

ECOLE CENTRALE DE LYON

ECURIE PISTON SPORT AUTO, VÉHICULE STUF'2015

---

## Ingénierie de la base roulante

---

*Groupe de travail :*

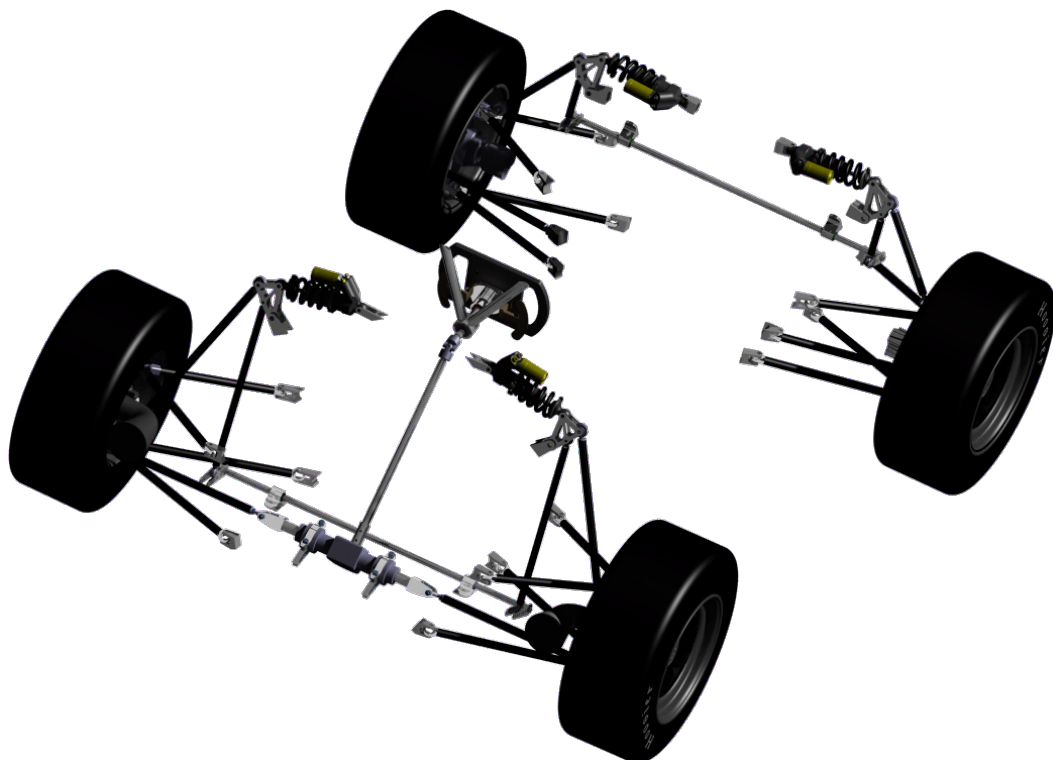
Romain CARRE  
Pierre MERLIER  
Edgar PEIRSEGAELE  
Damien TURLAY  
Albert VINAIXA VERGES

*Commanditaire :*  
Ecurie Piston Sport Auto

*Tuteur de projet :*  
Patrick SERRAFERO

*Conseiller en communication :*  
Jean-Pierre BERTHET

14 Avril 2015



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Résumé</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Remerciements</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Introduction</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Présentation du projet</b>	<b>7</b>
4.1	Le Formula Student . . . . .	7
4.2	Organisation du projet . . . . .	8
4.3	Cahier des charges . . . . .	10
4.4	La Liaison au sol . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Système de suspensions et validation de la conception</b>	<b>12</b>
5.1	Introduction . . . . .	12
5.2	Objectifs . . . . .	12
5.3	État d'avancement à l'issue de la première année . . . . .	12
5.4	Phase de conception détaillée et validation . . . . .	14
5.4.1	Conception des triangles . . . . .	14
5.4.2	Calcul des raideurs . . . . .	15
5.4.3	Conception des basculeurs . . . . .	16
5.4.4	Validation de la conception . . . . .	17
5.5	Étapes suivantes . . . . .	18
5.6	Conclusion . . . . .	18
<b>6</b>	<b>Porte moyeu et mise en plan</b>	<b>19</b>
6.1	Introduction . . . . .	19
6.2	Géométrie . . . . .	20
6.3	Finalisation de la conception . . . . .	20
6.4	Mise en plan . . . . .	21
6.5	Étapes suivantes . . . . .	22
6.6	Conclusion . . . . .	22
<b>7</b>	<b>Fabrication</b>	<b>23</b>
<b>8</b>	<b>Système de freinage et achats</b>	<b>24</b>
8.1	Introduction . . . . .	24
8.2	Objectifs . . . . .	24
8.3	État d'avancement à l'issue de la première année . . . . .	24
8.4	Achats . . . . .	25
8.4.1	Disques . . . . .	26
8.4.2	Maitres cylindres . . . . .	26
8.4.3	Etriers . . . . .	26
8.5	Conclusion . . . . .	27
<b>9</b>	<b>Roues, jantes et logistique</b>	<b>28</b>
9.1	Introduction . . . . .	28
9.2	Présentation . . . . .	28
9.3	Conception . . . . .	28
9.3.1	Pneumatiques . . . . .	28
9.3.2	Jantes . . . . .	29
9.4	Logistique . . . . .	29
9.5	Conclusion . . . . .	30
<b>10</b>	<b>Validation unitaire et validation système</b>	<b>31</b>

<b>11</b>	<b>Direction et intégration</b>	<b>32</b>
11.1	Introduction . . . . .	32
11.2	Conception . . . . .	32
11.3	Intégration . . . . .	34
11.4	Conclusion . . . . .	36
<b>12</b>	<b>Essais et validation du véhicule</b>	<b>37</b>
<b>13</b>	<b>Conclusion</b>	<b>38</b>
<b>14</b>	<b>Annexes</b>	<b>40</b>
14.1	Gestion de projet . . . . .	40
14.1.1	Responsabilités au sein du projet . . . . .	40
14.1.2	Difficultés rencontrées . . . . .	41
14.1.3	Diagramme de GANTT . . . . .	42
14.1.4	Diagramme de PERT . . . . .	43
14.2	Dynamique du véhicule . . . . .	44
14.3	Angles de cinématique . . . . .	48
14.3.1	Angle de carrossage (Camber Angle) . . . . .	48
14.3.2	Angle de pince (TOE) . . . . .	48
14.3.3	Angle de chasse et chasse au sol . . . . .	48
14.3.4	Angle de pivot . . . . .	50
14.4	Porte-moyeu . . . . .	51
14.5	Système de freinage . . . . .	52
14.6	Système de direction . . . . .	56
14.6.1	Epure d'Ackermann . . . . .	56
14.6.2	Modèle 2D Geogebra . . . . .	56
14.6.3	Loi entrée-sortie . . . . .	57

## Table des figures

1	STUF' 2014 Dynamix . . . . .	7
2	Photo du Formula Student à Silverstone, Septembre 2014 . . . . .	8
3	Organisation du cycle V . . . . .	9
4	Présentation des composants de la liaison au sol . . . . .	11
5	Comparaison entre l'architecture à poussant et l'architecture à tirant . . . . .	13
6	Solution anti-roulis à basculeur . . . . .	13
7	Modélisation de la cinématique de suspension sous Geogebra . . . . .	14
8	Modélisation de la cinématique de suspension sous OptimumK . . . . .	14
9	Système anti-roulis à barre de torsion . . . . .	15
10	Présentation des amortisseurs Ohlins TTX 25 MK2 . . . . .	16
11	Modélisation du mouvement des roues sous Geogebra . . . . .	16
12	Modélisation éléments finis sous catia d'un basculeur . . . . .	17
13	Vue d'ensemble de la liaison au sol . . . . .	17
14	Vue d'ensemble du véhicule . . . . .	18
15	Systèmes en liaison avec le porte-moyeu . . . . .	19
16	Surfaces fonctionnelles d'un porte-moyeu . . . . .	19
17	Premier exemple d'analyse par éléments finis . . . . .	21
18	Second exemple d'analyse par éléments finis . . . . .	21
19	Contours du porte-moyeu après électrosion . . . . .	23
20	Exemple de système de freinage à disque . . . . .	24
21	Différentes configurations pour le positionnement des disques . . . . .	25
22	Différents types de circuit hydrauliques . . . . .	25
23	Disque de frein custom . . . . .	26
24	Ancien (gris) et nouvel (rouge) étrier . . . . .	27

25	Comparaison 10 vs 13 pouces . . . . .	28
26	Pneu Slick . . . . .	29
27	Pneumatique Hoosier et Jante Keizer . . . . .	29
28	Plate-forme internet EPSAPROD . . . . .	30
29	Tableau logistique . . . . .	30
30	Exemple de métrologie . . . . .	31
31	Test de rigidité en torsion du système châssis équipé sur banc . . . . .	31
32	Modélisation numérique du système de direction . . . . .	32
33	Montage du roulement dans le fourreau . . . . .	33
34	Crémaillère Planet Kart Cross . . . . .	33
35	Chape fourreau . . . . .	33
36	Chape crémaillère . . . . .	33
37	Butée crémaillère . . . . .	34
38	Ensemble barreau de crémaillère – butée – biellette . . . . .	34
39	Cardan goupillé et soudé . . . . .	35
40	Système de direction intégré sur Atomix, photo 1 . . . . .	36
41	Système de direction intégré sur Atomix, photo 2 . . . . .	36
42	Photo des essais de Dynamix à ISYVAL . . . . .	37
43	Organigramme des responsabilités . . . . .	40
44	Schéma des différents acteurs du projet . . . . .	41
45	Diagramme de Gantt d'un SFF du PE . . . . .	42
46	Diagramme de PERT . . . . .	43
47	Carrossage . . . . .	48
48	Pince . . . . .	49
49	Chasse et angle de chasse . . . . .	49
50	Angle de pivot . . . . .	50
51	Modélisation 3D sous Geogebra . . . . .	50
52	Plan d'un porte-moyeu . . . . .	51
53	Géométrie d'un véhicule respectant l'épure d'Ackermann en virage . . . . .	56
54	Modèle 2D Geogebra . . . . .	56
55	Loi entrée-sortie de la cinématique de direction . . . . .	57

## Liste des tableaux

1	Comparatif des performances entre Atomix et Dynamix . . . . .	10
2	Tableau raideurs . . . . .	15
3	Table de points de fixation . . . . .	20

# 1 Résumé

Ce rapport traite des travaux effectués par le PAi n° 74. L'objectif de ce PAi est de finaliser la conception démarrée l'année précédente et d'assurer la production et le fonctionnement de la liaison au sol du véhicule STUF'2015 Atomix de l'EPSA en vue d'une participation au Formula Student Italia 2015. Le Formula Student est une compétition automobile, composée de différentes épreuves statiques et dynamiques, regroupant une centaine d'universités européennes. La ligne directrice de la conception du véhicule a été commune aux 4 projets (PE puis PAi) participant à cette réalisation et a permis de réduire la masse du véhicule de 30Kg par rapport au précédent véhicule de l'écurie.

La liaison au sol d'un véhicule constitue l'interface entre le reste du véhicule et la route ; elle a été divisée en cinq sous-ensembles, chacun attribué à un membre du groupe. Les sous-ensembles sont : pneu-jante, moyeu-porte moyeu, système de freinage, système de direction et enfin, le système de suspension. Pour chaque sous-système, après avoir retenu le concept à la fin de l'année précédente, la démarche de conception a consisté à fixer de manière définitive la géométrie du système puis à choisir les matériaux utilisés et effectuer le dimensionnement du système. Cette étape a été concrétisée par l'obtention du Top Copeaux déclenchant la production et l'assemblage du véhicule. Une organisation a été mise en place afin de produire et d'approvisionner les différentes pièces aboutissant à l'intégration finale d'Atomix. Des procédures de validation et d'essais ont été mises en place afin de préparer au mieux le véhicule et l'équipe pour la compétition en septembre 2015.

## 2 Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier nos commanditaires Patrick SERRAFERO et l'Ecurie Piston Sport Auto sans qui ce projet n'existerait pas.

Le budget alloué par l'écurie, les connaissances scientifiques et managériales transmises par Patrick SERRAFERO nous ont été d'une grande utilité.

Nous remercions aussi, pour leur apport scientifique, Stéphane FOULARD, Laurent BAUVIR, Romain GUEROUT et tous les 3A du projet Dynamix v2.0, en particulier Thomas DEROUIN et Matthieu CORBAT qui ont été présents à chaque instant pour nous conseiller.

Nous voulons également remercier nos conseillers et tuteurs, Jean-Pierre BERTHET (Conseiller en communication), Pierre-Louis JAEGER et Patrick SERRAFERO (tuteurs scientifiques) qui nous ont permis d'améliorer notre gestion de projet et la mise en valeur de notre travail.

Nous souhaitons remercier Volvo Trucks pour le prêt de sa piste de comportement, notre plateforme d'essais ISYVAL pour notre véhicule Atomix.

Nous remercions enfin nos sponsors, notamment TOTAL, qui, à travers leur investissement financier et leur confiance, nous permettent d'avoir les moyens de nos ambitions. De même, nous remercions nos partenaires pédagogiques qui mettent à notre disposition à la fois leurs connaissances techniques et leur matériel sans lesquels le véhicule ne serait que virtuel : le Lycée Emile Béjuitt de Bron, l'Ecole de Boisard, l'Ecole de la Mache, le Lycée de La Giraudière et l'Ecole de Condé.

### 3 Introduction

L'EPESA (Ecurie Piston Sport Auto) est l'écurie de sport automobile de l'Ecole Centrale de Lyon. Chaque année, des élèves de la promotion entrante réalisent entièrement la conception puis la fabrication d'un véhicule de course (Trophée SIA de 2002 à 2012 puis Formula Student). C'est dans ce but que l'EPESA est le commanditaire de quatre projets d'étude pour les 1A et de quatre projets d'application pour les 2A (chaque projet comprenant cinq élèves). Chaque PA doit finir la conception initiée en première année et organiser la fabrication d'une partie du véhicule STUF'2015 Atomix : Monitoring PAi-276, Motorisation-transmission PAi-275, Châssis-Aérodynamisme PAi-310 , et notre projet PAi-274 Liaison au sol. A l'issue de cette phase de fabrication, le véhicule participe au Formula Student aux côtés des véhicules réalisés par les écuries des meilleures universités européennes. En effet, le Formula Student est une compétition automobile internationale se déroulant dans plusieurs pays comprenant de nombreuses épreuves statiques (présentation du design...) et dynamiques (épreuve d'endurance, d'accélération...).

