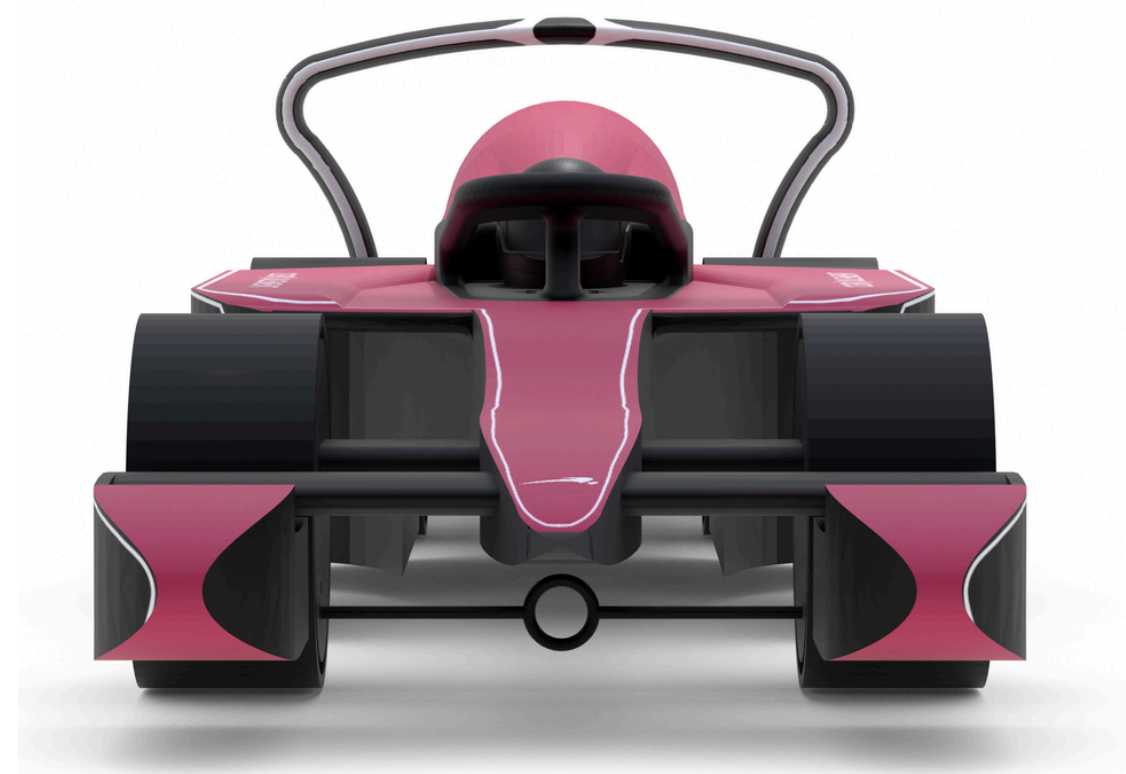


SOAR

Portfolio design et ingénierie



- 02-03 Premiers éléments
- 03 Moyens Techniques
- 04-07 Développement
- 08 Fabrication et attendus
- 09-10 Tests
- 11 Axes d'améliorations/design



PREMIERS ÉLÉMENTS

Avant de se lancer dans la conception, il est crucial de considérer toutes les étapes et outils utiles à cette dernière. Nous avons ainsi mené une réflexion sur tous les éléments nécessaires à la conception d'une voiture rapide, usinable et fiable.

Dans cette partie nous décrivons la méthode de travail implémentée, les objectifs et contraintes fixées pour la SOAR-01 et tous les facteurs influents pris en compte et finalement la liste des outils utilisés pour mener à bien la conception de la voiture.



Louan et Raphaël en entretien avec deux ingénieurs de SKF Racing

LES IMPÉRATIFS DE LA SOAR-01

SOAR-01 est la première monoplace développée par l'écurie STEM Racing SOAR. L'objectif principal de la voiture est d'aller le plus vite possible le jour de la compétition, tout en restant réglementaire.

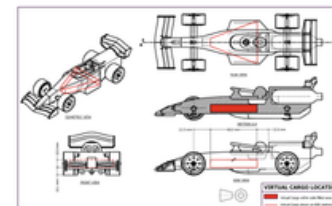
RÈGLEMENT

La compétition est régie par un règlement technique très précis. L'étude approfondie de celui-ci est crucial pour développer la voiture la plus performante. Il faut jouer avec les limites, sans la dépasser.

Dans ce règlement, nous avons déterminé les contraintes principales :

- L'intégration sur le châssis du virtual cargo
- Le poids minimum de 48g
- La largeur minimum de la voiture et la largeur du bloc STEM Racing

T4.3 Identification du virtual cargo - [GÉNÉRAL - Pénalité - 5 pts]
L'emplacement du virtual cargo et sa conformité DOIVENT être clairement dimensionnés et identifiés par des lettres, des chiffres ou des couleurs dans les dessins d'ingénierie soumis à l'inspection technique. Veuillez vous référer à l'exemple de diagramme ci-dessous, qui montre le virtual cargo clairement noté en évidence en rouge.



Extrait du Règlement Technique PRO-UNIV 2025-26

MÉTHODE DE TRAVAIL

Le design et l'ingénierie de la voiture ont été entièrement réalisés à deux par Raphaël et Louan. Le travail s'est fait de manière collaborative, avec une répartition des tâches basées sur nos compétences respectives. Nous avons travaillé en collaboration tout au long du projet, en échangeant régulièrement nos idées, nos propositions de design et nos solutions techniques.

La conception a été réalisée par étapes successives, comprenant des phases de réflexion, de tests et d'améliorations. Cette méthode de travail en binôme a apporté une nouvelle dimension au projet. En effet grâce à la confrontation de nos points de vue, nous avons amélioré la qualité finale de la voiture et optimiser à la fois l'aspect esthétique et technique.

FACTEURS INFLUENTS

Lors de la course, une quantité limitée d'énergie est disponible. Il est donc important d'identifier les facteurs permettant d'apporter de l'énergie, où d'en perdre.

On se doit d'optimiser les apports d'énergie, pour avoir la voiture la plus performante possible. Dans les paragraphes qui suivent, nous étayerons notre stratégie afin d'avoir la voiture la plus performante.

ENERGIE DISPONIBLE: LA CARTOUCHE DE GAZ

L'entièreté de l'énergie disponible pour faire avancer la voiture vient de la cartouche de CO2. Il est donc crucial de connaître la poussée lorsque celle-ci est percutée pour réaliser une étude de performance. Nous avons cherché comment déterminer cette poussée en fonction du temps.

Méthode 1 : Par le calcul

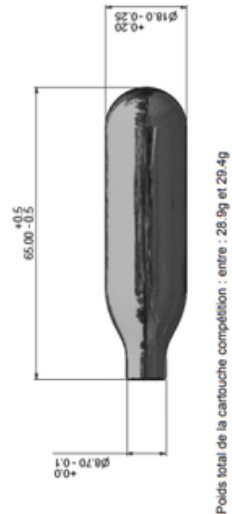
Après avoir récupéré les références des cartouches, nous avons voulu déterminer la poussée en fonction du temps par le calcul, en s'aidant de nos professeurs, d'Internet et de l'IA.

Nous avons conclu après quelques heures d'étude qu'il était trop difficile d'effectuer ces calculs, au vu de la complexité des paramètres : pression saturante, variations fortes de températures et les différents états des gaz.

Méthode 2 : Expérimentalement

Lors d'une visite chez SKF, nous avons eu accès à des instruments de mesure permettant d'avoir la poussée en fonction du temps.

En réalisant un montage qui sera détaillé dans la partie "Test", nous avons obtenu des valeurs de poussée en fonction du temps. Ce montage a été effectué chez SKF Racing



Dimensions officielles de la cartouche de gaz

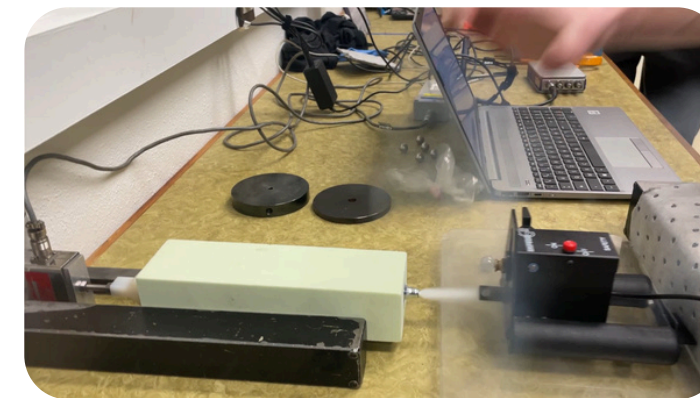


Image d'un test de poussée

3/ Frottement des roulements

Les roulements sont indispensables à notre monoplace car ils permettent de limiter les frottements liés à la rotation des roues. Parmi les forces de frottements liées aux roulements, deux d'entre-elles se distinguent :

- La première directement liée à la rotation des roues
- La deuxième sous forme de couple minimum nécessaire à entamer le roulement des roues

PERTES D'ÉNERGIE

1/Traînée aérodynamique

La traînée aérodynamique est une force horizontale dirigée dans le sens inverse du mouvement, qui dépend de la vitesse de la voiture. Cette force s'exerce tout au long de la course. Elle se calcule avec la formule suivante :

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_x$$

Il est donc important d'avoir la surface frontale la plus petite possible ainsi qu'un Cx le plus bas possible.

