prônée.

Il faut aussi reconnaître que quelle que soit la discipline, l'impacte environnemental de tout évènement est fort. C'est plutôt le public qui se déplace qui augmente l'empreinte carbone, ainsi que les avions cargos. A partir du moment où on déplace une équipe, des pièces, des voitures, des barrières de sécurité et tout ce que vous voulez dans le cadre d'un évènement de cette ampleur, l'empreinte environnementale grossit. Ce que met en avant le promoteur de la Formule E, c'est qu'on ne prétend pas avoir une empreinte neutre mais qu'on souhaite surtout démontrer que la voiture électrique est intéressante. On peut y retrouver à la fois une mobilité plus propre et l'émotion d'un sport. Il s'agit donc principalement de quelque chose de positif dans le cadre d'une évolution sociétale.

Visioconférence La F1 et l'aéronautique

Le troisième jour de notre MIG, dès notre arrivée au CEMEF, nous avons eu le droit à une visioconférence idéale pour notre sujet et présentée par Dominique Madier (<http://www.devinci-ing.com>).

I - Des défis partagés

1) Une régulation et des certifications

Il y a en aéronautique, et plus particulièrement dans le transport civil, une législation à respecter. Elle est décrite par la FAA (Federal Aviation Administration) en Amérique et l'EASA (European Aviation Safety Agency) en Europe qui contrôlent lors de la fabrication et pendant toute la vie du véhicule la réponse aux critères de sécurité qu'ils imposent (enveloppe de vol, vibrations, etc).

En F1, les règles sont dictées par la FIA (Fédération Internationale de l'Automobile) pour assurer la sécurité des pilotes, mais aussi que l'audience soit au rendez-vous (c'est avant tout un business).

2) Performances aérodynamiques

Dans les deux domaines, la traînée est source de pertes et fait donc partie des ennemis privilégiés des aérodynamiciens.

En revanche, en aéronautique, la portance est optimisée alors qu'en F1 c'est la déportance : à 350 km/h la force de déportance correspond au quadruple du poids du véhicule.

3) Recherche du poids minimal

L'aluminium et ses alliages font parties des matériaux les plus utilisés lorsque l'on souhaite diminuer le poids tout en conservant les propriétés mécaniques souhaitées. Cependant, cela peut présenter des problèmes d'oxydation indésirables. Les ingénieurs travaillent également sur l'optimisation des géométries pour trouver le meilleur compromis entre poids et performance (un problème qui s'aggrave avec l'arrivée des moteurs électriques) car moins de poids signifie moins d'énergie nécessaire à la mise en mouvement et donc meilleure accélération.

4) Matériaux hautes performances

A la recherche d'efficacité, les ingénieurs se tournent de plus en plus vers les matériaux composites. Sont essentiellement utilisées la fibre de carbone associée à une matrice en polymère et la structure sandwich en nid d'abeille. Ils assurent une grande rigidité en flexion pour un poids minime. Cependant, quelques défauts, sur lesquels travaillent les chercheurs, nous empêchent d'en abuser : ils résistent peu aux chocs - ce qui est problématique pour des pièces de carrosserie ou de fuselage, ils ont une mauvaise empreinte écologique et posent des problèmes de toxicité à proscrire à tout prix dans l'aéronautique dans l'hypothèse d'un accident.

5) Motorisation optimale

Dans un avion ou une voiture, le principe reste le même : compresser, brûler, détendre mais l'architecture est différente dans les deux domaines.