Le PAi-274 est chargé de la conception de la liaison au sol (LAS) du véhicule Atomix. La liaison au sol, comprenant plusieurs sous-Systèmes Fonctionnels et Fabricables (SFF) que sont les roues (jantes et pneumatiques), les moyeux et porte-moyeux, les suspensions, les freins, la direction, constitue l'interface entre la route et le véhicule. Son rôle est d'autant plus crucial que c'est via la liaison au sol que transitent tous les efforts (direction, freinage, accélération...) entre le véhicule et la route.

Nous devons donc livrer à la fin de l'année (avant le départ en stage) une liaison au sol fonctionnelle, fiable et intégrée au véhicule Atomix afin qu'il soit capable de réaliser une campagne d'essai et de participer à la compétition en Italie du 11 au 14 septembre 2015.

## 4 Présentation du projet

### 4.1 Le Formula Student

Le Formula Student est une compétition internationale fondée par la FSAE aux États-Unis en 1981 puis importée en Europe en 1988. Le but est de permettre à des étudiants du monde entier de construire un véhicule puis de venir se confronter à d'autres écoles sur des épreuves très exigeantes. Actuellement cinq équipes françaises participent à cet événement : l'ISAT, l'ENIM, l'ESTACA, Centrale Paris et Centrale Lyon.

Le championnat se déroule sur presque tous les continents et regroupe 9 compétitions officielles sur des circuits tels que Silverstone en Angleterre ou Hockenheim en Allemagne. Les compétitions regroupent selon les catégories et les pays entre 30 et 150 véhicules.

Les véhicules qui participent au Formula Student doivent satisfaire un règlement de 160 pages qui décline les consignes de sécurité ainsi que les nombreuses spécificités techniques que le véhicule doit remplir. Les véhicules peuvent participer à la compétition dans l'une de ces trois catégories : thermique, électrique et hybride (seulement aux États-Unis). Ces véhicules sont des monoplaces à cockpit ouvert pesant entre 150 et 250kg (voir figure 1). Les véhicules les plus rapides atteignent les 100Km/h (départ arrêté) en 2s15. Les compétitions regroupent deux types d'épreuves : les épreuves statiques qui permettent une évaluation précise de la qualité et du respect du règlement lors de la conception et de la fabrication et les épreuves dynamiques qui permettent une évaluation précise de la fiabilité et des performances de ces voitures de compétition.



FIGURE 1 – STUF' 2014 Dynamix

Les épreuves statiques se décomposent comme suit :

- **L'épreuve du Design** : Le but de cette épreuve est de justifier tous les choix techniques retenus pour la construction de la voiture à travers un dossier de 8 pages mêlant explications et schémas.
- **Le contrôle technique** : Il s'agit d'une inspection poussée du véhicule qui permet d'homologuer le véhicule si celui-ci est conforme à tous les points du règlement. Sont étudiés les capacités de freinage du véhicule, sa résistance aux conditions climatiques (notamment la pluie par un arrosage du véhicule pendant 2 minutes, moteur en marche), les éléments de sécurité (évacuation en 5 secondes du véhicule), sa capacité à ne pas se retourner à des inclinaisons de 60° ni présenter de fuites, ou encore un test de bruit. Cette épreuve doit être réussie pour avoir accès à la suite de la compétition.



- **L'épreuve de coût et fabrication** : Les élèves-ingénieurs doivent pouvoir, au cours d'une présentation devant le jury, justifier de tous leurs choix techniques ainsi que des coûts de chaque pièce. Le but étant de voir l'importance de ces facteurs dans les projets d'ingénierie.
- **L'épreuve de présentation** : L'équipe doit faire une présentation devant le jury pour lui vendre le projet en vue d'une fabrication (fictive) du véhicule à grande échelle.

Ensuite viennent les épreuves dynamiques pour mesurer les performances du véhicule :

- **L'accélération** : Le véhicule accélère le plus rapidement possible en ligne droit sur 75m. Les meilleurs écuries parviennent à descendre sous la barre des 4s.
- **Le skid-pad** : Le véhicule décrit des cercles de 15m de diamètre sur un circuit en forme de 8 pour tester la tenue en virage.
- **L'autocross** : Deux manches de deux essais chacune où les pilotes ont le droit à un certain nombre de tours d'un circuit sinueux sans gêne d'autres véhicules.
- **L'endurance** : Le circuit est le même que celui de l'autocross. La voiture doit rouler 22km en deux relais de 11km, les performances, la fiabilité et la robustesse de la voiture sont évaluées sur cette épreuve.



FIGURE 2 – Photo du Formula Student à Silverstone, Septembre 2014

## 4.2 Organisation du projet

Le projet d'application 274 est l'un des quatre projets commandités par l'écurie. Une équipe de 21 personnes travaille donc sur la conception, la fabrication et la préparation à la compétition du véhicule Atomix. Même si ces 21 personnes sont divisées en 4 groupes ayant pour objectif de réaliser une partie du véhicule, il est évident que ces 4 groupes travaillent en constante interaction. Les choix faits sur un système fonctionnel et fabricable (SFF) qui impactent le véhicule dans sa globalité doivent être discutés collectivement. C'est pourquoi, au début d'année, un directeur de projet et un directeur technique ont notamment été désignés au sein de l'équipe pour accroître les interactions entre les différents groupes de travail.

En outre, les quatre groupes doivent se partager le budget financier et le budget massique du véhicule. Ces budgets ont ensuite été répartis (en se basant sur les coûts/masse estimés et les coûts/masse des aînés) pour les différents sous système SFF. Ainsi pour la conception de notre liaison au sol, nous disposons d'un budget de 18 000€ et d'une enveloppe massique de 44Kg.

Une fois cela effectué, il a fallu organiser la vie du véhicule. Ainsi, notre organisation de projet (cf annexe) découle d'une organisation plus complexe mêlant 21 personnes. En plus des RVP, toute l'équipe devra présenter et faire valider par les anciens de l'écurie et les partenaires, ces différentes phases de conception (choix concept, architecture, configuration dimensionnement...), de fabrication (mise en plans, process) et validation. Un cycle en V sur deux ans, rappelant l'organisation du projet a été construit. De ce dernier, furent tirés les diagrammes GANTT et PERT relatif à notre projet (cf annexe). Ces différents diagrammes sont relatifs à la conception/ fabrication d'un seul SSF. Il y en a donc 5 en parallèle puisque que chaque membre du PA 274 est chargé d'un SFF. (Voir les responsabilités organiques de chacun en annexe).

Le projet se déroulant sur 2 ans, une partie de la conception a été finalisée en première année. Cette deuxième année se définit donc comme la fin de la descente du cycle en V et la remontée du cycle en V qui est autorisée par la revue Top copeaux.

Par souci de synthèse, nous n'allons pas vous présenter un par un chaque SFF et décrire précisément les différentes phases du cycle en V pour ce SFF. Nous avons choisi, de vous présenter succinctement chaque SFF et de se focaliser sur l'étape la plus marquante et la plus délicate du cycle en V à savoir :

- Système de suspension et validation de la conception
- Porte moyeu et mise en plan
- Fabrication
- Système de freinage et achat
- Roues, jantes et logistique
- Validation Unitaire et validation SFF
- Direction et intégration
- Essais

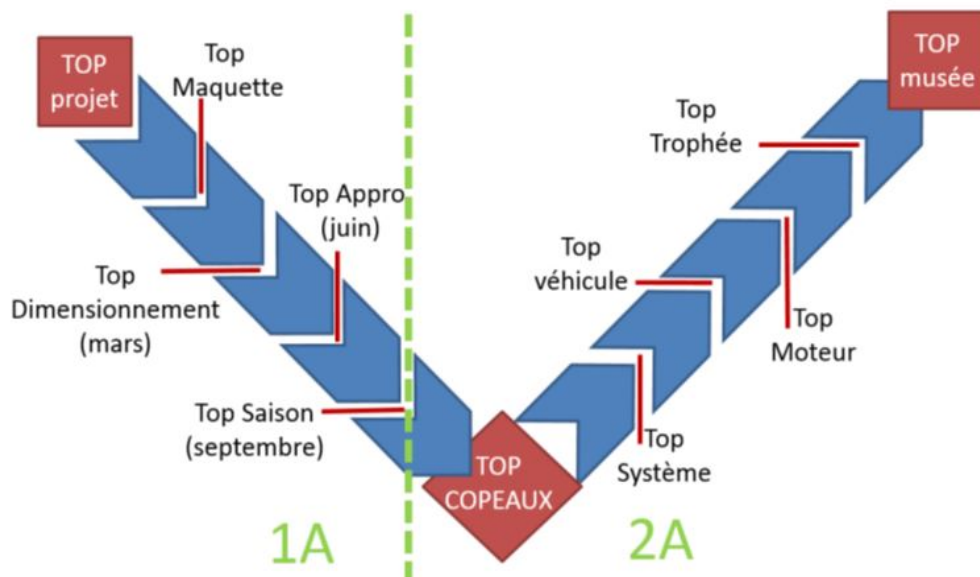


FIGURE 3 – Organisation du cycle V

### 4.3 Cahier des charges

Une des particularités des projets commandités par l'EPSA est que les membres de la promotion précédente (2015) ont travaillé sur un projet aux objectifs similaires. En effet, ils ont été les premiers membres de l'écurie à réaliser un véhicule pour le Formula Student, ce qui a été une tâche loin d'être facile car ils ont dû partir de zéro dans une compétition au niveau technique très élevé. Nous avons beaucoup profité de l'aide et des conseils de nos aînés pour concevoir notre propre véhicule. C'est pourquoi beaucoup de comparaisons seront faites entre notre véhicule Atomix et le leur Dynamix. C'est l'essence même de l'écurie que de capitaliser sur les connaissances acquises précédemment afin d'obtenir une amélioration de 20% d'année en année (dans les domaines que l'on souhaite).

Dynamix est également le seul véhicule de l'écurie à avoir participé au Formula Student Italie 2014. Elle s'en est sortie plus qu'honorablement puisqu'elle a passé toutes les épreuves de la compétition avec succès et a fini 24 sur 44.

Notre objectif est donc de progresser par rapport à ce premier véhicule étalon, c'est pourquoi nous sommes fixés l'objectif de finir dans le top 20 de la compétition.

Il a donc été décidé, conjointement avec les 3 autres projets d'étude, de réduire drastiquement la masse du véhicule par rapport à nos aînés (qui ont identifié là une grande marge de progression pour l'écurie). Alors que leur voiture pèse près de 260Kg, l'objectif pour Atomix est fixé à 220Kg. Cet objectif ambitieux a largement influencé les choix de l'équipe.

En plus de cet objectif global, d'autres objectifs qui concernent le comportement global du véhicule ont été définis conjointement dans le but d'améliorer notre score dans les différentes épreuves : accélération de 0 à 100km/h en 3.5s, freinage du véhicule lancé à 100km/h en 30m, rayon de braquage de moins 4m pour pouvoir passer les épingles dans le circuit autocross.

Enfin, des objectifs propres à la liaison au sol ont été définis par le PA274. Divers objectifs ont été fixés tels que le fait de passer en roue 10 pouces, recourir au carbone, posséder une géométrie réglable (carrossage et pince), (voir annexe pour plus de détails) et de mieux maîtriser la dynamique véhicule. On résume les objectifs dans le tableau suivant :

	Atomix	Dynamix
Masse	220 kg	260 kg
Accélération (0 à 75m)	4.2 s	4,343s
Classement général	Top 20	24/44

TABLE 1 – Comparatif des performances entre Atomix et Dynamix

### 4.4 La Liaison au sol

Le but de notre projet est de livrer la liaison au sol mécatronique d'Atomix. La liaison au sol est une partie primordiale dans un véhicule. On peut la rapprocher des fondations pour une maison, tous les choix et décisions prises sur les véhicules dépendent de la conception de la liaison au sol. Elle est reliée au châssis, doit transmettre les efforts de la motorisation et être compatible avec l'aérodynamique globale du véhicule. De plus, elle doit permettre au PA monitoring (PA 276) d'implanter de nombreux capteurs dans les différents organes de la liaison au sol rendant compte de son fonctionnement et de ses performances, c'est d'ailleurs pour cette raison qu'elle est qualifiée de mécatronique.

La liaison au sol est constituée de différents SFF :

- Les pneumatiques qui permettent l'adhérence à la route. Ce sont eux qui constituent l'ultime interface entre la route et le véhicule. C'est donc par eux que transitent tous les efforts (direction, freinage, accélération...). Les pneumatiques et les jantes constituent les roues.
- L'ensemble triangles-suspensions fait en sorte que les pneumatiques travaillent toujours dans des conditions optimales et ainsi que l'adhérence soit maximale dans toutes les situations. Le

placement des points d'attache des triangles sur le châssis et les portes moyeux définit la cinématique des suspensions et le comportement des pneumatiques. Les suspensions constituent la liaison entre les masses suspendues (châssis, pilote...) et les masses non suspendues (freinage, roues, portes-moyeu...), elles influencent la dynamique du véhicule en répartissant notamment les efforts dans les 4 roues.

- Les portes-moyeu portent le moyeu, le roulement qui permet la rotation des roues. Les portes-moyeu sont reliés au châssis pas les triangles, aux roues par les moyeux, à la direction et au système de freinage.
- Le système de freinage permet de ralentir ou d'arrêter le véhicule. En effet, pour le freinage à disque, les disques sont entraînés par la roue, les étriers sont fixes. Une activation du dispositif de freinage comprime, via un circuit hydraulique, les plaquettes disposées dans l'étrier. Ces frottements ralentissent les roues.
- La direction comprenant une colonne de direction reliée au volant, un dispositif pignon-crémaillère et des biellettes s'attachant sur les portes-moyeu permet de diriger le véhicule. Les points d'attache des triangles sur le porte-moyeu définissent un angle de pivotement de la roue. L'action des biellettes fait pivoter la roue autour de cet axe.

Tous ces SFF interagissent ensemble en permanence. Leur conception est donc un enjeu majeur pour construire une liaison au sol performante.