2/ Frottement des roues

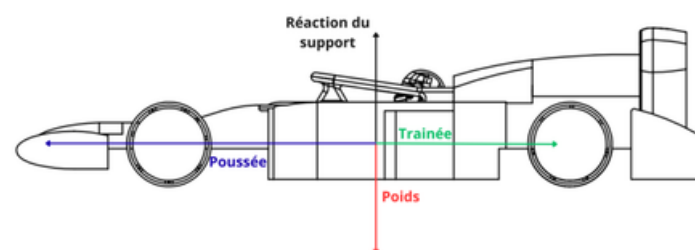
La poussée de la voiture étant tellement brève, la transmission de l'effort ne pourra pas s'effectuer sans glissement. Il faut donc que la force de ce glissement soit la plus faible possible. Nous pouvons calculer cette force avec la formule suivante :

$$\text{Si } \vec{V}(M/R) \neq \vec{0} \text{ (glissement), } |T| = \mu_d |N|$$

Ici, N correspond à la force verticale s'exerçant sur le point de contact, et μ correspond au coefficient de frottement des deux matériaux.

4/ Frottements entre la guide et le câble

La guide risque de frotter avec le câble. Cette force se calcule de la même manière que celle des frottements des roues. Il faut donc un μ le plus faible possible, et une voiture suivant la trajectoire la plus droite pour limiter la norme de N.



Bilan des Forces exercées sur la voiture

FIABILITÉ

Une voiture performante qui ne finit pas la course est inutilisable.

La fiabilité de la voiture se joue sur 2 aspects majeurs :

- La résistance des tests effectués sur la voiture
- La résistance de la voiture aux contraintes lors d'un run de course

MOYENS TECHNIQUES

CAO

La CAO (Conception Assistée par Ordinateur) regroupe les outils et méthodes permettant de concevoir, modéliser et visualiser des objets ou systèmes en 2D et 3D à l'aide d'un logiciel. Elle est fréquemment utilisée en ingénierie et en design pour développer des produits, tester des solutions techniques et préparer la fabrication.

FAO

La FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) regroupe les outils et méthodes permettant de préparer et piloter la fabrication de pièces à partir de modèles numériques, en définissant les procédés de production, les paramètres machines et les trajectoires de fabrication. Elle est utilisée en ingénierie et en design pour transformer une conception issue de la CAO en un objet réel, que ce soit par usinage CNC ou par fabrication additive, tout en assurant la faisabilité, la précision et la qualité des pièces fabriquées.

CNC

La CNC (Commande Numérique par Calculateur) désigne l'ensemble des machines-outils pilotées par un ordinateur, permettant de fabriquer des pièces avec une grande précision à partir d'instructions numériques. Elle est largement utilisée en ingénierie et en industrie pour l'usinage de pièces par enlèvement de matière (fraisage, tournage, perçage) et permet de produire des composants précis, répétables et conformes aux exigences techniques définies lors de la conception. Seul notre châssis est usiné par C.N.C.

IMPRESSION 3D

L'impression 3D est un procédé de fabrication additive qui consiste à créer un objet physique couche par couche à partir d'un modèle numérique. Elle permet de produire rapidement des pièces complexes, sur mesure ou prototypes, avec une grande liberté de forme, et est couramment utilisée en design, ingénierie, prototypage et fabrication de petites séries.

La préparation des impressions se faisait avec le slicer CrealityPrint (logiciel permettant le paramétrage de l'impression). Dans celui-ci, nous changeons les sens des impressions, les pourcentages de remplissage, ajustons les supports, pour améliorer la solidité suivant les efforts.

Par exemple, un tube soumis à un effort radial doit être imprimé par couches horizontales. Ainsi, à la manière d'un arbre, la résistance sera accrue

Lors de nos impressions, nous avons utilisé deux types de filaments. Vous trouverez ci-dessous un descriptif de ces deux filaments, pour faciliter la compréhension du portfolio lorsque l'on citera plus tard ces filaments.

HYPER PLA VS LW PLA

Filament	Hyper PLA	LW-PLA
Objectif Principal	Rapidité et fiabilité visuelle	Allègement maximal
Densité / Poids	Standard	Réduite de 40 à 60 % (Expansion)
Résistance	Correcte	Faible (Structure expansée)
Qualité de Surface	Propre dès l'impression	Nécessite un post-traitement



Exemple d'aileron imprimé en LW PLA

FEA

La FEA (Finite Element Analysis – analyse par éléments finis) regroupe les outils et méthodes permettant de simuler le comportement mécanique des pièces soumises à des efforts, tels que les contraintes, les déformations et les déplacements. Elle est largement utilisée en ingénierie pour vérifier la solidité, la résistance et la fiabilité des composants, en analysant leur réaction face aux charges et conditions limites, afin de valider les choix de conception avant la fabrication.

C.F.D

La CFD (Computational Fluid Dynamics / mécanique des fluides numérique) est une méthode de simulation numérique des écoulements de fluides et des échanges thermiques. Elle permet d'analyser le comportement de l'air ou des liquides autour d'un système (aérodynamique, résistance, refroidissement) sans recourir uniquement à des essais physiques, ce qui aide à optimiser les performances dès la phase de conception.

DAREL PRÉCISION

Darel Précision est une entreprise de mécanique de précision spécialisée en usinage par tournage, fraisage et électroérosion.

SKF RACING

SKF Racing est un leader mondial du roulement en sport automobile, partenaire des plus grandes équipes en F1, WEC, MotoGP et WRC.

NICOLAS GAUCHET

Nicolas Gauchet est ingénieur aérodynamicien chez Renault, impliqué dans le développement aérodynamique de nouveaux modèles.

DÉVELOPPEMENT

CHÂSSIS

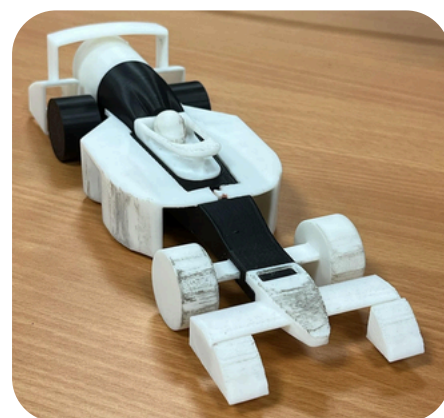
Le châssis est la pièce principale de la voiture. Le développement de cette pièce est donc crucial.

“ **Le but est de concevoir une pièce réglementaire présentant la masse la plus légère et le Cx le plus faible possible, tout en garantissant une interopérabilité totale avec les autres composants et une parfaite faisabilité en usinage CNC** ”

Cette première version illustre nos idées et propose une silhouette basse pour être moins exposée à l'air. En fusionnant l'espace du Virtual cargo avec celui du lest, nous avons pu relever la caisse et agrandir le passage d'air inférieur.

Le nez de 20 mm offre l'espace nécessaire pour ajuster facilement les suspensions et le guide. Enfin, l'assemblage est simplifié par des ouvertures rectangulaires où les éléments, comme les ailerons, seront directement collés.

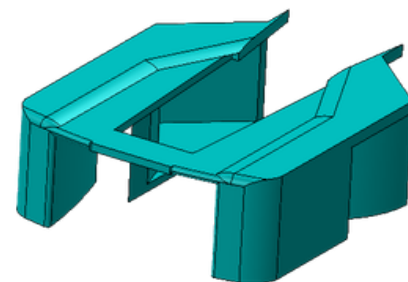
Le châssis s'est révélé trop large par rapport au bloc STEM Racing, rendant le concept irréalisable. Certaines géométries, notamment les arêtes vives, étaient non usinables selon les retours de l'usineur. D'autres formes posaient des problèmes d'assemblage à cause de mises en position trop complexes, identifiées lors du premier prototype imprimé en 3D. L'ensemble ne respectait pas le règlement, entraînant une non-conformité générale.



Première impression 3D du prototype

La voiture repose tout de même sur une philosophie générale cohérente, avec un couloir principal efficace favorisant l'écoulement de l'air, ainsi qu'une cheminée aérodynamique contribuant à une meilleure gestion des flux.

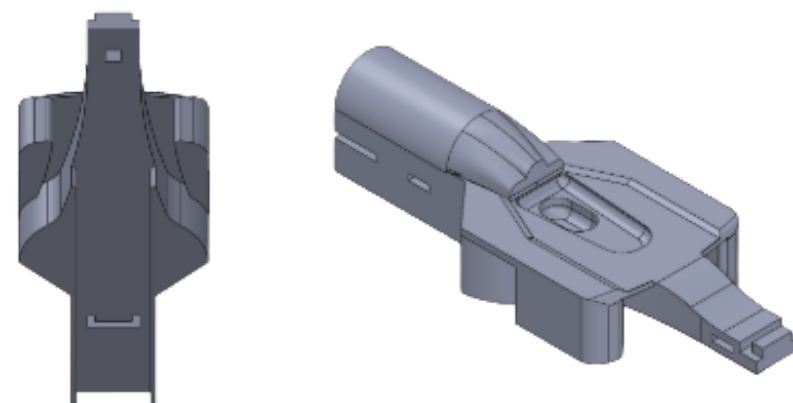
Pour compenser la taille du châssis supérieure au bloc STEM Racing, des pontons imprimés en 3D ont été conçus. Cette solution a permis d'obtenir une voiture de la même largeur, tout en respectant les contraintes d'encombrement du bloc.