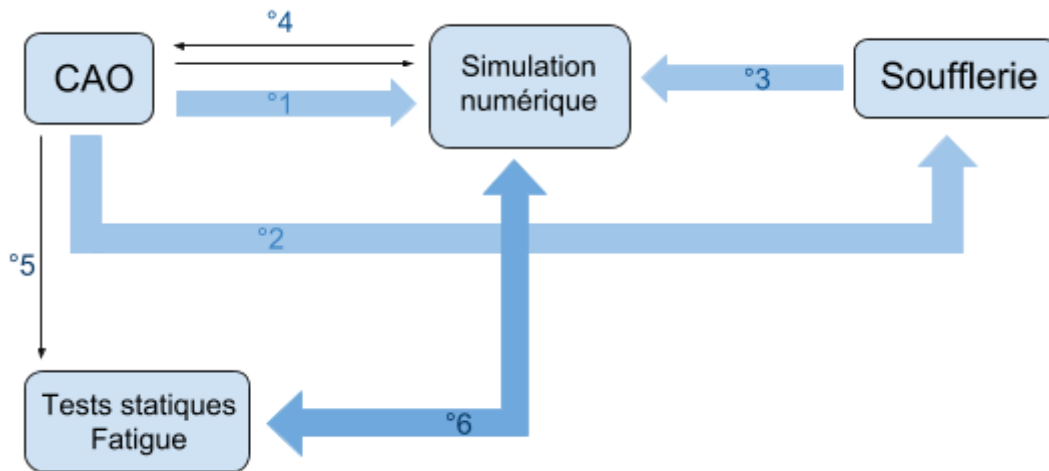
Les trois moteurs utilisés en aviation sont les suivants : le turbojet, le turbofan et le turbopropulseur atteignant autour de 80% de rendement. En Formule 1, le moteur à quatre temps, un classique toujours plus optimisé, reste maître. Les quatre temps sont l'admission, la compression, l'explosion et l'échappement. Il s'agit alors de travailler à chaque niveau de vie du carburant (et de l'énergie) pour dépasser les rendements d'hier qui ne vont toujours pas au-dessus des 50%.

6) Outils de conception

Trois outils sont utilisés. La CAO (Conception Assistée par Ordinateur) est là pour remplacer les planches à dessin. Elle permet une création et une modification de concepts 3D et une transmission de l'information entre logiciels essentiellement pour réaliser des simulations numériques. Celles-ci permettent de prévoir les comportements des pièces devant des contraintes avant d'entrer dans une phase de production et évitent alors un grand nombre de prototypes.

Une simulation est compliquée à mettre en oeuvre, cela fait partie des grands domaines de recherche aujourd'hui, puisqu'il faut choisir des hypothèses correctes, décider d'un maillage adapté au calcul voulu et transformer les équations aux dérivées partielles en systèmes algébriques. Parmi les logiciels de calcul par éléments finis, Catia et Nastran sont les préférés respectifs de l'automobile et de l'aviation.

Le dernier outil est la soufflerie. On y recherche des corrélations entre résultats numériques et réalité pour valider des modèles. Le schéma suivant explique brièvement l'emploi des outils en synergie :



On commence par la CAO, on réfléchit au design et aux matériaux puis on crée des modèles exploitables en simulation numérique (°1), et en soufflerie (°2). Lorsque les résultats de la soufflerie sortent, on alimente la simulation avec (°3). Ces trois étapes peuvent être répétées de manière itérative pour améliorer le design initial (°4). Le prototype peut alors être construit et soumis à des tests (°5). Si les résultats diffèrent de la simulation au-delà de 10%, il faut revoir le design et le logiciel. On corrèle alors avec celle-ci pour la perfectionner (°6). Le produit est optimisé et terminé avec les simulations et la CAO, plus besoin du prototype sauf en cas de changements trop radicaux de la structure.

II - Focus sur la F1 : de 1950 à nos jours

Aujourd'hui les objectifs en F1 n'évoluent pas beaucoup d'une année sur l'autre. Il s'agit toujours de jongler avec les nouvelles règles de la FIA pour améliorer les performances de la voiture et plus particulièrement son accroche au sol, tout en diminuant la traînée. Le moteur n'est pas le cœur de la recherche puisque cela coûte cher et apporte des rendements trop faibles, surtout pour le rythme auquel la F1 évolue.

La déportance provient à 25% des ailerons avant et arrière, et à 65% du fond plat. Les ailerons permettent également la création de vortex qui canalisent l'air autour de la voiture, notamment au niveau des roues, importantes génératrices de turbulences. L'ajout du halo augmente la portance du véhicule ainsi que la traînée, c'est donc une source de problèmes pour les ingénieurs de la F1.

1) La coque

En 1950, les premières voitures n'avaient aucune considération aérodynamique. La seule évolution fut de reculer le moteur à l'arrière du véhicule pour diminuer la traînée.

Une grande avancée dans les années 60 fut l'idée de Colin Chapman de fixer des ailerons sur les suspensions du véhicule. Avec un montage astucieux il était possible de changer l'incidence en course en fonction de l'inclinaison de la voiture dans les virages. Des accidents graves ont mené la FIA à interdire ce dispositif.

Dans les années 70, on intègre enfin l'aérodynamisme à la conception de la voiture. Les premiers modèles d'ailerons apparaissent, avec des bords larges à l'arrière pour éviter les courants de fuites.