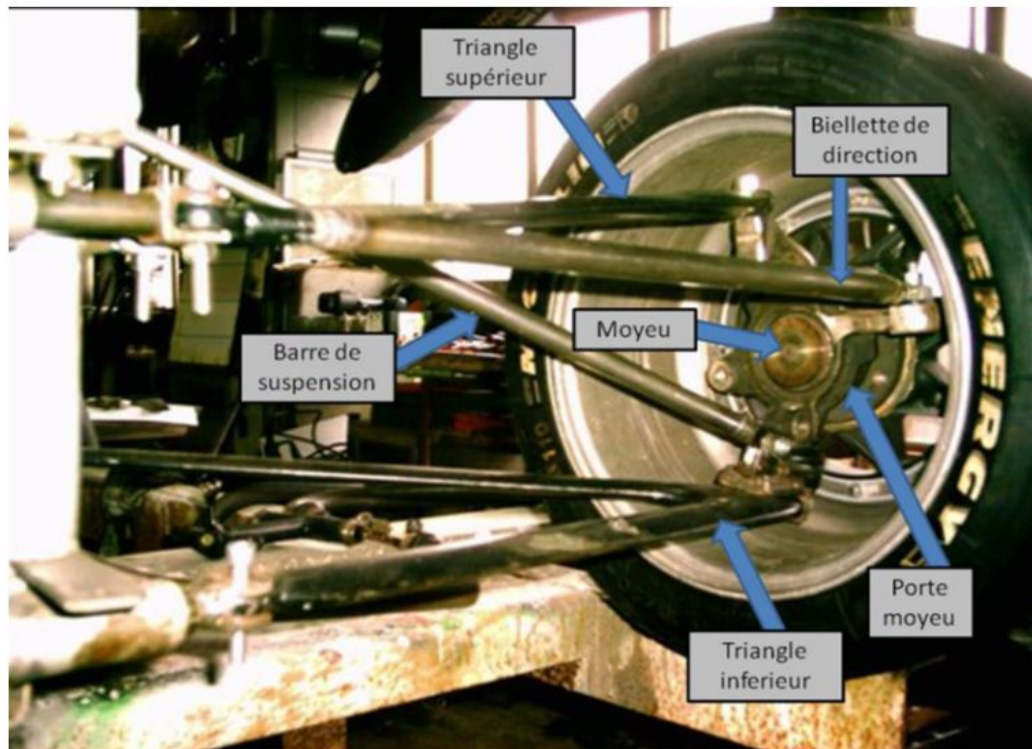


FIGURE 4 – Présentation des composants de la liaison au sol

## 5 Système de suspensions et validation de la conception

### 5.1 Introduction

Le système de suspension est l'un des organes les plus importants d'un véhicule de course. En effet, les triangles fixent la cinématique du véhicule, ils sont positionnés de sorte à faire travailler les pneumatiques dans les conditions optimales dans toutes les situations (accélération, freinage, virage). Les suspensions agissent sur la dynamique du véhicule et les transferts de charges. Jouer sur les suspensions permet de répartir les efforts sur certaines roues pour les charger ou les décharger et ainsi jouer sur l'adhérence des pneumatiques. Un système triangles/suspensions bien conçu garantit une bonne tenue de route au véhicule, ce qui est primordial pour un véhicule de compétition.

La dynamique du véhicule est l'un des aspects les plus compliqués dans la conception d'un véhicule. La conception d'un système de suspension performant passe par la compréhension de cette dynamique véhicule.

La phase du cycle en V la plus importante et la plus compliquée en ce qui concerne les suspensions est la phase de conception, c'est pourquoi nous avons choisi de présenter la conception de ce système pour illustrer la phase de conception sur chaque autre système de la liaison au sol.

### 5.2 Objectifs

L'objectif de conception de ce SFF est donc de faire travailler les pneumatiques dans leurs plages de fonctionnement (angles, charge...) optimales déduites de l'étude des données pneus sur toutes les épreuves du Formula Student.

Il va également de soi qu'au vue de l'objectif global (réduction drastique de masse), il faut que notre système soit le plus léger possible.

Enfin, ce système devra être réglable pour pouvoir s'adapter aux différentes épreuves et pouvoir réduire des éventuels écarts entre le système réel et la prévision théorique.

### 5.3 État d'avancement à l'issue de la première année

Ce projet se déroulant sur 2 ans, une partie de la conception a déjà été accomplie en première année. De manière générale, les SFF ont été conçus pour répondre à des objectifs et satisfaire un cahier des charges établi en première année. Suivant la complexité du SFF, il a fallu finir la conception commencée en première année (révisions de l'architecture et/ou dimensionnement).

En effet, à l'issue de l'année dernière, le cahier des charges, le choix du concept et de l'architecture avaient été définis : Suspension à double triangulation (pour bénéficier d'un réglage fin et découplé des angles de cinématiques (voir annexe). De plus, l'architecture retenue fut l'architecture à poussant (voir figure ci-dessous).

En effet, la roue est solidaire du porte-moyeu qui est lui-même relié aux extrémités des deux triangles. Les triangles inférieurs et supérieurs s'attachent sur le châssis. Une biellette de suspension est également reliée au porte-moyeu, son autre extrémité s'attache sur un basculeur en liaison pivot avec le châssis qui lié à l'amortisseur. La différence entre le poussant et le tirant provient du mode de fonctionnement de la biellette de suspension : compression ou traction. Le poussant fut choisi pour diminuer les problèmes de packaging (diminution des risques de collisions car le bas du châssis est très dense en SFF). Les amortisseurs sont positionnés en haut du châssis, perpendiculairement à l'axe longitudinal.

Un système anti-roulis a également été choisi. Ce système permet de rajouter de la raideur en roulis au train avant ou arrière pour compenser un manque de raideur en roulis apportée par les ressorts.

Le roulis (voir annexe) est un paramètre à considérer dans la conception d'une suspension. En effet, il induit des transferts de charge et un déplacement des triangles qui peut être néfaste au fonctionnement des pneumatiques (sortie de la zone de travail optimale). Toutefois, le roulis, s'il est maîtrisé, peut

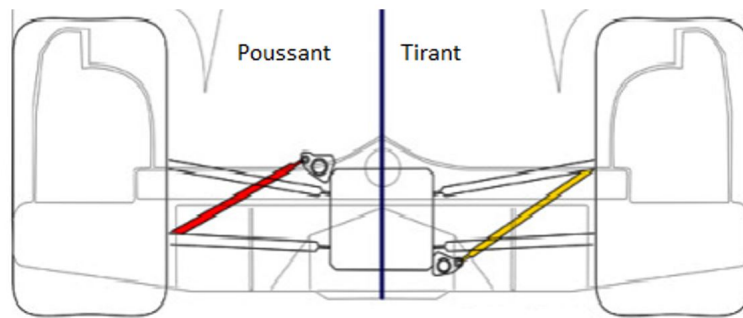


FIGURE 5 – Comparaison entre l'architecture à poussant et l'architecture à tirant

être bénéfique (rajout de charge par transfert de charge en virage sur un pneumatique qui améliore l'adhérence). Il faut donc maintenir un taux de prise de roulis en virage raisonnable et répartir au mieux les transferts de charge. L'implantation d'un système anti-roulis peut accomplir cela en répartissant les raideurs anti-roulis. Parmi les différentes solutions techniques existantes (barre de torsion, à basculeur...), c'est cette dernière solution qui fut choisie pour sa facilité de réglage. En effet, changer la taille du basculeur central permet de modifier la raideur anti-roulis de la barre. Des essais sur piste permettront de déterminer la raideur optimale.

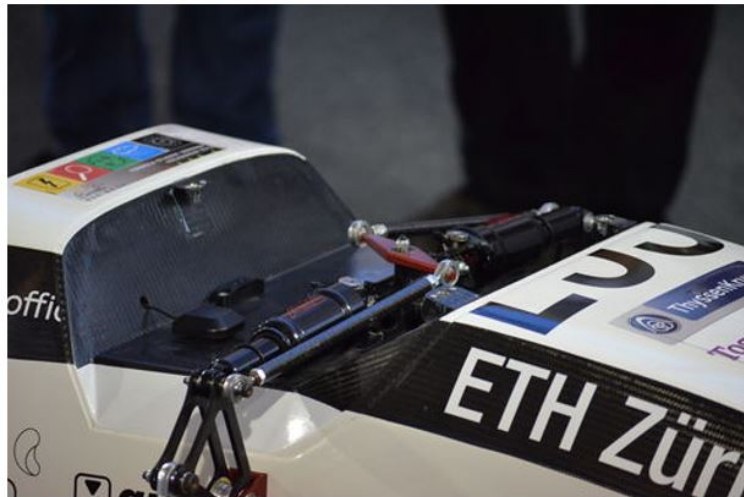


FIGURE 6 – Solution anti-roulis à basculeur

Une fois l'architecture définie, il a fallu déterminer une position pour les triangles qui respecte les plages d'angles optimales (carrossage, pince, chasse et pivot) pour les pneumatiques et ceci en ligne droite, en virage serré, en virage large... Il faut également respecter certaines contraintes plus globales qui déterminent la dynamique du véhicule dans son ensemble (position du centre de roulis, anti-cabrage/plongée **voir l'annexe**). Les triangles ont été positionnés sur le châssis et les portemoyeu à l'aide de simulations 2D et 3D du comportement du véhicule à l'aide des logiciels Geogebra et OptimumK.

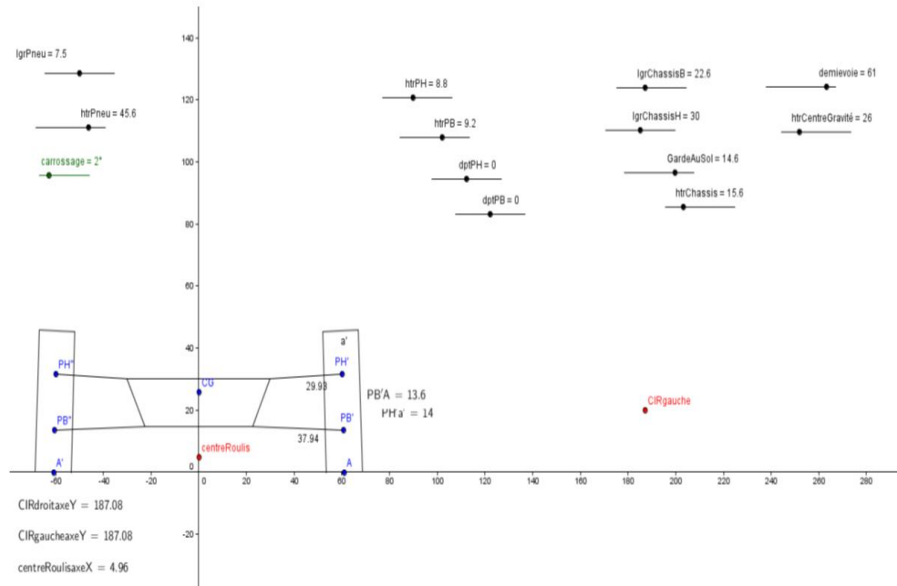


FIGURE 7 – Modélisation de la cinématique de suspension sous Geogebra

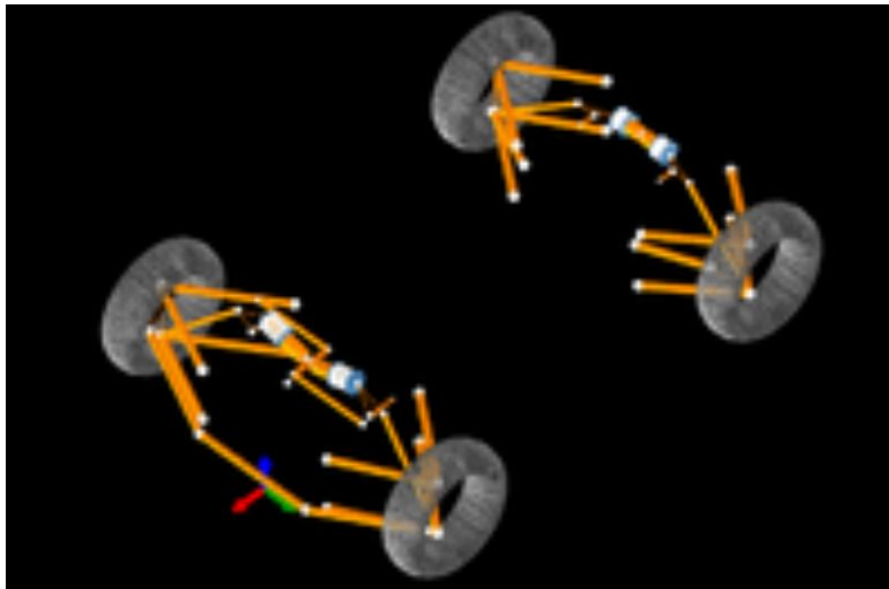


FIGURE 8 – Modélisation de la cinématique de suspension sous OptimumK

## 5.4 Phase de conception détaillée et validation

### 5.4.1 Conception des triangles

Après les vacances d'été, le projet a repris son cours. C'est à ce moment-là que le projet a pris toute son ampleur, il ne s'agissait plus de concevoir une liaison au sol mais il fallait aussi l'intégrer au sein d'un véhicule complet rassemblant 4 PA. La principale difficulté était d'intégrer nos systèmes au véhicule global en interférant pas avec les autres systèmes. Pour cette raison, il a fallu réajuster de nombreuses fois la position des points des triangles pour correspondre aux besoins du châssis, de la transmission...

Une fois la position et les dimensions des triangles établies, un autre membre de l'équipe les a modélisés sous le logiciel Catia et les a dimensionnés. La même procédure fut suivie pour les chapes fixant les triangles au châssis.

### 5.4.2 Calcul des raideurs

Une fois la conception des triangles finalisée, la conception de l'ensemble ressort-amortisseur et système anti roulis a dû être conçu. Pour cela, un modèle matlab de la dynamique du véhicule prenant en compte les raideurs, les masses et l'amortissement des différents éléments. Les caractéristiques telles que la masse, la position du centre de gravité ont dû être estimées pour pouvoir servir d'entrée dans notre modèle matlab de dynamique véhicule.

Ce modèle nous a permis de connaître les raideurs et l'amortissement qu'il fallait donner à notre système de suspension pour obtenir le comportement souhaité défini par le cahier des charges.