Rendu SolidWorks des pontons 1

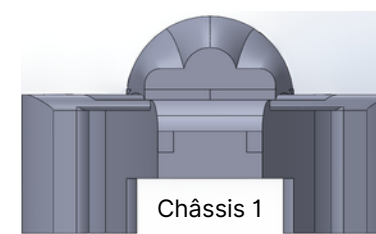
Premièrement, après lecture du règlement, et étude de monoplaces des années précédentes, nous voulions un couloir sous la voiture le plus grand pour minimiser la surface frontale exposée à l'air et réduire la traînée aérodynamique.

Deuxièmement, pour extraire l'air arrivant sur les roues arrière, un extracteur dans les pontons redirige l'air arrivant face aux roues. Cela permet de faire ressortir l'air sur le côté de la voiture.

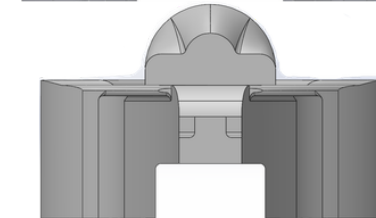


Rendu SolidWorks du châssis 1

La solution trouvée en apportant les pontons a vite été abandonnée au profit d'une voiture plus fine. En effet, nous faisons face à une incertitude réglementaire et un risque élevé de surpoids.



Châssis 1



Châssis 2

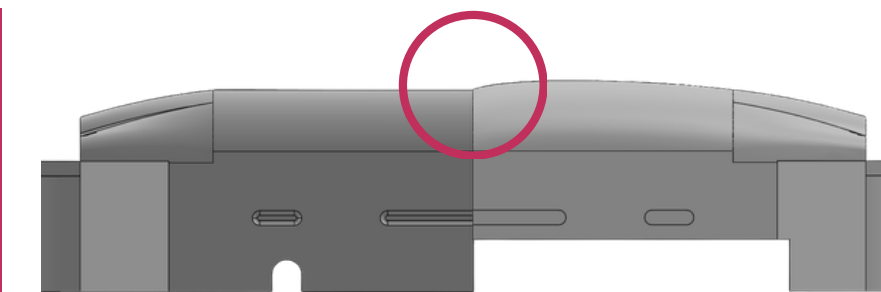
Le nouveau châssis est plus étroit et la surface frontale diminue. Les pontons sont plus profilés, tout en gardant l'espace nécessaire au stickers STEM Racing.

Cependant, le couloir sous la voiture devient plus étroit, limitant son efficacité. Malgré les modifications apportées, certaines formes restaient non usinables. La cheminée, trop droite, favorisait la traînée de pression, tandis que le nez, trop fin, ne permettait pas l'intégration d'un guide fixé sur le châssis.

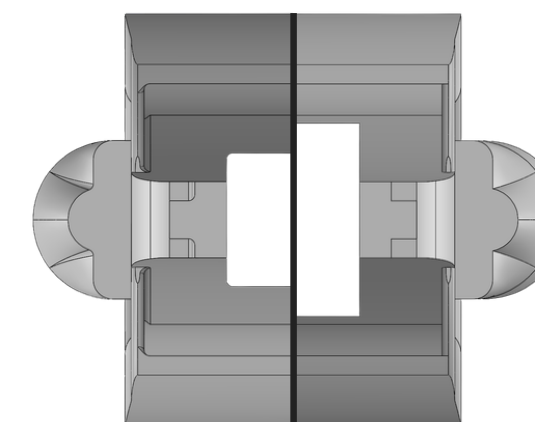


Ponton 1 - Ponton 2

Une évolution sur la cheminée permet de limiter la traînée de pression. Cette traînée est due au manque d'air derrière la voiture, créant une chute de pression et aspirant la voiture vers l'arrière. La nouvelle cheminée est courbée pour rediriger le flux d'air derrière la voiture. Nous avons établi avec Nicolas Gauchet que cette courbure ne doit pas dépasser 12 degrés.



Vue de profil des cheminées

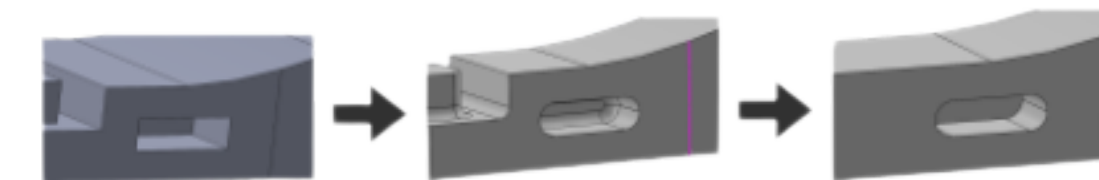


Ancien couloir Nouveau couloir

Pour redonner de l'efficacité au couloir, nous l'avons agrandi. Les pontons sont maintenant de la largeur de la roue arrière et le couloir est le plus grand que nous pouvons faire sans créer de perturbation.

Les géométries des assemblages ont été remodifiées, pour rendre le châssis usinable par CNC. Pour ce faire, nous avons dû changer tous les angles vifs, par des arrondis. Nous avons ensuite ajouté des congés, qui se sont montrés difficilement réalisables. Notre version finale propose des arrondis sans congés.

Pour tenir le châssis lors de l'usinage, des inserts ont été ajoutés sous la voiture. Cet endroit mêle stabilité et limite les perturbations aérodynamiques.



Évolution des formes pour la CNC

SUSPENSIONS / GUIDES

La suspension correspond à la pièce s'attachant au châssis sur laquelle repose le roulement de la roue.

Nous appelons guide, la pièce possédant un anneau sous la voiture, permettant de passer le câble de sécurité pour la course. Dans un premier temps, nos guides et suspensions étaient deux pièces séparées. Elles ont ensuite fusionné ce qui explique pourquoi nous les traitons conjointement.

Toutes les images représentent le système des roues avant. À chaque fois, un système similaire, adapté à la largeur correspondante, est présent sur les roues arrière. Nous choisissons de ne pas montrer celle-ci pour ne pas surcharger le portfolio.

Suspension

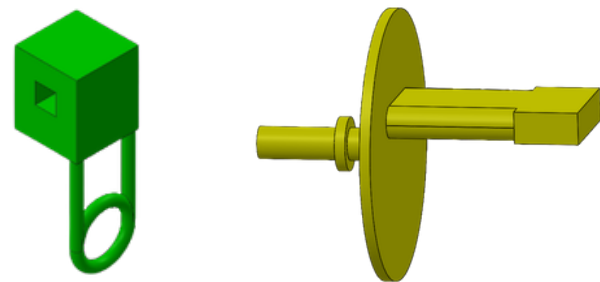
Les suspensions ont été conçues pour allier légèreté et robustesse afin de résister aux contraintes exigées en conditions réelles. Elles s'intègrent entièrement dans le châssis, tout en garantissant une bonne stabilité, y compris sous fortes sollicitations et en conservant des formes favorables à l'aérodynamique.

L'épaisseur et la hauteur sont identiques à celle de l'aileron avant. Elles sont fixées par collage directement dans le châssis. Un flan intégré à l'intérieur de la roue permet d'améliorer l'écoulement de l'air dans cette zone. Enfin, un épaulement sur l'arbre assure le centrage précis du roulement et, par conséquent, de la roue.

Guides

Les guides ont été optimisés pour être légers tout en restant suffisamment solides, notamment pour répondre aux contraintes liées aux tests spécifiques de cette pièce. Leur conception permet un montage simple et fiable, assurant une intégration cohérente avec l'ensemble du système.

Dans un premier temps, la guide était fixée verticalement sur le châssis. Cela apportait une forte solidité verticale, pour résister aux efforts réglementaires. Ce montage s'est avéré trop complexe, les géométries nécessitant une précision extrême pour le montage.



Rendu Solidworks de l'assemblage 1

Dans un premier temps, la guide était fixée verticalement sur le châssis. Cela apportait une forte solidité verticale, pour résister aux efforts réglementaires

Ce montage s'est avéré trop complexe, les géométries nécessitant une précision extrême pour le montage.

Du côté de la suspension cette première ébauche était assez peu solide sans congé et l'attache ne convenait pas pour la liaison au châssis.

Assemblage 1

Assemblage 2

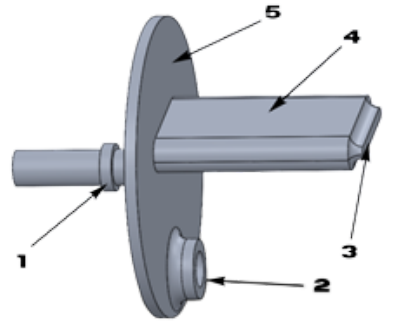
On peut voir sur cette seconde version, un arbre de 3mm qui correspond au diamètre de nos roulements. Sur cet arbre, nous avons rajouté un épaulement (1).