On parle beaucoup, dans les années 80, de déportance et avec les recherches de Chapman apparaît la voiture à effet de sol : le dessous de la voiture est une aile d'avion à l'envers qui, grâce à l'effet Venturi, provoque une déportance très forte, si bien que l'aileron avant disparaît. Cependant, des problèmes d'instabilité poussent à l'interdiction des voitures à effet de sol. Pour éviter les effets de bords sous la voiture plusieurs systèmes sont imaginés (brosses en nylon, ressorts, etc) mais ce n'est pas efficace et pousse à l'utilisation d'un fond plat.

Au fur et à mesure, on continue d'allonger le nez de la voiture pour des raisons aérodynamiques, mais dans les années 90 Jean-Claude Migeot, aérodynamicien français, propose de relever le nez de la voiture pour alimenter le flux d'air sous la voiture ce qui améliore de manière significative la déportance. On se retrouve vite avec une déportance aussi importante qu'avant l'interdiction des voitures à effet de sol, si bien que la FIA oblige les fonds en escaliers (le but étant d'éloigner le fond du sol, pour diminuer l'aspiration).

Depuis 2000, une grande optimisation a été obtenue au niveau des ailerons, du diffuseur (partie arrière du fond plat qui augmente la déportance lors de l'échappement de l'air) et de la carrosserie. Les déflecteurs permettent notamment, à partir des ailerons avant, de canaliser l'air propre qui sera employé par l'aileron arrière pour avoir toujours une meilleure accroche. C'est là que le halo intervient : mettre un objet non adapté au flux directement au milieu de la carrosserie est un nouveau problème à contourner pour les ingénieurs.

1) [Le châssis](#)

L'objectif premier d'un châssis performant est toujours le même : assurer que la voiture ne se disloque pas pendant la course, et le pilote avec. Viennent ensuite les aspects de raideur, de vibration, de complexité et de poids qui entrent dans l'équation.

Le premier modèle était le *châssis ladder* dont les éléments organisés de manière orthogonale permettaient de résister aux efforts dans toutes les directions. Ce concept n'était pas très efficace et a été modifié en 1960 pour un *châssis tubulaire* à base triangulaire dans lequel on évite les efforts en torsion et en flexion.

La dernière innovation fut le *châssis monocoque*, au début construit à partir de plaques d'acier rivetées puis entièrement fait en composites (fibres de carbone et kevlar). Il est même moulé en une fois pour assurer de meilleures propriétés mécaniques. On a ici un exemple performant d'utilisation des composites, très résistants et très légers, idéals pour la Formule 1.

2) [Le moteur](#)

Le poids des moteurs a chuté jusqu'en 2005 où l'obligation de récupérer l'énergie de freinage a poussé à sa réaugmentation. Les moteurs turbos, jugés trop dangereux, sont interdits en 1990 au profit des moteurs atmosphériques. Jusqu'en

2014, où elle impose un moteur à 1.6L V6 hybride et avec 15000 t/min au maximum, la FIA n'a de cesse de diminuer la puissance des moteurs. Une puissance souvent vite récupérée par les constructeurs avec des architectures différentes mais la même réponse au problème.

III - Deux domaines tournés vers l'avenir

1) [L'aéronautique dans le futur](#)

Ont été évoqués :

- Les avions Wing Body
- Les avions modulaires
- Les taxis volants

2) [La Formule 1 dans le futur](#)

La F1 va évoluer vers un design plus agressif comme le veulent les consommateurs de sport mécanique, le but étant de rendre la F1 plus "sexy". On se dirige petit à petit vers une apparence plus épurée et futuriste (vers 2021). Un cockpit fermé est aussi envisagé, en attendant le halo est un compromis entre protection et tradition.

La transition la difficile est sans doute celle du "full electric". Une fusion de la Formule 1 et de la Formule E en soit, mais peut-être que les moteurs thermiques ont encore quelques belles années devant eux.



Dimensionnement

Charlotte Desanges
Mathis Egnell
Inès Malot

Matériaux

Jules Enezian
Camille Nodet
Benjamin Sykes

Coordination

Martin Bouthiaux
Maxime Renault

Aéro - F1

Théophile Bousquet
Théodore Michel
Théophile Mulsant

Aéro - Halo

Julie Chalony
Julien Di Mascolo
Antoine D.d.P.