Il existe plusieurs types de raideur dans notre système de suspension : la raideur en « ride » (raideur haut/bas) et la raideur en roulis (raideur gauche/droite). Ressorts et pneumatiques apportent les raideurs en ride et en roulis. Toutefois, si les calculs mettent en évidence un manque de raideur en roulis, il est possible d'ajouter un système anti roulis qui compense ce manque.

Notre modèle a mis en évidence les besoins en raideur suivant :

	Raideur Totale [N.m/rad]	Raideur Ressorts [N.m/rad]	Raideur anti roulis [N.m/rad]
Avant	22 415	14 907	7 508
Arrière	17 206	16 554	652

TABLE 2 – Tableau raideurs

Il a nous donc fallu rajouter de la raideur en roulis à l'avant et à l'arrière à l'aide d'un système anti roulis. Le choix du système à basculeur fait l'année dernière a été abandonné pour un système à barre de torsion. (voir photo)



FIGURE 9 – Système anti-roulis à barre de torsion

Ce système a été modélisé sous catia et dimensionné pour résister aux contraintes s'exerçant sur lui via matlab et catia (éléments finis).

Une fois toutes ces raideurs et l'amortissement choisis, nous avons pu nous fixer sur le choix des amortisseurs : les ohlins TTX 25 MK2 développé spécialement pour le Formula Student.



TTX25 MkII



FIGURE 10 – Présentation des amortisseurs Ohlins TTX 25 MK2

### 5.4.3 Conception des basculeurs

Enfin, il a fallu dimensionner les basculeurs. Les basculeurs sont des pièces qui constituent l'intermédiaire entre les amortisseurs, la roue via la biellette de suspension, la biellette reliant à la barre anti-roulis et le châssis.

Des considérations cinématiques doivent aussi être considérées lors de la conception des amortisseurs. En effet, les calculs précédents fixent le « motion ratio ». Ce dernier est défini comme le rapport du déplacement de la roue sur le déplacement de l'amortisseur. Les dimensions des basculeurs doivent respecter cette contrainte. Les dimensions des basculeurs ont été fixées à l'aide d'une modélisation du mouvement des roues sous Geogebra (voir figure ci-dessous).

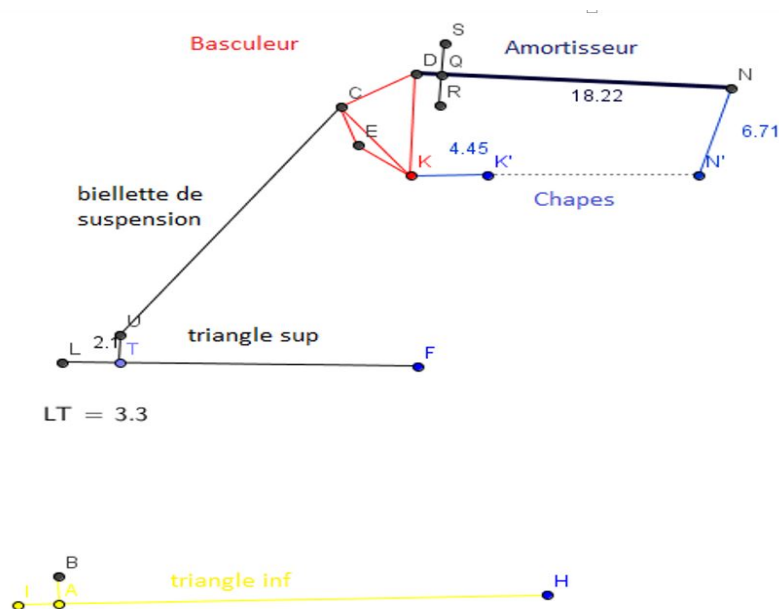


FIGURE 11 – Modélisation du mouvement des roues sous Geogebra

Les basculeurs ont ensuite été modélisés sous catia et dimensionnés sous éléments finis pour réduire leur masse au maximum. Les cas de charges ont été tirés de la feuille de calcul matlab, des coefficients de sécurité ont été choisis.

Une modélisation éléments finis est visible sur la figure suivante :

Cette étude éléments finis nous a permis de choisir les matériaux et de diminuer la masse de l'objet d'environ 250g à 120g. Les chapes reliant les différents éléments au châssis ont été modélisés et dimensionnés de la même façon. Au final, l'usage généralisé d'analyse éléments finis nous a permis de

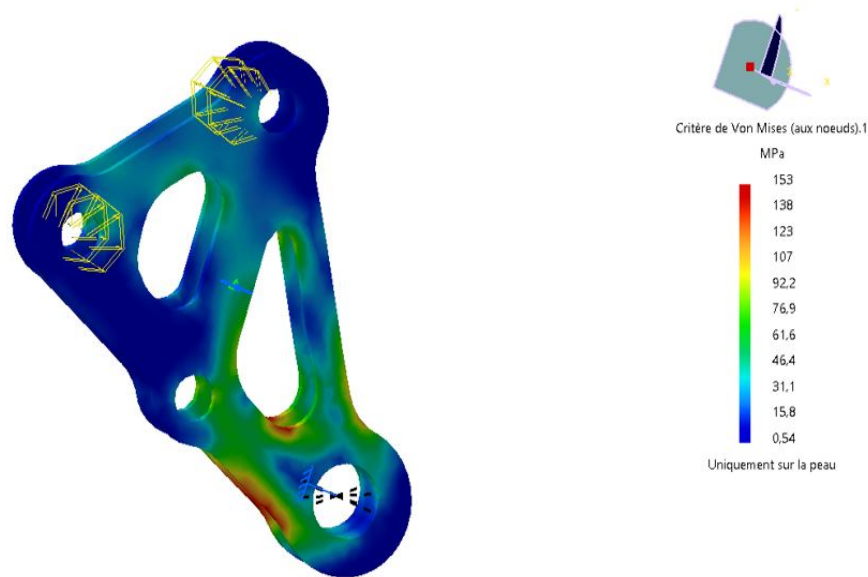


FIGURE 12 – Modélisation éléments finis sous catia d'un basculeur

réduire un peu la masse de chaque pièce et ainsi de réduire de manière significative la masse totale.

#### 5.4.4 Validation de la conception

Une fois la conception finalisée, toutes les pièces modélisées sous catia et intégrées sur la maquette numérique sans interférences avec les autres systèmes, la totalité de notre travail de conception est présenté lors de la revue technique Top copeaux. A cette occasion, chaque pièce est examinée individuellement et à l'échelle du véhicule par les anciens et les référents techniques. Si la conception semble cohérente, robuste et respecte le cahier des charges, cette dernière est validée, la production des pièces est autorisée. Plus que les pièces, les process de fabrication et de montage sont examinés.

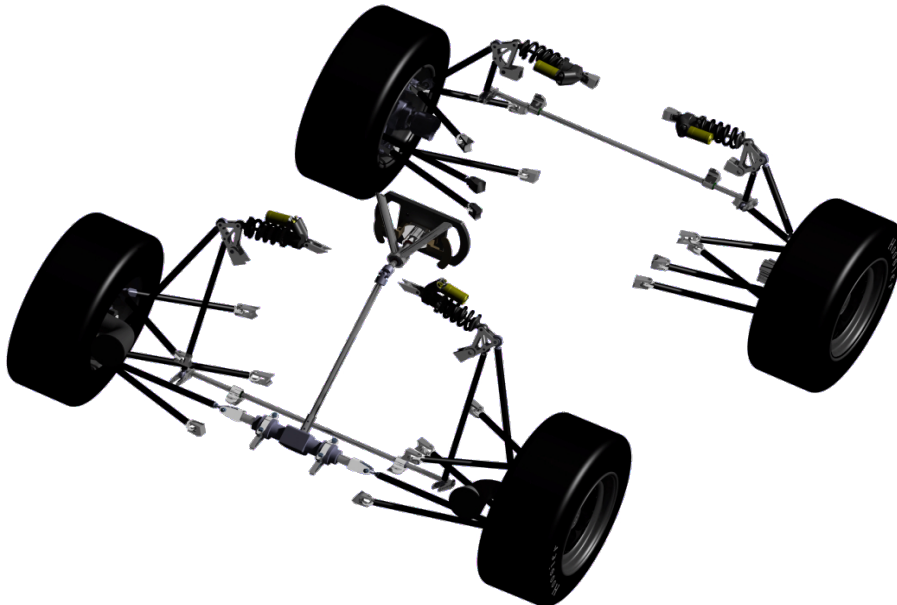


FIGURE 13 – Vue d'ensemble de la liaison au sol

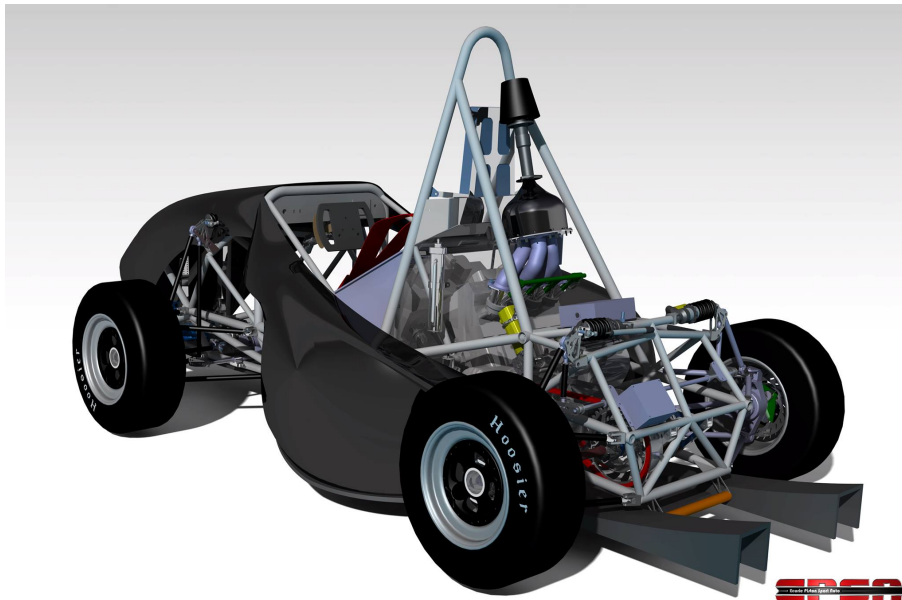


FIGURE 14 – Vue d'ensemble du véhicule

Cette période du projet a été difficile. En effet, l'équipe a souffert d'un manque de communication et la vue d'ensemble du véhicule a été un peu délaissée. De plus, le système de suspension est un système qui dépend beaucoup des autres systèmes, tout particulièrement du châssis, lorsque ce dernier est modifié, les étapes de conception précédentes doivent être recommencées. Nous avons accumulé à la fin un mois de retard sur le début de fabrication mais nous avons su tenir compte des remarques pour proposer une conception de qualité et ressouder l'équipe.

## 5.5 Étapes suivantes

Une fois la conception validée, le système a été mis en plan, les amortisseurs commandés chez un revendeur français de la marque. Les différentes pièces sont passées en production puis ont été validées. Le système de suspension a ensuite été validé avant d'être intégré sans difficultés sur le véhicule. Il reste maintenant à le régler aux cours des essais.

## 5.6 Conclusion

La conception de ce système est très compliquée et doit être très soignée puisqu'elle détermine le comportement du véhicule sur la route. Les concepts et principes ont été assimilés en première année mais réellement mis en application en deuxième année. Le fait que la conception de ce système dépende énormément des caractéristiques globales du véhicule et des autres systèmes rend sa conception compliquée. En effet, dès que le châssis est modifié, il faut reprendre la quasi-totalité du travail de conception. Au moment de la revue validant la conception, beaucoup de système ont été modifiés au dernier moment. La mise à jour du système de suspension a pris du temps, un mois de retard a été pris.

## 6 Porte moyeu et mise en plan

### 6.1 Introduction

Nous allons dans cette partie étudier la conception, la mise en plan et la fabrication du porte moyeu. Le porte moyeu est une pièce présente au sein de chaque roue, il est en quelque sorte le châssis de la liaison au sol. En effet, de la même manière qu'un châssis, la seule fonction du porte moyeu est de relier les différents éléments de la liaison au sol entre eux. C'est également la plus grosse pièce en terme de volume, de masse, de temps de fabrication et donc de prix. C'est donc une pièce charnière de la liaison au sol.

Le porte moyeu doit faire la liaison avec les systèmes suivants :

- La roue (au travers du moyeu et du montage de roulement)
- Le châssis (au travers des inserts des triangles de suspension)
- Le système de freinage (au travers de l'étrier)
- Le système de direction (au travers de la chape de direction) pour l'avant seulement
- La biellette de pince pour l'arrière seulement

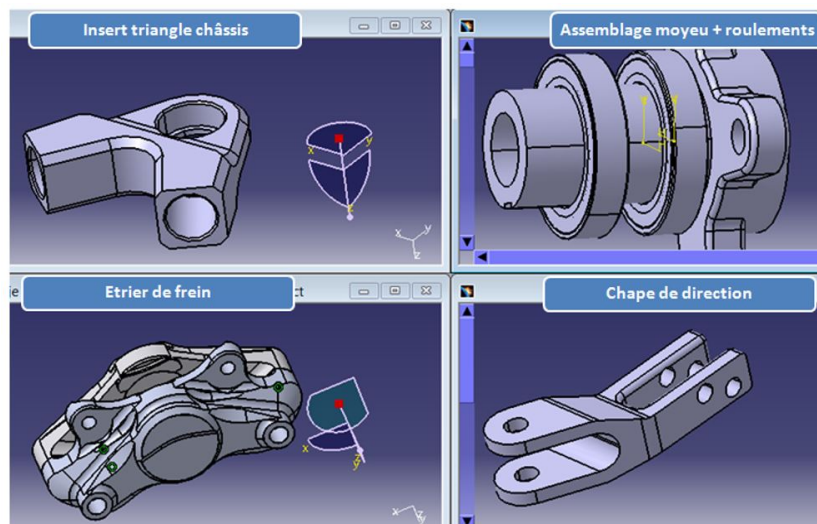


FIGURE 15 – Systèmes en liaison avec le porte-moyeu

Sur la figure suivante est représenté un porte moyeu avec seulement les surfaces fonctionnelles. On y met en évidence les différentes interfaces avec les systèmes énumérés précédemment.