La guide se fixe sur les emplacements (2) de chaque côté, grâce à de la colle.

La seule modification par rapport à la première suspension est qu'à l'extrémité de la fixation, une géométrie (3) permettant de s'assurer de toucher le fond de l'emplacement prévu dans le châssis.

La fixation (4) au châssis est de la même épaisseur que les ailerons et à la même hauteur, la rendant invisible en vue de face.

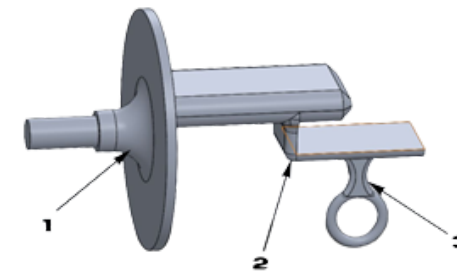
Le flan (5) permet de cacher l'intérieur de la roue, pour réduire les perturbations aérodynamiques.



Rendu Solidworks de l'assemblage 2

Cependant, la guide s'est révélée être trop peu rigide, compromettant sa tenue en conditions réelles. Sa géométrie la rendait également difficilement imprimable et nécessitait une précision de fabrication extrêmement élevée.

Assemblage 3



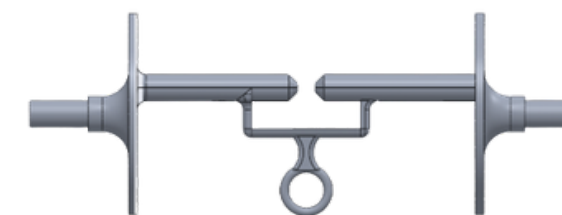
Suspension avant droite

Le congé (1) aide à la rigidité de l'axe.

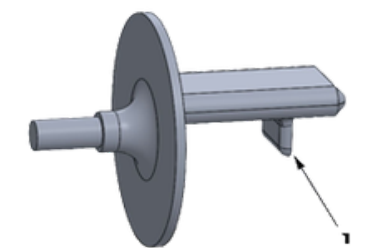
Le support (2) épouse le châssis et supporte la guide sans percer le châssis, qui admet un point faible à cet endroit là.

La guide (3) placée verticalement est rigidifiée à l'arrière par une nervure, permettant de résister aux efforts latéraux.

La suspension avant gauche est maintenue en position sous la voiture au support de la guide via un appui plan (1).



Vue des deux suspensions assemblées sans le châssis



Suspension avant gauche

ROUES

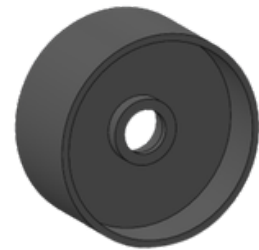
Les roues doivent faire entre 28 et 32mm de diamètre. Nous avons choisi de réaliser des roues de 29mm de diamètre, pour garder un millimètre de marge.

Toutes solutions techniques proposées ont les mêmes dimensions: 13.25mm de largeur pour les roues avant (13mm min réglementaire) et 17.25mm de largeur pour les roues arrière (17mm min réglementaire).

Cette taille est définie par la contrainte de la largeur du châssis. En effet, l'espace entre les roues avant minimum (38mm) et les roues arrière (30mm), ainsi que la largeur minimale des roues respectives implique une grande précision lors de l'usinage. Dans notre cas, la largeur entre nos roues est de 38.5mm à l'avant et 30.5mm à l'arrière.

Afin de les rendre les plus légères possibles, nous avons décidé de faire des roues non pleines sur l'extérieur, et de combler ce vide par un cache.

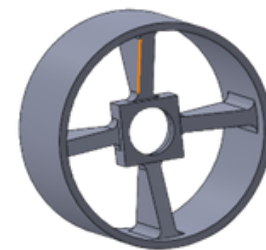
ROUE 1



ROUE 2



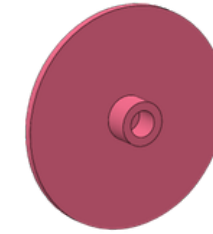
ROUE 3



Roues	Roue à disque central	Roue à rayons	Roue à 4 branches
Matériau	LW PLA	LW PLA	POM C
Poids (4 roues)	5g	4g	12g
Résistance radiale	Forte	Moyenne	Forte
Résistance axiale	Faible	Moyenne	Forte

Tableau récapitulatif des roues.

Contre-intuitivement, nous avons choisi les roues 3. Celles-ci étant usinées avec une grande précision, leur circularité est beaucoup plus précise. Leur roulement sera plus fluide, et il y aura moins de risques de frottements. De plus, le reste de la voiture est très léger donc nous pouvons nous permettre ce choix tout en restant au poids minimum.



Le cache roue est immobile car il est fixé sur l'arbre de roue. Son rôle est de fluidifier le flux d'air autour des roues. Cette zone est turbulente à cause de la rotation des roues.

Un jeu de 2mm est présent entre ce cache et la roue, pour éviter les frottements entre les deux, même en cas de léger rotulage.

ROULEMENTS

Pour entrainer en rotation nos roues en minimisant les frottements, nous avons choisi d'utiliser des roulements à billes.

Au vu de la petite taille de notre voiture, le choix des roulements est limité. Il faut trouver un modèle avec un diamètre intérieur compris entre 3 et 5mm et un diamètre extérieur compris entre 5 et 10mm.

Il existe deux grands types de roulements à billes: les céramique et les aciers.

Comparatif	Céramique	Acier
Résistance	■	
Durée de vie	■	
Poids	■	
Prix		■
Frottements	■	

Grâce à un partenariat technique avec 123Roulements, nous avons une large gamme de produits à notre disposition. Par conséquent, nous avons choisi des roulements céramiques. Plus particulièrement, des 3x7x2 de la marque générique, pesant 0.26g/pièce.

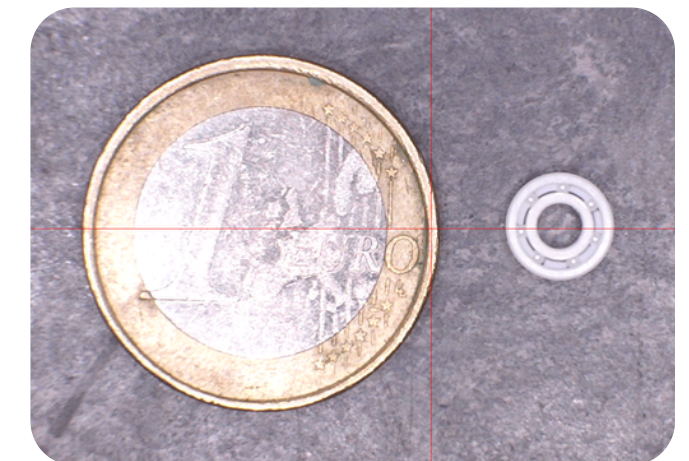
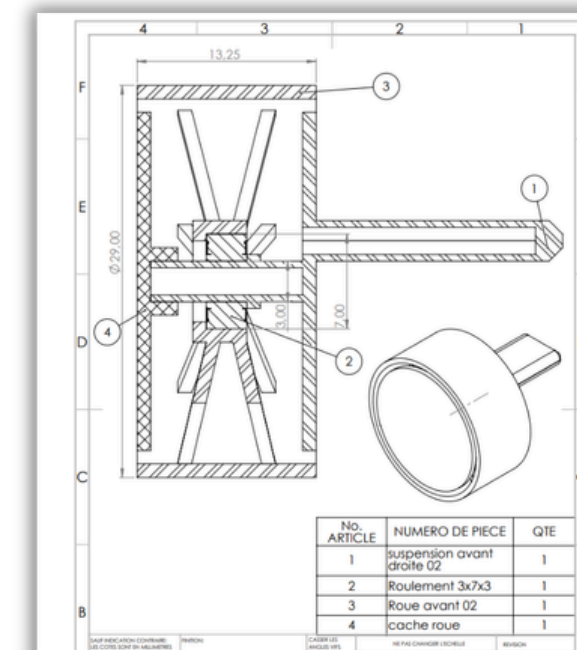


Photo d'un roulement à côté d'une pièce de 1€



Mise en plan d'un train roulant

AILERON AVANT

L'aileron avant est la première pièce de la voiture à rentrer en contact avec l'air. Il a donc une grande importance dans le développement aérodynamique de la voiture. Sa fonction principale est de dévier le flux d'air autour des roues avant afin de réduire la traînée. Pour maximiser notre pénétration dans l'air, nous avons conçu un profil neutre afin d'éviter de créer de l'appui aérodynamique inutile.

Le règlement limitant fortement la taille de l'aileron avant, il nous est impossible de couvrir l'intégralité de la roue. C'est pourquoi nous avons opté pour une géométrie particulière : l'aileron est directement emboîté au châssis. Afin d'optimiser cette pièce, nous avons développé les trois versions détaillées ci-dessous :

VERSION 1



VERSION 2



VERSION 3



Notre premier aileron possède un nez, une aile, ainsi qu'une partie plus épaisse devant la roue. La séparation entre les deux a pour but de respecter le règlement, l'aile avant devant faire au minimum 25mm de large.

Le nez est arrondi, pour favoriser la pénétration dans l'air.

La partie présente devant la roue sert à mieux pénétrer l'air devant la roue, et de limiter la traînée dû à la roue.

L'aile est à 16mm de haut par rapport à la piste, et fait 3mm d'épaisseur. Elle se trouve donc devant les suspensions, pour limiter la surface frontale. La forme de celle-ci est une goutte d'eau, pour pénétrer de la meilleure manière possible l'air.

La deuxième version de l'aileron avant reprend la première, en optimisant la forme devant la roue. Une forme plus arrondie permet d'optimiser la pénétration dans l'air. L'aile reste la même, et la forme du nez également.

Cette dernière version garde la même philosophie que la précédente, en optimisant quelques aspects.

La partie devant la roue est désormais arrondie sur les côtés, et poursuivi par des bords pour guider l'air.

Le support de cet aileron change à cause d'une modification sur le châssis.

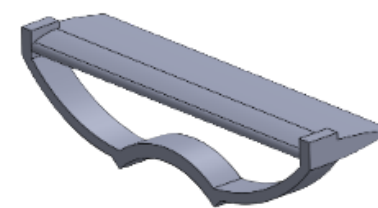
AILERON ARRIÈRE

Il y a deux contraintes majeures auxquelles notre aileron doit faire face.

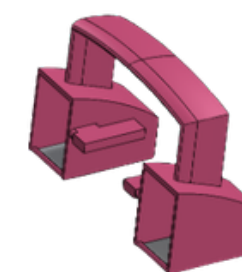
Premièrement, notre voiture étant de la largeur du block, elle fait en théorie 65mm de largeur. Ce qui, règlementairement parlant est acceptable, si l'on ne considère aucune imprécision. Nous devons donc prendre de la marge, et augmenter cette largeur.

Ensuite, la cartouche de CO2 devant être entourée par une "chambre de protection", il faut trouver un moyen de fixer l'aileron sans percer le châssis dans cette chambre, et sans augmenter la taille de celui-ci pour la performance.

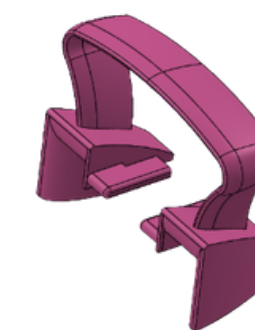
VERSION 1



VERSION 2



VERSION 3



Lors du développement de cette version, nous n'avions pas connaissance de l'importance d'une resserrée et que la largeur de notre voiture serait trop faible.

Nous avons donc développé un aileron qui se fixe au-dessus de la cheminée de la voiture, avec pour objectif de minimiser la surface frontale. La forme de l'aile est la même que pour l'aileron avant, en forme de goutte d'eau.

La deuxième version de notre aileron arrière intègre la resserrée et propose un nouveau système de fixation. OLe montage s'effectue par emboîtement arrière suivi d'un collage. Le profil de l'aile est conservé, tout en respectant une largeur maximale de 65mm.

La version 3 constitue une évolution du modèle précédent. Si le principe de fixation reste inchangé, sa géométrie a été légèrement ajustée. Nous avons approfondi le développement de la partie resserrée afin de réduire la traînée et d'éviter tout "effet parachute". Désormais, la forme spécifique de l'aile permet de respecter scrupuleusement les contraintes de largeur.



- Réduire le Cx de la voiture
- Augmenter la largeur de la voiture
- Être montable dans le châssis

FABRICATION ET ASSEMBLAGE

CONTRÔLE QUALITÉ



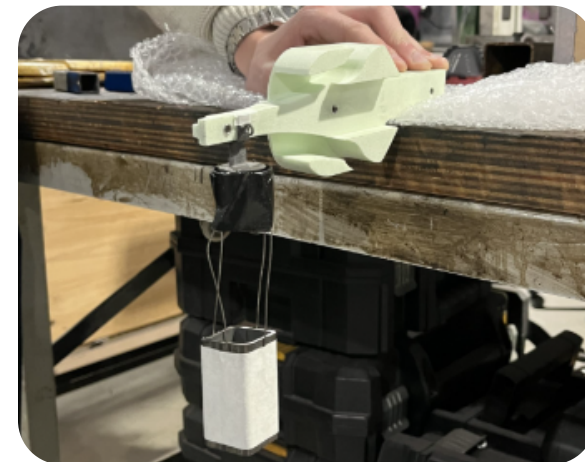
Mesures des cotes d'un aileron

Lors d'une impression 3D, des imprécisions sont présentes. Il faut s'assurer que la pièce fabriquée soit conforme.

Une première phase consiste à nettoyer l'impression. L'utilisation du LW-PLA entraîne un rendu peu propre. Nous procédons donc à un ponçage, puis à un polissage. Ensuite, nous mesurons chaque cote à l'aide d'un pied à coulisse.

Nous nous assurons aussi de la solidité de notre voiture. Celle-ci étant soumise à des tests, nous devons être certains de la conformité des pièces.

Nous avons donc mené une batterie de tests, simulant le jour de la compétition.



Simulation des tests de solidité



To finish first, you must first finish.

Rick Mears

SÉCURITÉ SUR LE LIEU DE TRAVAIL

La fabrication des pièces en impression 3D, l'assemblage de la voiture, la peinture, et tous autres étapes nécessaires à la fabrication ont été réalisés à la pépinière de l'ESTACA, un entrepôt dédié aux différents projets de l'école.

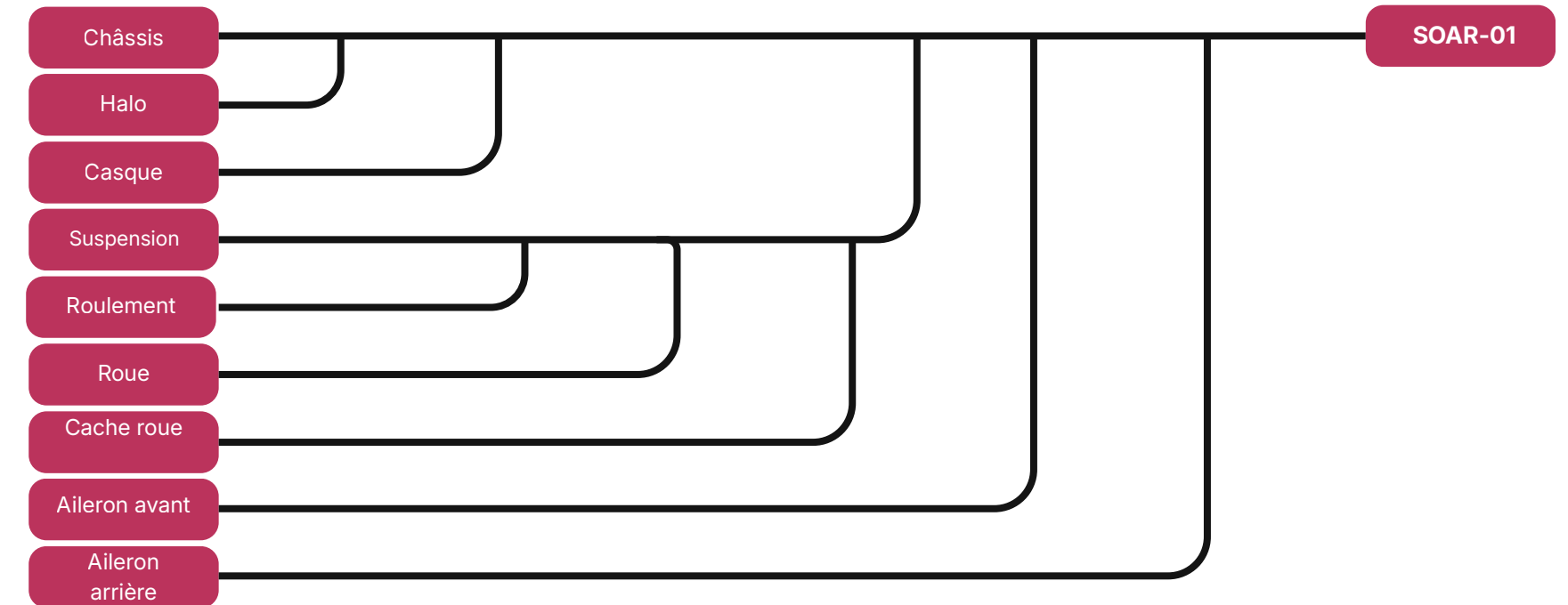
Étant rattaché à l'association ITD, nous avons des fiches de poste, qui nous permettent d'utiliser dans de bonnes conditions les outils. En voici un exemple, que nous suivons lors de nos impressions 3D.



Fiche de poste ITD

ASSEMBLAGE

L'assemblage constitue une phase critique de la réalisation de la SOAR-01. Une planification imprécise ou un manque de rigueur lors de cette étape compromettraient l'intégralité du travail de conception ainsi que la validité des tests ultérieurs. La maîtrise de ce processus est donc impérative pour garantir un niveau de fiabilité maximal.