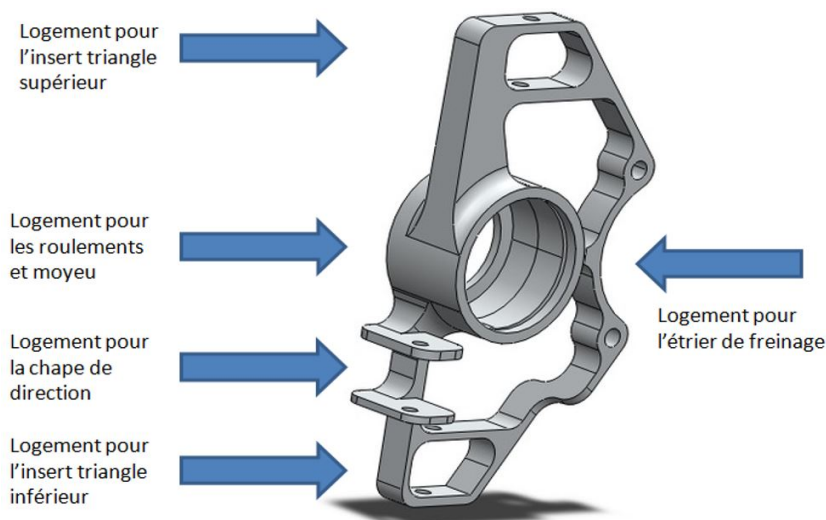


FIGURE 16 – Surfaces fonctionnelles d'un porte-moyeu

## 6.2 Géométrie

Pour concevoir un porte moyeu, il faut connaître l'emplacement et la géométrie de chacun des systèmes qu'il accueille. Une des difficultés pour le concepteur du porte moyeu a résidé dans le fait qu'à part l'ensemble roulements et moyeu, chaque système est conçu par une personne différente. Cela multiplie les interlocuteurs, les sources d'incompréhension et donc d'erreurs. Il a fallu attendre fin septembre pour que les autres systèmes se finalisent et donc que la conception du porte moyeu, à proprement parler, puisse commencer.

Chaque système fourni une table de points de fixation nécessaire à son attache sur le porte moyeu. On

	Point Name	Left		
		X	Y	Z
Double A-Arm	CHAS_LowFor	0,000	226,000	145,000
	CHAS_LowAft	-400,000	226,000	155,000
	CHAS_UppFor	0,000	310,000	304,000
	CHAS_UppAft	-400,000	310,000	304,000
	UPRI_LowPnt	-162,000	570,000	141,600
	UPRI_UppPnt	-168,000	543,000	315,600
	CHAS_TiePnt	50,000	200,000	200,000
	UPRI_TiePnt	-90,000	570,000	200,000

TABLE 3 – Table de points de fixation

peut lire sur ce tableau la position (coordonnées X, Y, Z) des points d'attache de :

- Triangle avant supérieur gauche
- Triangle avant inférieur gauche
- Triangle arrière supérieur gauche
- Triangle arrière inférieur gauche
- Bielle de pince

En plus d'être conçu par des personnes différentes, les systèmes ont été conçus sur des logiciels différents (Géogébra pour la direction, OptimumK pour les points triangles...). Il a donc fallu importer les référentiels de tous ces logiciels au sein de Catia pour pouvoir créer des points en se référant aux origines des logiciels respectifs. Lorsque l'on communiquait des coordonnées de point, il fallait alors toujours préciser le logiciel d'origine de ces points.

Cette phase de la conception du porte moyeu demande énormément de communication avec les autres membres de l'équipe. Il y a une multitude de paramètres à prendre en compte et à respecter dont seul le concepteur originel a connaissance comme par exemple :

- Position des points d'attache (discutés précédemment)
- Les efforts devant être transmis dans les interfaces
- Le volume enveloppe de chaque pièce en liaison avec le porte moyeu
- Les plages de débattement de ces pièces (par exemple pour les inserts triangle, un déplacement angulaire est autorisé, il faut vérifier qu'il n'y ait pas de collision de pièces sur l'ensemble de la plage)
- ...

Une fois toutes ces données collectées, la finalisation du porte moyeu peut commencer.

## 6.3 Finalisation de la conception

La finalisation comprend la vérification de la résistance du porte moyeu aux efforts, sa fabricabilité et sa montabilité.

Pour la résistance, il faut étudier les cas d'utilisation extrêmes : freinage en virage, accélération... Une fois ces cas dimensionnés et les charges connues (direction, point d'application, intensité en Newton) ils sont rentrés dans le module éléments finis de Catia afin de vérifier si la limite élastique de la pièce n'est pas dépassée. Pour respecter cette condition tout en gardant une pièce de faible dimension

et un poids minimal, de l'aluminium à haute limite élastique a été choisi : Aluminium 7075-T6.

Voici quelques exemples d'analyse éléments finis sur le logiciel Catia.

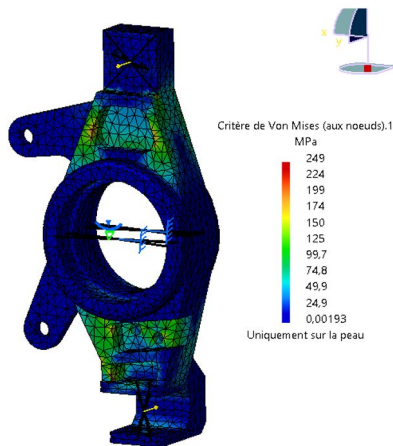


FIGURE 17 – Premier exemple d'analyse par éléments finis

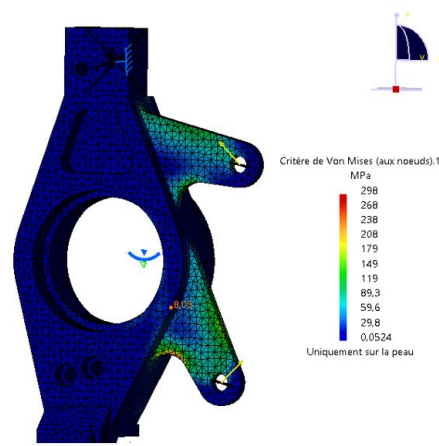


FIGURE 18 – Second exemple d'analyse par éléments finis

Pour vérifier la fabricabilité, nous sommes rentrés en contact avec le partenaire fabricant cette pièce, l'Ecole Boisard et nous avons discuté du modèle 3D avec un professeur qui nous a donné son avis et proposer quelques modifications de la pièce pour rendre sa fabrication plus simple et plus rapide.

Pour vérifier la montabilité, la pièce est intégrée dans l'assemblage complet de la liaison au sol. Il faut vérifier qu'aucune pièces ne rentrent en contact tant en statique qu'en dynamique. Il faut donc simuler tous les mouvements : rotation de la roue, braquage de la direction, enfoncement des suspensions... Les pires cas doivent être vérifiés.

A ce stade de la conception, dès qu'une modification est faite, il faut tout revérifier : résistance, fabricabilité et montabilité. Dans une moindre mesure si la modification est mineure.

## 6.4 Mise en plan

Une fois les modifications terminées et validée, il faut mettre en plan chaque pièce. Le dessin du plan du porte moyeu nécessite une vingtaine d'heure, comprenant les diverses vérifications et modifications. Nous avons cette année suivi un processus de validation en trois étapes, voici les étapes de vie du plan d'un porte moyeu :

- Dessin du plan par le responsable Moyeu & Porte Moyeu
- Vérification du plan par le Directeur de Projet du PAi274 puis modification
- Vérification du plan par le Directeur Technique 2A de l'EPSA puis modification
- Vérification du plan par le Directeur Technique 3A de l'EPSA puis modification
- Dessin de la pièce à partir du plan pour vérifier qu'aucune info n'est manquante.
- Envoi du plan au partenaire.

Ce processus a permis de fournir au partenaire un plan irréprochable. Il reste malgré tout très dense en information et difficile à lire pour un néophite. [Plan en Annexe]

Le dessin du plan fut une opération fastidieuse mais très enrichissante. Il ne suffit pas d'empiler les côtes sur un dessin de la pièce, il faut se placer à la place de l'opérateur et se demander quelle côte est importante à quel moment de l'usinage de la pièce. Certains choix paraissent évident (comme toujours coter par rapport au même plan sur une même vue) mais certains sont plus surprenant (comme ne jamais positionner un point en coordonnées polaires).

La mise en plan est une étape importante puisque les plans constituent notre moyen de communication avec les personnes qui fabriquent nos pièces. Toutes les pièces conçues doivent donc être mise en plan. Si les plans du porte moyeu sont les plus compliqués, d'autres pièces ont nécessité beaucoup moins de travail.

## 6.5 Étapes suivantes

Une fois les plans réalisés, validés et envoyés en production, la fabrication des portes-moyeu a pu commencer. La complexité de la pièce a demandé un long délai de fabrication. Après, les portes-moyeu furent validés et intégrés sur le véhicule.

## 6.6 Conclusion

Le porte moyeu peut être considéré comme le châssis de la liaison au sol puisqu'il constitue le liant entre les différentes pièces. Sa conception sous éléments finis a été complexe puisqu'il a fallu diminuer au maximum sa masse tout en garantissant sa résistance et ne pas casser comme pour Dynamix. Sa géométrie complexe a eu pour conséquence la complexité de sa mise en plan et de sa fabrication.

## 7 Fabrication

Une fois les plans dessinés et vérifiés, ils sont envoyés à nos partenaires et aux entreprises qui fabriquent nos pièces. En effet, de nombreuses écoles et lycées partenaires fabriquent nos pièces, ainsi de nombreux types de process de fabrication sont disponibles tels que :

- Usinage par l'école Boisard
- Découpe laser par l'école La Mache
- Soudage à l'école de la Giraudière

Pour les process plus complexes ou plus spécifiques, nous faisons appel à des entreprises comme pour l'électroérosion des portes-moyeu.

Les pièces les plus complexes à fabriquer sont les portes moyeux. Leur fabrication a nécessité plus

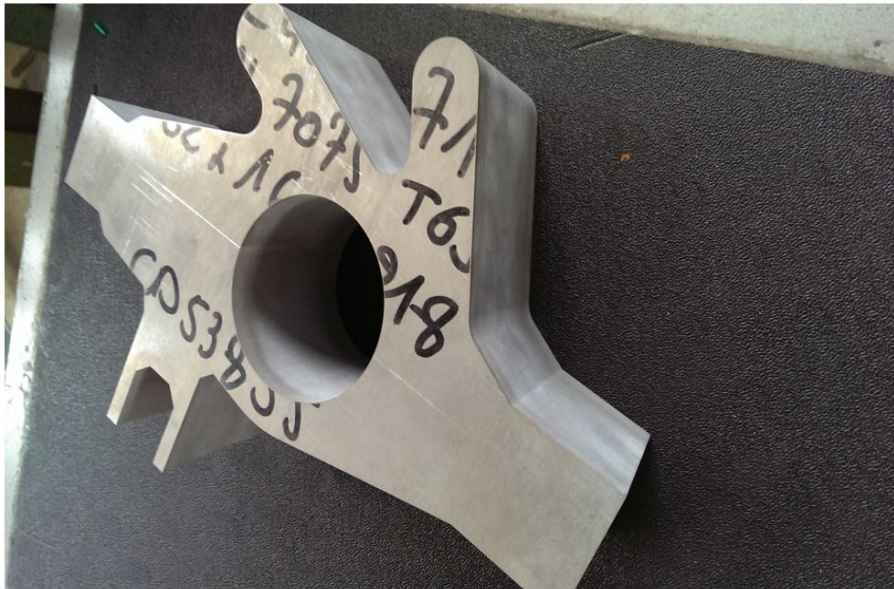


FIGURE 19 – Contours du porte-moyeu après électroérosion

d'une semaine. Pour gagner du temps, les contours ont été faits par la technique de l'électroérosion et non par usinage comme c'était prévu initialement.

De nombreuses chapes de forme complexe ainsi que les basculeurs et les leviers ont été découpés au laser.

Le châssis et les leviers ont été soudés sur le tube de torsion des barres antiroulis à la Giraudière.



## 8 Système de freinage et achats

### 8.1 Introduction

Le système de freinage permet de ralentir et de stopper le véhicule. Il se compose d'un circuit hydraulique qui actionne un dispositif frottant sur la roue pour diminuer sa vitesse. Parmi les différents concepts de freinage envisageable, le système frein à disques est le seul adapté à la compétition auto. Ce système se compose du circuit hydraulique, des disques, des étriers. . .

### 8.2 Objectifs

Pour pouvoir passer les épreuves dynamiques, il faut préalablement réussir les épreuves de freinage : l'épreuve consiste à bloquer les 4 roues du véhicule lancé à grande vitesse. On s'est également fixé d'arrêter le véhicule lancé à 100Km/h sur une distance inférieure à 30m.

La masse du système de freinage est également un paramètre important d'autant plus qu'elle constitue en grande partie la masse non suspendue du véhicule. Le rapport entre masse suspendue et masse non suspendue influe beaucoup la dynamique véhicule.

### 8.3 État d'avancement à l'issue de la première année

Pour le système de freinage, le concept de frein à disque a évidemment été choisi. Ils sont plus faciles à implémenter, ils bénéficient d'un meilleur refroidissement et compte tenu de la taille de notre voiture, ils apportent de meilleures performances. En effet, un ou deux disques sont en rotation avec les roues. Un étrier autour du disque permet de lier le circuit hydraulique aux pistons qui, quand le conducteur freine, permettent de presser les plaquettes contre le disque afin de créer une force de friction qui va s'opposer au mouvement de rotation. Les freins à disques sont utilisés dans beaucoup de voitures, motos ou avions car ils sont faciles à implémenter du fait qu'il faut simplement les placer dans l'axe de la roue. C'est un système facile à refroidir car le disque est en contact avec l'air extérieur, ce qui permet un refroidissement même pendant le freinage.



FIGURE 20 – Exemple de système de freinage à disque

La conception des disques dépend de plusieurs paramètres qui sont : le matériau, la forme de la surface et la forme intérieure du disque. La solution la plus performante avait été choisie : disque d'acier, rainuré et ventilé.

En ce qui concerne la position des disques, comme le système doit simplement être placé sur l'axe de rotation de la roue, différentes configurations sont possibles à l'arrière. Elles sont décrites dans le tableau ci-dessous. La solution consistant à placer les disques arrières hors des roues pour limiter la masse non suspendue a été initialement retenue.

Le système hydraulique est la jonction entre la pédale de frein actionnée par le pilote et les freins.

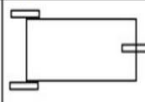
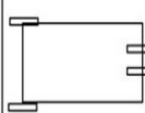
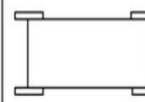
	type de système	avantage	inconvénients
un disque arrière		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût plus bas</li> <li>• moins poid</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• freinage moins stable</li> <li>• Efforts dans le différentiel</li> <li>• diametre plus grand</li> </ul>
deux disques arrière intérieures		<ul style="list-style-type: none"> <li>• freinage stable</li> <li>• masse non suspendue inférieure</li> <li>• disques de diamètres plus petits arrière un refroidissement plus important</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• coût plus élevé</li> </ul>
deux disques arrière extérieures		<ul style="list-style-type: none"> <li>• une plus grande stabilité de freinage</li> <li>• disques de diamètres plus petits arrière</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• coût plus élevé</li> <li>• augmentation masses non suspendues</li> </ul>

FIGURE 21 – Différentes configurations pour le positionnement des disques

Il existe différentes architectures de circuit hydraulique. La configuration du circuit de freinage est importante pour savoir comment répartir la pression entre les différents freins afin de ne pas bloquer les roues et d'avoir un freinage optimal. Pour des circuits hydrauliques doubles, c'est-à-dire avec deux circuits indépendants, plusieurs configurations sont possibles : Le circuit hydraulique retenu est consti-

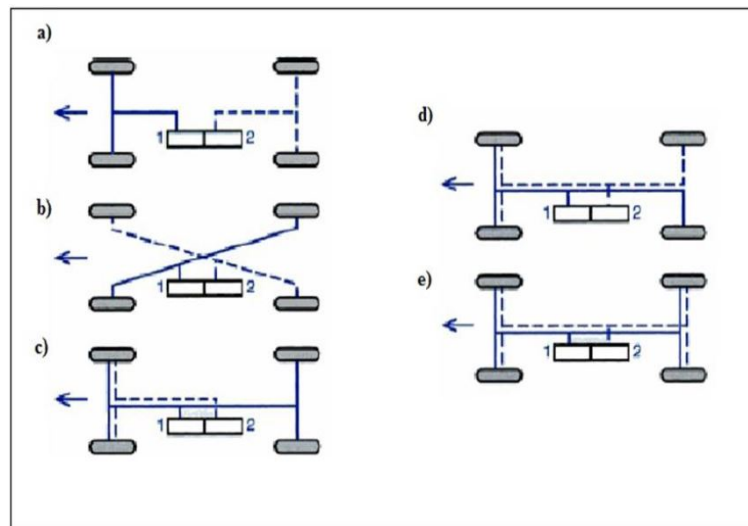


FIGURE 22 – Différents types de circuit hydrauliques

tué de deux circuits en forme de 'II' : un circuit pour le train avant et l'autre pour l'arrière afin de mieux contrôler la répartition des pressions dans chaque circuit. Les autres éléments du circuit seront un répartiteur et un limiteur au niveau du circuit arrière.

## 8.4 Achats

Après les premiers calculs permettant un pré-dimensionnement (voir calculs en annexe) de tous les éléments du système la recherche de composants du commerce a commencée. La phase d'achat a été une période clé du projet, en effet, il fallait trouver des pièces dans le commerce qui répondaient à nos exigences. Il fallait également trouver des fournisseurs qui vendaient des pièces dans des délais de livraison corrects et à un prix abordable. Les fournisseurs devaient sans cesse être relancés pour s'assurer que les commandes soient livrées dans les temps. Pour le système de freinage, il nous a fallu trouver un nouveau fournisseur au dernier moment, l'ancien fournisseur nous a fait faux bond. Les achats pour ce système se sont avérés particulièrement difficiles étant donné la petite taille des roues : 10 pouces.

### 8.4.1 Disques

Notre premier choix d'architecture était des disques dans les roues à l'avant mais pas à l'arrière où on avait choisi une architecture différente. Les deux disques de frein devaient être placés à la sortie du différentiel, mais finalement cela n'a pas été retenu car le réglage des étriers n'était pas compatible avec les autres architectures de la voiture. Nous sommes donc revenus à une solution plus classique d'un disque dans chaque roue.

De plus, la solution initialement choisie (disque d'acier, rainuré et ventilé) n'a finalement pas été retenue car vu la taille des roues il n'y avait pas sur le marché de disque de la taille souhaitée. Finalement des disques d'acier, rainurés mais pleins ont donc été choisis. Nous n'avons pas pu trouver dans le commerce de disque s'adaptant bien au diamètre intérieur des jantes (soit trop petit, soit trop grand). Nous avons donc décidé de faire les disques nous-mêmes. Le diamètre extérieur du disque a été fixé

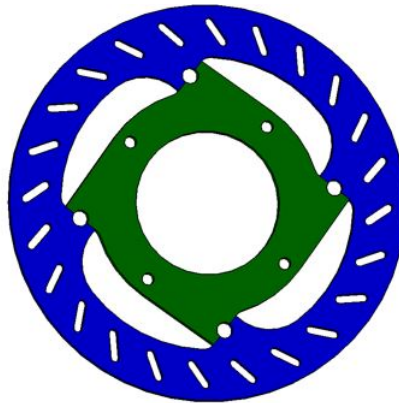


FIGURE 23 – Disque de frein custom

à 193mm pour s'adapter à l'espace disponible à l'intérieur de la jante. Les rainures du disque ont été dessinées de manière à optimiser le refroidissement et à rendre possible l'installation d'un capteur de vitesse de rotation. Le matériau choisi est la fonte grise pour son coefficient de friction important résistant bien aux hautes températures primordial afin de ne pas perdre en efficacité pendant les longues séances d'essais.

Les frettes de disque ont été réalisées en aluminium afin de réduire la masse le plus possible. Le lien entre la frette et le disque est dessiné à transmettre les efforts de manière radiale afin de réduire l'usure dans ce points et de faciliter la transmission des efforts de freinage.

### 8.4.2 Maitres cylindres

Pour les maitres cylindres on a cherché le plus faible diamètre possible afin de maximiser la pression par rapport à la force pour être capable de freiner avec des disques au diamètre réduit (par rapport à Dynamix et à beaucoup d'autres équipes). Finalement notre choix s'est porté sur le MP-002 de Beringer de 12mm.

### 8.4.3 Etriers

Pour les étriers on a choisi les CP4226-2S0 d'APracing pour l'arrière pour leur légèreté et leur puissance suffisante.

APracing était à l'origine notre fournisseur pour les étriers avant et arrière mais suite à un problème avec le fournisseur nous avons dû remplacer en urgence certains composants en faisant appel à Beringer. Pour les étriers avant on avait prévu des étriers 4 piston d'APracing mais suite à un problème d'approvisionnement nous nous sommes tournés vers des doubles pistons mais avec un diamètre plus grand fournis par Beringer. La puissance disponible est légèrement plus faible mais suffisante.

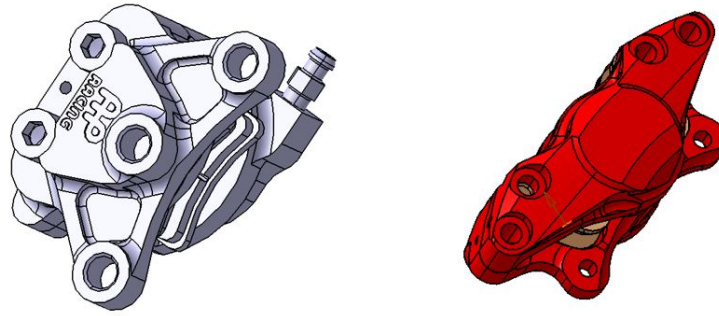


FIGURE 24 – Ancien (gris) et nouvel (rouge) étrier

## 8.5 Conclusion

La conception du système de freinage n'est pas ce qui a causé le plus de problèmes. La sélection des fournisseurs et des pièces du commerce s'est avérée en revanche beaucoup plus compliquée. En effet, la taille des roues choisis limite fortement le nombre de systèmes disponibles. Une fois les pièces sélectionnées, commandées et reçues, le système de freinage a été intégré sur le véhicule : plusieurs mètres de durites parcourant tout le véhicule ont été montés.

## 9 Roues, jantes et logistique

### 9.1 Introduction

Les pneumatiques assurent le contact entre le véhicule et le sol, ils sont donc d'une importance capitale car leur influence sur le comportement et les performances du véhicule est très importante. Contrairement à la majorité des compétitions automobiles le règlement du Formula Student impose peu de contrainte sur les pneumatiques. La principale règle est que le diamètre de la jante doit être supérieur ou égal à 8 pouces. Ensuite la largeur de la jante, le choix du manufacturier et du composé, de la pression sont laissés à la discrétion de l'équipe.

### 9.2 Présentation

La roue est le système qui assure le contact entre le sol et le véhicule, par sa rotation elle entraîne le mouvement du véhicule. Elle est composée de la jante qui assure la liaison avec le moyeu et la fusée (l'axe de rotation de la roue), du pneumatique qui est en contact direct avec le sol.

### 9.3 Conception

#### 9.3.1 Pneumatiques

Dans les faits, la majorité des équipes utilise des pneus de 10 ou 13 pouces de diamètre de jante (voir figure ci-après), fournis par des manufacturiers spécialisés dans la compétition automobile et qui réalisent des pneus spécialement pour le Formula Student.

Nous avons choisi des pneus de 10 pouces afin de réduire la masse du véhicule (un diamètre plus petit entraîne une réduction de la masse des autres composants de la liaison au sol, disques et portemoyeux notamment) et d'améliorer la performance du véhicule (l'analyse des données pneus a confirmé que les pneus de cette taille disponible pour le Formula Student étaient plus performants que ceux de 13 pouces).

En contrepartie les problèmes de packaging sont plus présents mais ils ont été surmontés et aucune collision n'est prévue au sein du système. Nous avons choisi les pneus proposés par le manufacturier



FIGURE 25 – Comparaison 10 vs 13 pouces

américain Hoosier car ce sont ces pneus qui sont les plus performants.

- Sec : slick 18.0 x 6.0-10 LC0
- Pluie : 18.0 x 6.0-10 WET

Comme la dégradation de gommages de ces pneus performants est importante nous avons aussi sélectionné des pneus de rallye Yokohama compatibles avec nos jantes, moins performants mais à la dégradation plus faible afin de réaliser les premiers essais de déverminage du véhicule.



FIGURE 26 – Pneu Slick

### 9.3.2 Jantes

Les jantes assurent le contact entre le pneumatique et le moyeu. C'est pour le moment une pièce que nos partenaires ne peuvent usiner et qui doit en conséquence être commandée à un constructeur. Peu de constructeurs réalisent des jantes de 10 pouces, et en plus du diamètre nous avons besoin d'un déport important pour nos jantes. Notre choix s'est donc porté sur les 10i du constructeur américain Keizer.



FIGURE 27 – Pneumatique Hoosier et Jante Keizer

## 9.4 Logistique

Etant donné le grand nombre de pièces fabriquées et commandées chez les différents fournisseurs et partenaires, la mise en place d'une organisation logistique s'est avérée obligatoire.

L'outil EPSAProd et Excel ont été utilisés : EPSAProd (voir figure 28) permet de communiquer et de centraliser les plans envoyés à nos partenaires. Des tableaux excel furent remplis pour répertorier les pièces commandées, les délais de livraison et les prix correspondant.

Promo	N° Pièce	Pièce	Responsable de la pièce	Provenance	Ref Fab	Quantité	Limite appro	Etat	N° Com	Plan reçu	Fin prod	Etat prod	Valid
Alomix 2015	238	axe moteur bas	Martin Zeller	Boisard	usinage boisard	1	12/01/2015		15-B-005	oui		30	non
Alomix 2015	240	axe moteur haut	Martin Zeller	Boisard	usinage boisard	1	12/01/2015		15-B-004	oui		30	oui
Alomix 2015	241	support_silentbloc_moteur	Martin Zeller	Boisard	usinage boisard	8	20/12/2014		15-B-003	oui		100	oui
Alomix 2015	242	chape_standard	Martin Zeller	La Mache	Strice Gelly	20	19/01/2015		15-M-011	oui		0	non
Alomix 2015	243	plaque chape moteur basse	Martin Zeller	La Mache	Strice Gelly	1	08/01/2015		15-M-003	oui		0	non
Alomix 2015	244	plaque c chape moteur haute	Martin Zeller	La Mache	Strice Gelly	8	08/01/2015		15-M-001	oui		0	non
Alomix 2015	245	support_silentbloc_bas	Martin Zeller	Boisard	usinage boisard	2	20/12/2014		15-B-003_bas	oui		100	oui

FIGURE 28 – Plate-forme internet EPSAPROD

Systeme	Responsable	Pièce	Fournisseur	Prix théorique	Numéro Commande	Numéro Assemblage	Numéro Pièce	Masse théorique (Cat)	Masse réelle	Quantité souhaitée	Quantité en stock	Quantité commande
65	suspensions	RCE	cousinets B&B	michaud chally						8		
66	suspensions	RCE	chape antirouls sup av	boisard				0,054		2		
67	suspensions	RCE	chape antirouls sup ar	boisard				0,03		2		
68	suspensions	RCE	chape antirouls inf av	boisard				0,027		2		
69	suspensions	RCE	chape antirouls inf ar	boisard				0,027		2		
70	suspensions	RCE	chapes amortisseur avant	boisard				0,077		2		
71	suspensions	RCE	chapes amortisseur arrière	boisard				0,127		2		
72	suspensions	RCE	chapes basculeur avant	boisard				0,134		2		
73	suspensions	RCE	chapes basculeur arrière	boisard				0,164		2		
74	suspensions	RCE	MS	Viserie						36		
75	suspensions	RCE	Vis épaulée 10	michaud chally						4		
76	suspensions	RCE	MS	Viserie						8		
77	suspensions	RCE	Cousinets basculeurs	michaud chally						8		
78	Mo/Po/Mo	DTY	Porte-Moyeu ArG					0,655		1		
79	Mo/Po/Mo	DTY	Porte-Moyeu ArD					0,655		1		
80	Mo/Po/Mo	DTY	Moyeu Ar					0,495		2		
81	Mo/Po/Mo	DTY	Porte-Moyeu ArG					0,667		1		
82	Mo/Po/Mo	DTY	Porte-Moyeu ArD					0,667		1		
83	Mo/Po/Mo	DTY	Moyeu Air					0,495		2		
84	Mo/Po/Mo	DTY	Entree/Sortie Cartrage Jantes Av					0,292		2		
85	Mo/Po/Mo	DTY	Entree/Sortie Cartrage Goujon Av					0,005		6		
86	Mo/Po/Mo	DTY	Chape Triangle Supérieur					0,039		4		
87	Mo/Po/Mo	DTY	Chape Bielle Direction					0,054		2		
88	Mo/Po/Mo	DTY	Cotes Anti-Rouls							6		
89	Mo/Po/Mo	DTY	Roulement 7192AC2CA/P44	SF (Brammer)	150			0,133		8		
90	Mo/Po/Mo	DTY	Vis-Boulon MS	Viserie						24		

FIGURE 29 – Tableau logistique

Une bonne maîtrise de la logistique est vitale pour éviter les erreurs de commandes et gérer les délais de livraison. Les roues en sont un bon exemple.