Graphe de montage

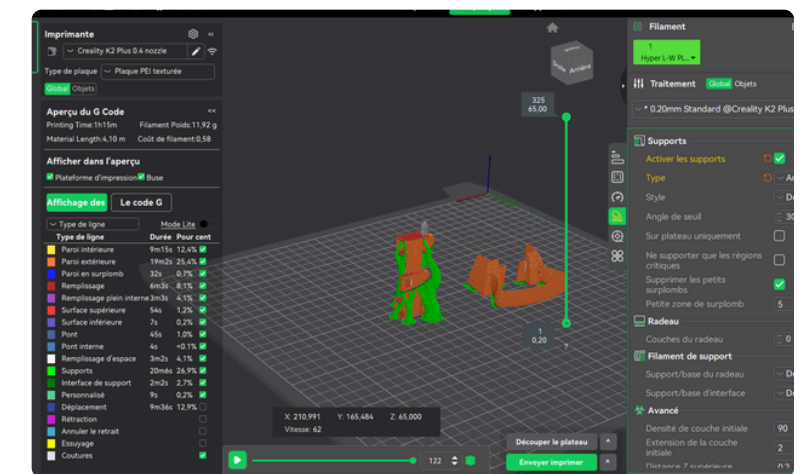
Pour assembler notre voiture, nous suivons un certain ordre. Cet ordre est défini par le graphe de montage.

Tout d'abord, nous plaçons le halo sur le châssis, et la casque sur le halo.

Ensuite, nous assemblons indépendamment chaque train roulant. Cette partie est la plus minutieuse : si de la colle entre dans un roulement, celui-ci perdra énormément en efficacité.

Une fois les trains roulants assemblés, ceux-ci sont intégrés au châssis avec une attention particulière portée à leur alignement. Un mauvais alignement pourrait entraîner des frottements supplémentaires et nuire aux performances du véhicule.

Finalement, les ailerons sont montés et fixés à l'aide de colle.



Extrait du logiciel d'impression 3D CreaPrint

TESTS

LA POUSSÉE DE LA CARTOUCHE

Durant notre visite chez SKF, nous nous sommes servis de certains de leurs instruments pour déterminer la poussée de la cartouche.

En positionnant un block STEM Racing et un propulseur chacun sur une plaque roulante grâce à des billes, nous simulons la poussée de la voiture.

Nous plaçons ensuite un dynamomètre branché sur un ordinateur, et récoltons la poussée en fonction du temps dans un fichier txt. Ces données sont à la fréquence 10 000Hz, et nous les exploitons dans un programme en C.

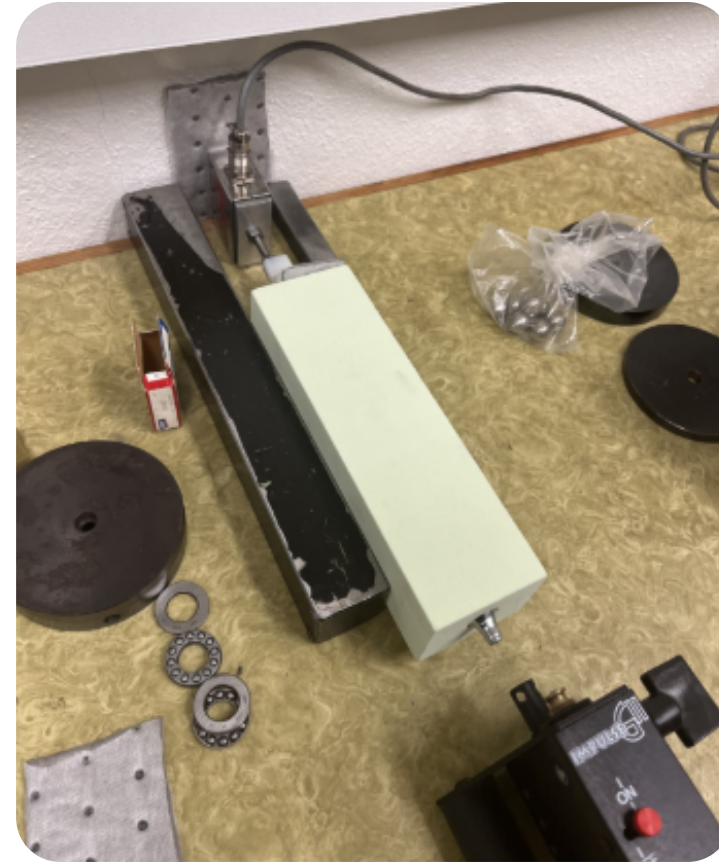
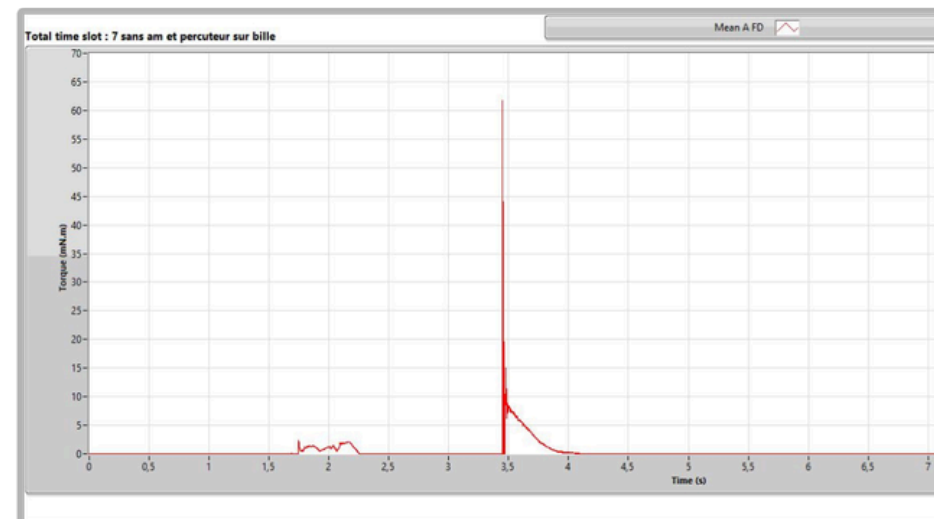


Image du banc de test de poussé réaliser avec SKF

TEST PARAMETERS			
Product reference :	Test cartouche		
Part number/labels :	5 sans am et percuteur sur bille		
Recipe name :	Proto		
Acquisition frequency (Hz) :	10000,00		
Mean A (s) :	0,0001		
Mean B (s) :	0,0010		
Recording frequency (Hz) :	10000,00		
Total time slot (s) :	10,00		
Last time slot (s) :	10,00		
Measured static load (N) :	0		
Measurement date :	2026-3-30_15-43-51		
User comments :			
TORQUE SENSOR			
Acquisition scale :	EC21_TL64820F3_202603		
Level arm (mm) :	3		
Measure range +/- (N.m) :	0		
Offset value (%) :	-0,17		
Offset date :	2026-3-30_14-38-59		
No sensor :	Numeric input		
TEST RESULTS			
TOTAL TIME SLOT	Signal Min (mV.a)	Max (mV.a)	Std. dev (mV.a) Mean (mV.a)
A	-23,0	62,8	1,38 0,3
B	-14,1	54,6	1,31 0,3
LAST TIME SLOT			



Courbe de la force de poussé de la cartouche en fonction du temps

SOLIDITÉ (FEA)

Afin de s'assurer de la solidité de nos roues, nous avons réalisé un test de résistance aux forces sur SolidWorks.

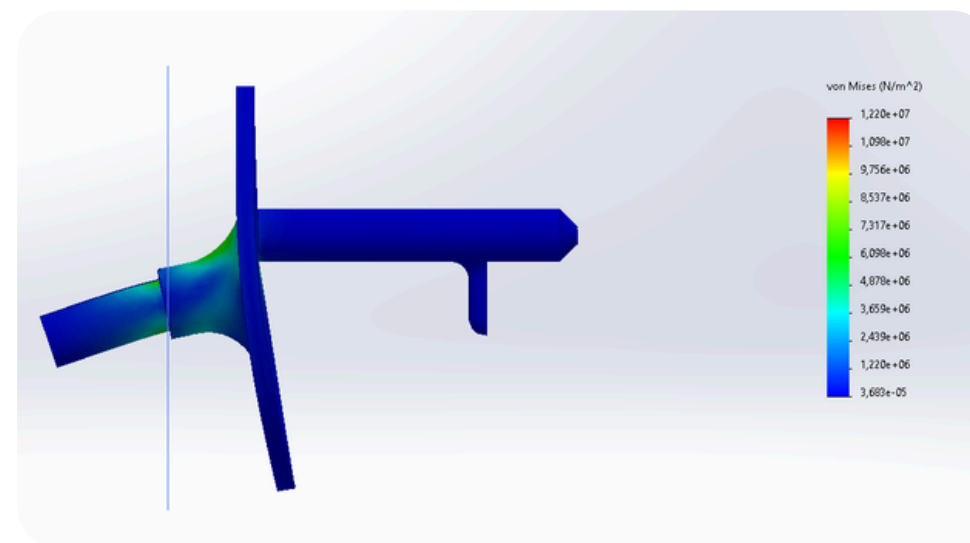
Celui-ci a été réalisé en prenant en compte une force externe de 62N, et un centre de la roue fixe. Cela simule l'instant t=0s de la course, où la poussée est maximale, et où les roues sont soumises à la plus grande force. Nous surestimons donc l'effort supporté par la roue, simulant une poussée vers le sol.