Nous devons commander les pneus chez un fabricant, nous sommes passés par un importateur allemand pour commander les pneus. Les jantes quant à elles sont été commandées depuis les Etats-Unis. Leur approvisionnement a été assez long mais la commande a été passée assez tôt pour que nous les recevions à temps pour l'intégration du véhicule. Il a fallu de nombreuses fois s'assurer de la bonne livraison des jantes, déterminer leur localisation (envoyées par bateau, bloquées à la douane...).

Il a également fallu relancer les partenaires pour qu'ils n'oublent pas de fabriquer certaines pièces. Enfin, les pièces fabriquées et reçues ont été stockées avec soin pour préparer l'intégration.

## 9.5 Conclusion

Le choix de la dimension des pneus a été un choix très important car il influence beaucoup les choix des autres SFF. Ce choix malgré les difficultés qu'il entraîne a permis de grandes économies de masse et donc d'amélioration de la performance.

## 10 Validation unitaire et validation système

Une fois les commandes reçues et les pièces fabriquées, il est très important de les vérifier pour s'assurer qu'elles correspondent à leurs spécifications. Ainsi, les pièces fabriquées par nos partenaires subissent des mesures de métrologie pour vérifier la géométrie des surfaces fonctionnelles. Ces mesures sont simplement faites au pied à coulisse. De même, les pièces du commerce sont testées pour s'assurer de leur bon fonctionnement.

Une fois cette étape passée, les pièces sont assemblées en systèmes. Ces systèmes sont ensuite tes-



FIGURE 30 – Exemple de métrologie

tés individuellement avant d'être intégrés sur le véhicule. A l'exemple du châssis qui a passé l'essai de torsion. La raideur en torsion du châssis influence sur le comportement du système de suspension, la validation de sa raideur est donc importante. (voir photo ci-dessous).

La validation des pièces et des systèmes est garantie par des PV de validation. Ainsi, l'ensemble des pièces de la liaison au sol ont fait l'objet d'un PV de validation.



FIGURE 31 – Test de rigidité en torsion du système châssis équipé sur banc



## 11 Direction et intégration

### 11.1 Introduction

Le système de direction est le système permettant au pilote de faire tourner le véhicule. Celui-ci relie donc le volant aux deux roues avant.

Il est constitué des éléments suivants :

- La colonne de direction
- Un cardan (permettant de transmettre un mouvement de rotation entre 2 arbres non alignés)
- Une crémaillère (transformant un mouvement de rotation en un mouvement de translation)
- Deux butées reliant la crémaillère aux biellettes
- Deux biellettes reliant la crémaillère aux porte-moyeux
- Des chapes permettant de fixer ces éléments au châssis



FIGURE 32 – Modélisation numérique du système de direction

### 11.2 Conception

Avant de concevoir le système mécaniquement, il faut concevoir la cinématique du système qui permettra à la voiture de tourner facilement. Il faut pour cela positionner judicieusement la crémaillère et le point reliant la biellette de direction au porte-moyeu afin de respecter l'épure d'Ackermann (qui impose une différence d'angle entre la roue extérieure est la roue intérieure en virage, voir annexe) et d'atteindre le rayon de braquage désiré sans collision avec la jante et les triangles. Ce travail se fait principalement par itérations successives sur différents logiciels (excel, matlab, geogebra) avant de confirmer sur CATIA.

La colonne de direction est composée de deux axes reliés entre eux par un unique cardan afin de limiter la masse. L'angle maximal entre deux axes de rotation en entrée et sortie d'un cardan étant de  $45^\circ$  le volant n'est pas positionné à la verticale mais fait un angle de  $20^\circ$  avec l'horizontale. Le cardan, non-homocinétique, est placé de manière à faciliter la mise en virage de la voiture pour le pilote.

La partie supérieure de la colonne est usinée par tournage. Les roulements sont montés en 0 serrés sur l'arbre.

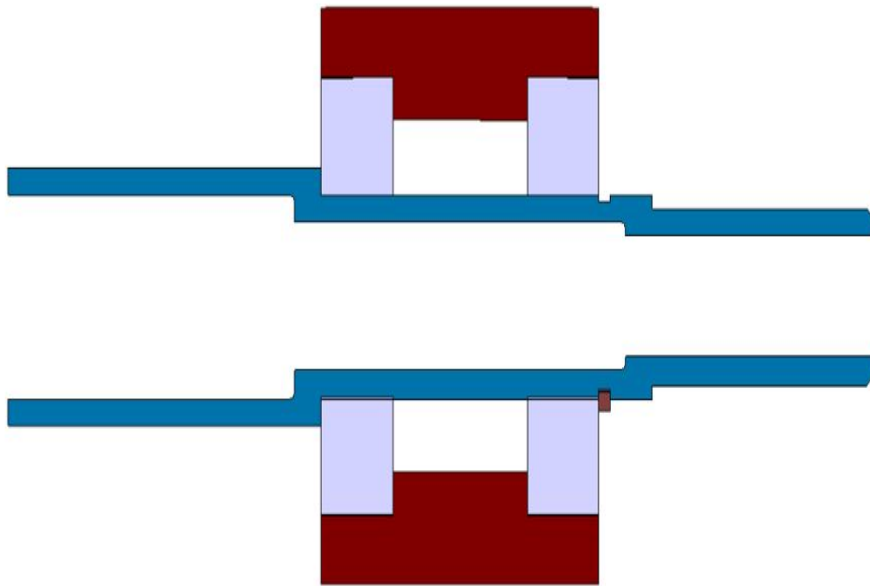


FIGURE 33 – Montage du roulement dans le fourreau

La crémaillère fournie par Planet Kart Cross est choisie pour son prix, ses dimensions et son débattement qui correspondent bien à nos besoins (1 tour de volant pour aller de butée à butée).



FIGURE 34 – Crémaillère Planet Kart Cross

Les chapes permettent de fixer la crémaillère par le principe de collier et le fourreau est conçu de manière à laisser de la place pour le tableau de bord.

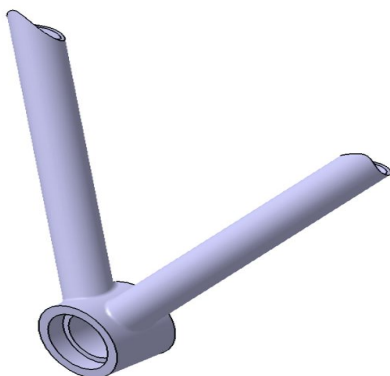


FIGURE 35 – Chape fourreau

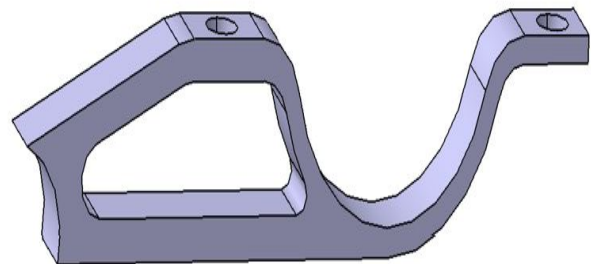


FIGURE 36 – Chape crémaillère

Les butées de crémaillères permettent de relier la crémaillère aux biellettes de direction mais elles servent aussi à délimiter la plage de mouvement de la crémaillère et du volant.

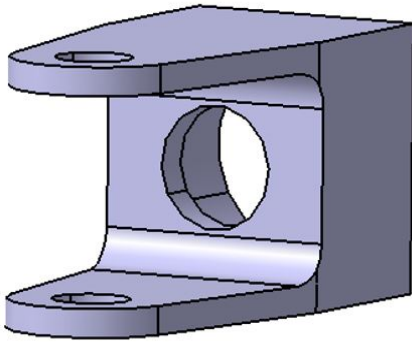


FIGURE 37 – Butée crémaillère

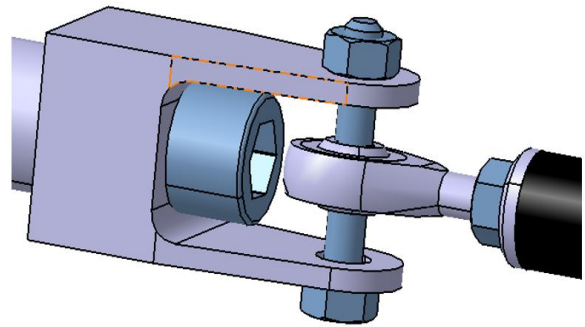


FIGURE 38 – Ensemble barreau de crémaillère – butée – biellette

### 11.3 Intégration

Une fois la conception validée. Les pièces sont mises en plan puis fabriquées ou commandées.

L'intégration sur le châssis est une étape importante puisqu'elle valide en partie le travail de conception accompli.

L'intégration débute avec la livraison du châssis équipé sur la plate-forme, autorisée par la revue Top Véhicule obtenue le 17 mars. Elle se termine par la revue Top Moteur prévue le 15 avril et autorisant le début des essais. Elle débuta avec plus d'un mois de retard sur le planning initial et se terminera avec un mois et deux jours de retard par rapport à la date de livraison du véhicule initialement convenu au début du projet.

Afin que l'intégration se passe de façon optimale et très rapidement de nombreuses opérations préalables sont nécessaires.

Dans un premier temps, l'équipe est consultée pour connaître les besoins en fournitures du type visserie, anneaux élastiques, ... mais également en outillage. Un état des lieux est ainsi réalisé avec le matériel déjà disponible et des commandes sont passées pour s'assurer que tout le matériel nécessaire est disponible.

Afin d'organiser au mieux l'intégration en gérant les ressources humaines et techniques nécessaires, plusieurs outils ont été mis en place.

- **Le journal d'intégration** : Document réalisé par le directeur intégration. Il relate au jour le jour le travail prévu, réalisé, les personnes présentes et le temps passé. Ce journal permet à tout le monde de suivre l'intégration, les problèmes rencontrés et l'état d'avancement.
- **Des gammes de montage**. Pour qu'une intégration se passe bien et soit rapide, les étapes de montages se doivent d'être pensées avant. Des documents, appelés « gamme de montage », sont donc réalisés avant le début de l'intégration par les responsables des systèmes. Ceci permet de faire ressortir d'éventuel problème, de permettre d'identifier l'ordre de montage des différents systèmes. En effet, certains systèmes doivent être montés avant d'autre pour des raisons d'accès. Par exemple l'échappement étant difficile à intégrer du fait de ses formes complexes demande beaucoup d'espace libre. Le réservoir, la batterie et les récupérateurs de fluides seront donc montés après et enfin la paroi pare-feu peut venir recouvrir le tout.

Ces gammes permettent à quiconque de monter le système, même si le responsable n'est pas là.

L'intégration étant une phase qui sous-entend travail manuel, elle est donc potentiellement dangereuse. Pour éviter tout problème et pour assurer la protection de tout le monde conformément au règlement intérieur de l'EPSA des équipements de protection individuelle sont disponibles pour tout le monde.

Une formation sur la sécurité est donnée à tous les membres novices. Le port de chaussures de sécurité est de plus obligatoire dès que l'on se trouve sur la plate-forme.

Pour en revenir à l'exemple de la direction, les chapes sont soudées centrées par rapport au châssis. La partie haute de la colonne est mise en place de façon définitive. Ensuite le cardan est mis en place puis le reste de la colonne relié à la crémaillère. Par itérations on change la longueur de la colonne jusqu'à ce que la crémaillère puisse rentrer dans son logement. Une fois ceci fait, toute la partie inférieure de la colonne est soudé (manchon entre crémaillère et colonne, colonne, manchon entre colonne et cardan) puis les goupilles et la colle sont placées pour maintenir définitivement le système, en effet le cardan est maintenu en rotation par des goupilles élastiques fendues placées une fois le système en position. Il est aussi collé afin d'empêcher le rotulage sur le long terme.

Nous avons rencontré certaines difficultés lors de l'intégration du système direction. En effet, la conception qui avait été validée ne permettait pas le démontage de la colonne. Or son démontage est nécessaire pour les autres opérations d'intégration. Il a fallu revoir le design du système de direction, repasser par toutes les étapes de conception et de production pour pouvoir obtenir un système démontable et l'intégrer.

De manière générale, beaucoup de pièces ont nécessité quelques petites modifications pour être intégrées (ponçage léger, rectification...).



FIGURE 39 – Cardan goupillé et soudé



FIGURE 40 – Système de direction intégré sur Atomix, photo 1

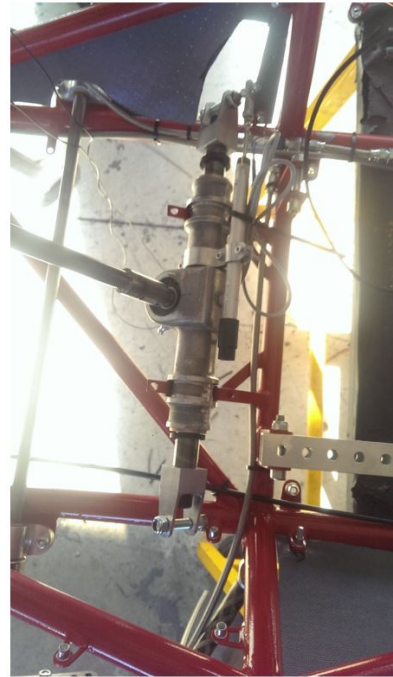


FIGURE 41 – Système de direction intégré sur Atomix, photo 2

#### 11.4 Conclusion

La conception de la direction a nécessité une compréhension de la cinématique de direction avant d'être conçue mécaniquement. Sa mise en plan, les commandes n'ont pas posé de problèmes mais son intégration a été plus délicate. Grâce à la réactivité de l'équipe et des partenaires, nous avons pu surmonter les problèmes.