La contrainte maximale obtenue est d'environ : $\sigma_{max} = 1,57 \text{ MPa}$,

Tandis que la limite d'élasticité du POM-C est d'environ : $\sigma_{rupture} \approx 60 \text{ MPa}$.

Le facteur de sécurité peut ainsi être estimé par : $FoS = \frac{\sigma_{rupture}}{\sigma_{max}} = \frac{60}{1,57} \approx 38$

On remarque donc que, même en surestimant l'effort que subissent les roues, il n'y a pas de problème de solidité. La déformation que l'on peut voir sur l'image est exagérée par le logiciel, et en réalité la roue sera rigide et circulaire.



Nous avons répété le même processus pour la suspension avant droite, avec une charge s'exerçant verticalement vers le bas de 5N.

Cela équivaut à 20N sur l'ensemble de la voiture.

Dans ce cas, la contrainte maximale est de 12MPa, sachant que la résistance du LW-PLA s'estime entre 15 et 25 MPa.

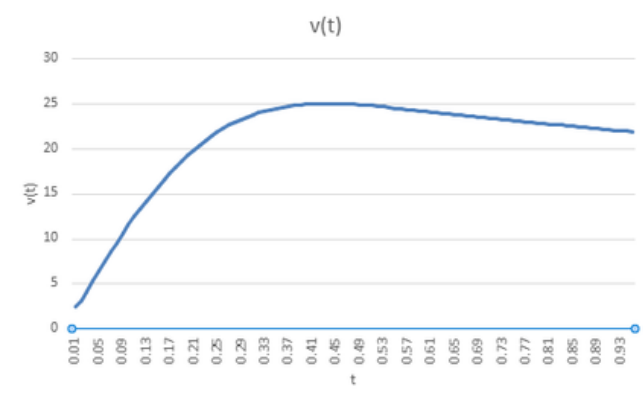
Nous sommes à la limite de la résistance. Cependant, notre voiture ne sera pas amené à supporter autant de charge.

CALCUL TEMPS DE COURSE

Nous avons cherché à estimer quel temps ferait notre voiture le jour de la compétition, ne pouvant pas faire de tests réels. Pour ce faire, nous sommes partis du Principe Fondamental de la Dynamique :

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Pour pouvoir appliquer ce principe, des conditions sont nécessaires : il faut une masse invariante et des forces invariantes. Or, au cours de la course, la masse de la voiture change lorsque la cartouche se vide de son gaz. De plus, les forces qui s'exercent ne sont pas constantes.



Courbe de vitesse en fonction du temps

IMPLÉMENTATION

Nous avons donc utilisé une méthode d'intégration numérique, qui consiste à approximer une intégrale en supposant le système constant sur de petits intervalles de temps, puis en répétant ce calcul sur l'ensemble de la durée.

Dans notre cas, nous avons fait un programme en C, qui recalcule tous les 1ms l'accélération, la vitesse et la position de notre voiture, en prenant en compte la masse, et l'ensemble des forces qui s'exercent à un instant t sur notre voiture.

Pour réaliser ces calculs, nous avons besoin de différentes données. Celles-ci ont été obtenues soit par le calcul comme la force de traînée, soit par des test physique comme la force de poussée de la cartouche.

```

main.c X
1 int main()
2 {
3     float t, tmax, m, Cx, a, rho, F_pousser, F_traînee, F_frottements_roulements, a_v, v_max, vosta, vrot, a; // déclaration des variables globales sur toutes
4     // les compilations des fichiers pour les calculs
5     // déclaration des variables locales pour les calculs
6     m=0.001;
7     rho=1.204;
8     a=-0.001;
9     Cx=0.594;
10    m=0;
11    a=0;
12    a=0;
13
14    // variable utilisée à l'initialisation des données de test dans les valeurs
15    compteur1=0;
16    compteur2=0;
17
18    float dechet1, dechet2, dechet3;
19    float thrust1[100];
20    float thrust2[100];
21    float thrust3[100];
22
23    // initialisation des données de test dans les valeurs
24    FILE* f = fopen("data_data-100", "r");
25
26    for (compteur1=0; compteur1<100; compteur1++)
27    {
28        if (compteur1%10==0)
29        {
30            fscanf(f, "%f %f %f", &dechet1, &dechet2, &thrust1[compteur1]);
31            compteur2=compteur1+1;
32        }
33    }
34
35    return 0;
36 }
    
```

Programme en langage C sur Code Blocks

RÉSULTATS

Nous obtenons un résultat de 0.96s de temps de course environ, avec une vitesse maximale de 25m/s. Ces résultats sont à pondérés, car nous n'avons pris en considération aucune des forces suivantes : forces de frottements des roues contre le sol, forces de frottements des roues contre les caches roues, forces de frottements des guides contre le câble.

Nous pourrions, une fois la compétition passée, analyser nos résultats pour calculer ces forces, dans une perspective d'optimisation pour les finales mondiales.

```

C:\Users\uboro\Desktop\SOA >
s, P = 0.686715 N, Thrust = 0.000000 N
x = 19.852320 m, v = 21.928012 m/s, Vrot = 240.708286 tour/s, Vrot = 14442.492188 tour/min, m = 70.001549 g, t = 0.949991
s, P = 0.686715 N, Thrust = 0.000000 N
x = 19.874245 m, v = 21.924564 m/s, Vrot = 240.644812 tour/s, Vrot = 14438.646625 tour/min, m = 70.001534 g, t = 0.950991
s, P = 0.686715 N, Thrust = 0.000000 N
x = 19.896164 m, v = 21.918728 m/s, Vrot = 240.579880 tour/s, Vrot = 14434.792969 tour/min, m = 70.001518 g, t = 0.951991
s, P = 0.686715 N, Thrust = 0.000000 N
x = 19.918077 m, v = 21.912888 m/s, Vrot = 240.515778 tour/s, Vrot = 14430.946289 tour/min, m = 70.001503 g, t = 0.952991
s, P = 0.686715 N, Thrust = 0.000000 N
x = 19.939985 m, v = 21.907042 m/s, Vrot = 240.451691 tour/s, Vrot = 14427.101563 tour/min, m = 70.001488 g, t = 0.953991
s, P = 0.686715 N, Thrust = 0.000000 N
x = 19.961887 m, v = 21.901207 m/s, Vrot = 240.387650 tour/s, Vrot = 14423.258789 tour/min, m = 70.001480 g, t = 0.954991
s, P = 0.686715 N, Thrust = 0.000000 N
x = 19.983782 m, v = 21.895376 m/s, Vrot = 240.323654 tour/s, Vrot = 14419.418945 tour/min, m = 70.001465 g, t = 0.955991
s, P = 0.686714 N, Thrust = 0.000000 N
x = 20.005671 m, v = 21.889547 m/s, Vrot = 240.259674 tour/s, Vrot = 14415.580878 tour/min, m = 70.001450 g, t = 0.956991
s, P = 0.686714 N, Thrust = 0.000000 N
Vmax = 25.051676, Vrotmax = 274.967194 tour/s, Vrotmax = 16498.031613 tour/min, Tmax = 0.445998
Process returned 0 (0x0)   execution time : 0.119 s
Press any key to continue.
    
```

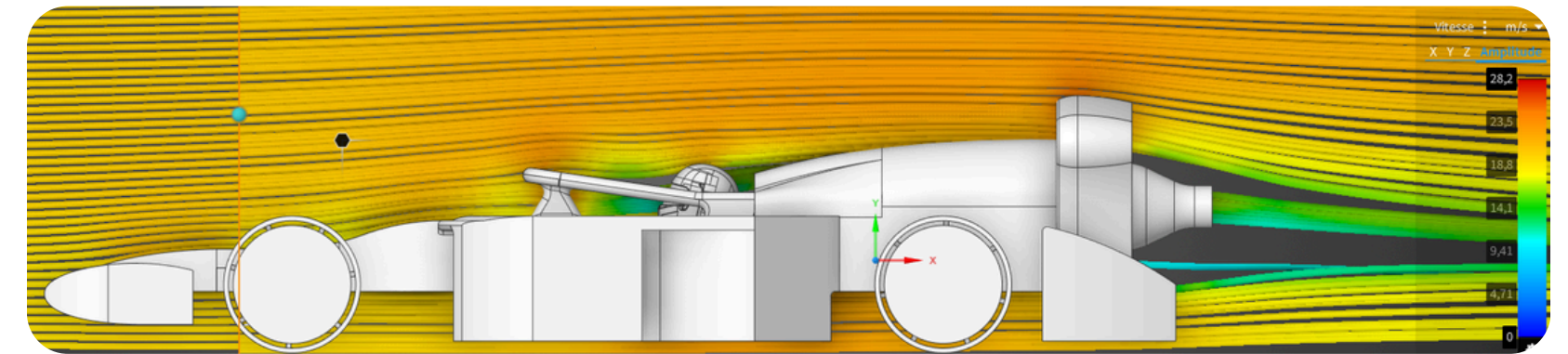
Résultat après compilation du programme

CFD

Pour le calcul du Cx et de la surface frontale, nous avons envoyé nos fichiers 3D à des 3ème année de l'association ITD, qui nous ont rendus les valeurs suivantes :

- Cx=0.594
- S=0.00238

Nous avons analysé les lignes de courant afin de mieux comprendre les effets de l'air sur la voiture. Nous voyons donc les effets des resserrées, en voyant les lignes de courant qui arrivent derrière la voiture.



Simulation CFD réalisé sur Ansis

ÉTUDE ROULEMENTS

Lors d'une visioconférence avec deux ingénieurs de SKF Racing, nous avons eu accès à leurs outils pour réaliser une étude liée aux roulements.

Pour cette étude, nous avons choisis un roulement similaire de chez SKF, en acier, donc moins résistant que nos roulements actuels en céramique. Cela permet de sous-estimer la durée de vie de nos roulements.

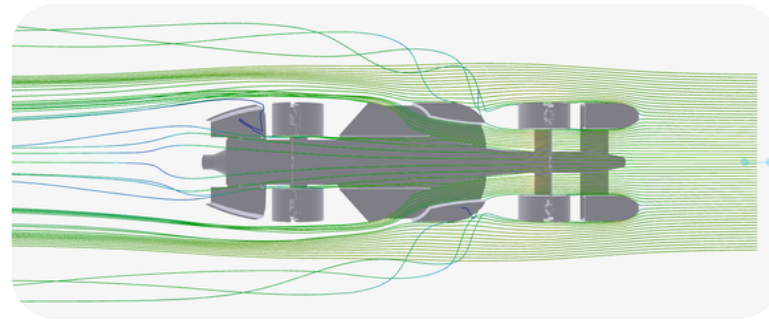
En prenant une charge maximale de 62N pour 1% des cas, et une charge nulle le reste du temps (on néglige le poids), avec une rotation de 15 000 tr/min correspondant à une vitesse de 22.75 m/s (surestimée).

618/4	LC1	LC2	Combined
SKF rating life, L_{10mh} [h]	1010	> 2×10^5	101000
SKF rating life, L_{10mh} ($a_{SKF}=1$) [h]	306	> 2×10^5	30600

Cela nous donne une durée de vie de 1010h, avec une charge constante de 62N, et de 101 000h soit 11.5 années environ en prenant cette charge 1% du temps.

Quant aux forces de frottements, celle-ci sont extrêmement faibles et négligeables, tout comme le couple nécessaire à la mise en rotation.

AXES D'AMÉLIORATION



PEU DE TESTS AÉRODYNAMIQUES

L'équipe ne dispose actuellement pas des compétences nécessaires à faire tourner des simulations en continu. Pour pallier ce défaut, nous avons contacté Simscale, qui nous proposent un partenariat technique pour les finales mondiales. Leurs licences ainsi que leur expertise nous permettront d'apprendre, et de progresser dans ce milieu.

MANQUE DE TESTS EN CONDITIONS RÉELLES

Malgré quelques tests physiques réalisés, comme mentionné précédemment, nous manquons d'essais. Réaliser une course d'entraînement permet d'apprendre beaucoup plus que toutes les simulations possibles.

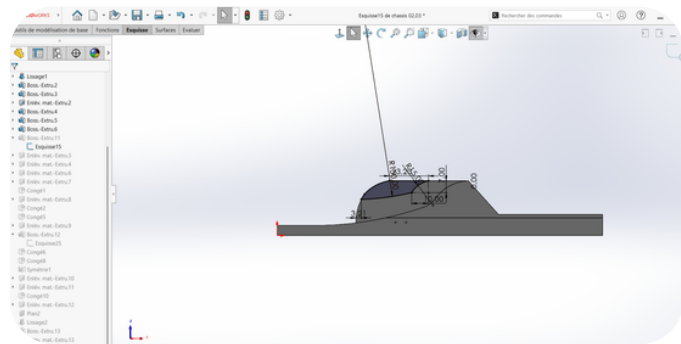
La raison pour laquelle nous n'avons pas pu effectuer le test est que la piste mise à disposition était très loin de Laval (Châlons-en-Champagne) et qu'il était extrêmement difficile d'avoir accès à du matériel STEM Racing officiel.



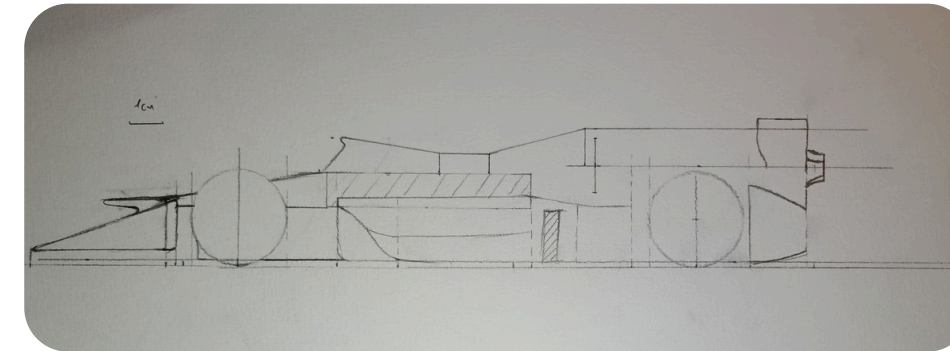
Test de la rigidité de la voiture

JEU DE MONTAGE

Un des grands apprentissages lié à la conception concerne la gestion des jeux de fonctionnement. Lors des premières versions de nos prototypes, nous avons conçu les pièces avec des dimensions nominales identiques (ajustement incertain), sans tenir compte des tolérances de fabrication de l'impression 3D. Ce manque de jeu a rendu l'assemblage final complexe, nécessitant des retouches avec une lime. Pour corriger ce défaut sur la version finale, nous avons intégré un jeu fonctionnel de 0,2 mm sur les zones d'emboîtement (châssis/ailerons/suspension). Cette optimisation facilite grandement le montage et permet d'absorber les légères variations de dimensions des pièces lors du refroidissement du filament.

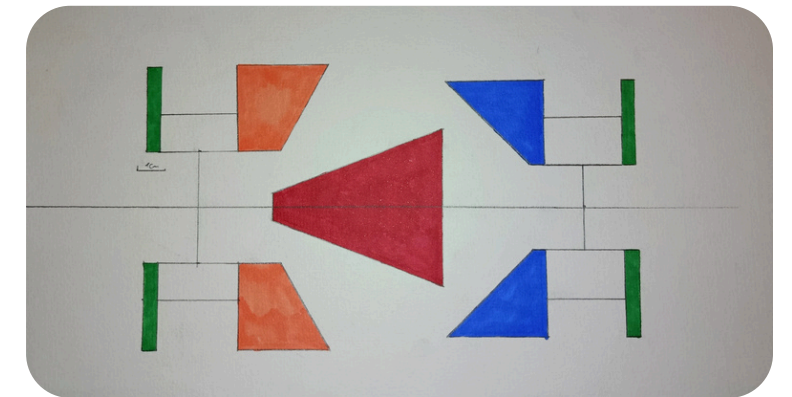


DESIGN

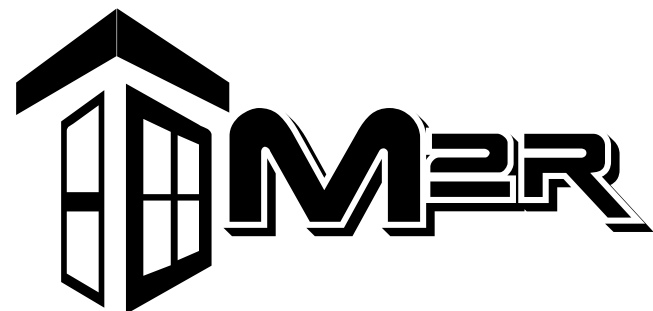


Tout commence par un premier trait de crayon. Ces dessins originaux marquent le point de départ de notre réflexion. Ils nous ont permis de poser les premières idées sur le papier, de figer les proportions globales de la voiture et d'imaginer son profil aérodynamique avant de passer à la modélisation 3D sur Solidworks.

Le design de la monoplace est rigoureusement dicté par un règlement technique de plus de 70 pages. Ces directives imposent des limites strictes, notamment sur l'encombrement autour des roues, le volume du « virtual cargo », le poids minimal ou encore la garde au sol. L'ensemble de ces contraintes normatives devient alors le principal sculpteur de l'esthétique et de la performance de la voiture.



Notre lecture du règlement nous a poussés à choisir des formes précises. Ces choix s'inspirent directement de la Formule 1. Dans un premier temps, nous avons dessiné l'aileron arrière en nous basant sur les voitures à effet de sol utilisées entre 2022 et 2025. Pour l'avant de la voiture, notre nez reprend la forme particulière des Formule 1 de la saison 2012. On retrouve cette inspiration sur la Lotus présentée ci-dessus.



MERCI A NOS PARTENAIRES !