## 12 Essais et validation du véhicule

Le dernier échelon consacré à la validation porte sur le système global, donc ici la voiture dans son intégralité. Pour contrôler son bon fonctionnement, un protocole de test avec de nombreux « run » a été établi afin de valider la fiabilité et le comportement dynamique de la voiture. Certains de ces roulages seront effectués dans l'enceinte du lycée automobile de Bron lorsque les vitesses atteintes seront faibles, et le reste sur l'anneau de comportement du circuit d'essais Volvo Trucks à la Valbonne.



FIGURE 42 – Photo des essais de Dynamix à ISYVAL

Les essais valident la conception en montrant que le véhicule présente des performances conformes à ce qui était demandé dans le cahier des charges. De plus, les essais permettent de régler les différents systèmes. En effet, l'une des contraintes concernant la conception de notre LAS était qu'elle soit réglable pour pouvoir s'adapter aux différentes épreuves et aux différentes conditions. Pour cette raison, la position des triangles peut varier dans une certaine plage. Les raideurs apportées par les barres anti-roulis sont également variables. Il faut donc déterminer les meilleurs réglages pour chaque épreuve et pour chaque pilote. Enfin, les essais permettront de vérifier la tenue en fatigue des pièces, les pièces trop fragiles casseront et on pourra refaire des pièces plus résistantes avant la compétition. On rend ainsi notre véhicule plus fiable en détectant les points faibles du véhicule et en les renforçant.

## 13 Conclusion

Nous avons terminé cette année la conception de la liaison au sol du véhicule STUF' 2015 Atomix par la fixation des différentes géométries et cinématiques, puis le dessin et le dimensionnement des différentes pièces pour résister aux contraintes d'utilisation et interagir sans problème avec les éléments des autres systèmes du véhicule.

Ensuite, nous avons lancé la production et l'approvisionnement de ces pièces puis commencé l'assemblage de ces différents éléments pour aboutir à l'intégration du véhicule complet. Ces deux étapes ont été très instructives car elles ont représenté le passage du virtuel au réel et nous ont fait découvrir les problématiques inhérentes à l'usinage et à l'assemblage, tant au niveau de la gestion, que de la mise en pratique.

Malheureusement, des retards dans la finalisation de la conception, des retards d'approvisionnements de certain éléments indépendants de notre volonté et des problèmes imprévus sur certains systèmes du véhicules, n'ont pas permis de finalisé l'intégration au moment où ce rapport est écrit et la quantité d'essais que nous pourrons effectuer sera limité.

Nous sommes toutefois confiants quant à notre capacité à faire bientôt rouler notre véhicule et à nous mesurer aux autres écuries en Italie à la rentrée.

## Références

- [1] *Bases de la dynamique du véhicule*. Techniques de l'Ingénieur, 25 Octobre 2012. 33p.
- [2] *Bases de la dynamique du véhicule- État stationnaire, stabilité et régime transitoire des mouvements de lacet-dérive et de roulis*. Techniques de l'Ingénieur, 25 Octobre 2012. 33p.
- [3] *Vehicle Dynamics, theory and applications*. Number ISBN 0387742433. Springer, 19 Mars 2008. 1015p.
- [4] *Race Car Vehicle Dynamics*. Number ISBN 1560915269. SAE International, 15 Décembre 1995. 1015p.
- [5] FSAE organisation. *2014 Formula SAE® Rules*. [http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2014\\_fsae\\_rules.pdf](http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2014_fsae_rules.pdf).
- [6] Anthony Cariou. Etude cinématique du châssis d'un véhicule de compétition - optimisation des réglages à l'aide d'un modèle numérique et de mesures sur circuit. Technical report, Conservatoire national des Arts et Métiers, centre régional associé d'Orleans, 17 Décembre 2010. 136p.
- [7] A. van Berkum. Chassis and suspension design fsrte02. Master's thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2006. 118p.
- [8] Daniel Larouche. Conception d'une suspension avant pour une voiture de type (fsae). Master's thesis, Université du Québec à Chicoutimi, 2010. 90p.
- [9] Elena Criado Ocaña. Diseño y cálculo del sistema de frenado para un prototipo formula student. Master's thesis, Universidad Carlos III de Madrid, 2012. 184p.
- [10] Eric Hamilton. Design of formula sae brake systems. Master's thesis, College of Engineering, North Carolina State University, 2009.
- [11] Wikipedia. Frein. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Frein/> consulté le 15.11.2013.
- [12] Wikipedia. Frein à disque. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Frein\\_%C3%A0\\_disque](http://fr.wikipedia.org/wiki/Frein_%C3%A0_disque) consulté le 18.12.2013.
- [13] Auto publitest. <http://www.auto-publitest.com/> consulté le 18.04.2014.
- [14] SAE International. Sae formula sae® series. <http://students.sae.org/cds/formulaseries/> (consulté le 10.01.2014).
- [15] Pierre Provot. Engrenages, pignon-crémaillère. <http://pierreprovot.wordpress.com/les-engrenages/pignon-crmaillre/> (consulté le 15.02.2014).



## 14 Annexes

### 14.1 Gestion de projet

#### 14.1.1 Responsabilités au sein du projet

Chaque membre du projet a des responsabilités au sein du PE et au sein de l'écurie. Les responsabilités organiques sont propres à un sous-système SFF. Ainsi chaque membre s'est vu confier la responsabilité d'un SFF. (voir figure suivante) Comme cela a été précisé dans le rapport, la durée de

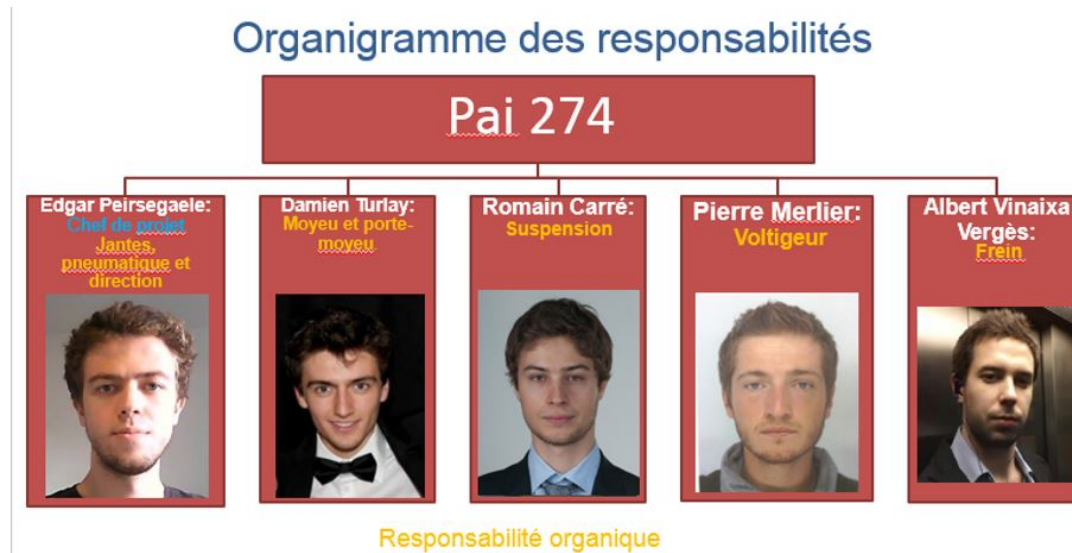


FIGURE 43 – Organigramme des responsabilités

ce projet est de deux ans. En première année, la conception préliminaire a été finalisée. En deuxième année, la conception est validée puis validée. La phase de fabrication commence. Pierre Merlier a rejoint l'équipe en deuxième année, il n'a donc pas travaillé sur un système en particulier mais à contribuer à la réalisation de nombreux systèmes (notamment sur la mise en plan). Il est également directeur des essais et de la validation du véhicule Atomix. Il recherche donc des circuits et organise les essais.

Les différentes phases de conception et de fabrication se succèdent tout au long des 2 ans. A l'issue de ces différentes phases d'ingénierie, des TOP (revues techniques devant le tuteur, les partenaires et les anciens de l'écurie) valident ces différentes phases. L'enchaînement des phases et des TOPs est représenté sur le cycle en V (voir figure 3).

Les TOPs projet, maquette, dimensionnement ont déjà été franchis. Le TOP appro est prévu pour le jeudi 12 juin 2014.

Le détail des TOPs est explicité dans les lignes suivantes :

- Top Projet : autorise l'engagement des ressources humaines du projet.
- Top Maquette : autorise l'engagement des ressources logicielles de maquettage numérique.
- Top Dimensionnement : autorise l'engagement des ressources logicielles de validation numérique.
- Top Appro : autorise l'engagement des bons de commandes des approvisionnements matière à cycle long.
- Top Saison : autorise la présentation de la maquette SID du véhicule détaillé aux partenaires, l'engagement des moyens techniques et humains de la plateforme ISYMECA.
- Top Copeau : autorise le lancement de la production véhicule, l'engagement des matières premières, la fabrication des pièces unitaires chez les partenaires.
- Top Organe : autorise l'Intégration Organe des différents sous-systèmes SFF du véhicule sur les plateformes Partenaires.
- Top Véhicule : autorise l'Intégration Véhicule sur la plateforme ISYPRO.
- Top Moteur : autorise la Validation Système du véhicule sur piste d'essais.

- Top Trophée : autorise le déplacement au Trophée.
- Top Musée : autorise la conservation du véhicule pour les générations suivantes.

Au cours de ce projet, nous avons pu compter sur le soutien sans faille des aînés. Nous disposions d'une plateforme de stockage des connaissances Epsapédia basée sur Wikipédia. Nous avons pu profiter des connaissances partagées par les aînés et nous avons également enrichi la base de connaissances. Ces apports pourront à leur tour aider la promotion entrante dans leur conception.

Le schéma suivant récapitule les différents acteurs du projet :

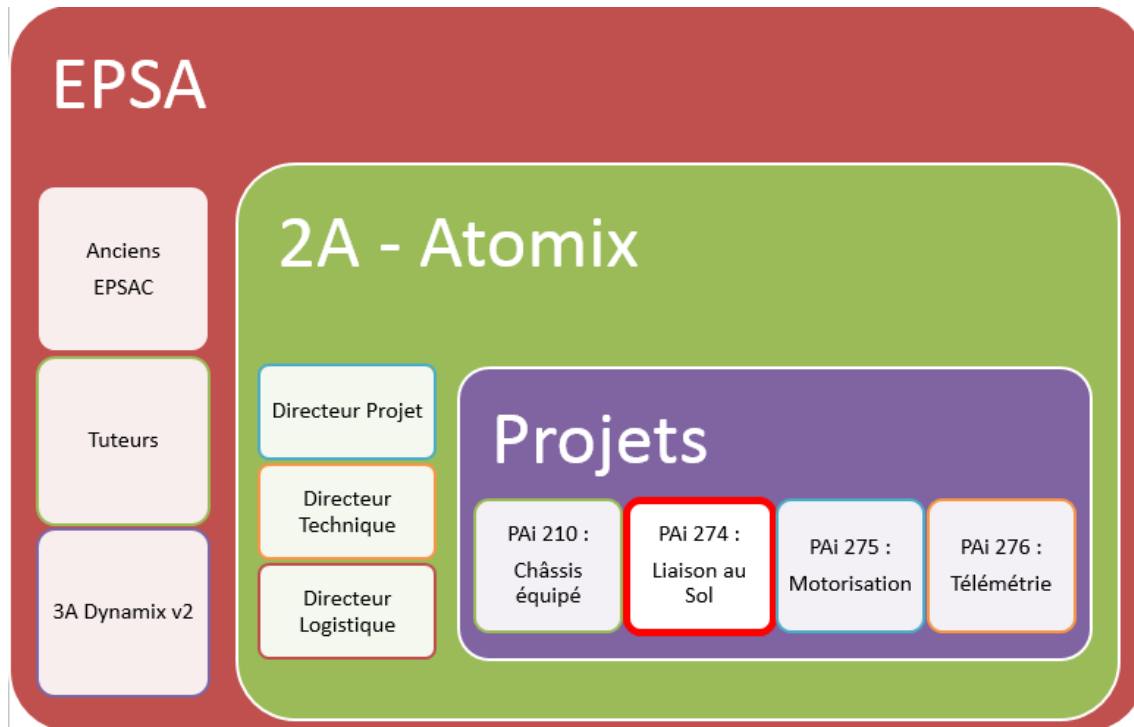


FIGURE 44 – Schéma des différents acteurs du projet

#### 14.1.2 Difficultés rencontrées

La plupart des difficultés rencontrées lors de ce projet résultent de la complexité du fonctionnement de la liaison au sol. En effet, tous les sous-systèmes interagissent entre eux. De nombreux paramètres entre en compte, nous avons donc eu du mal, dans un premier temps, à bien comprendre toutes les subtilités de la théorie. Grâce à l'aide apportée par les aînés, ces difficultés ont pu être surmontées. Les nombreux changements sur les autres systèmes impactaient la liaison au sol, il fallait alors recommencer les étapes de conception. Ces multiples itérations nous ont fait prendre un mois de retard. L'intégration et la validation ont souffert de ce retard puisque moins de temps était disponible pour ces étapes.

La communication entre les différents groupes de PE a également posé quelques difficultés. En effet, c'est à l'équipe chargée de la conception de la liaison au sol de définir certains paramètres qui touchent le véhicule dans son ensemble (voies, empattement, positions des triangles... ). La tenue de nombreuses réunions rassemblant plusieurs PE a pu nous permettre de surmonter cette difficulté.

Pour résoudre ces difficultés, plusieurs solutions ont été mises en place. Lorsque tous les groupes se retrouvent dans la même salle le mercredi puis le mardi pour travailler nous formons si possible un U. Au début et à la fin de la réunion sont effectués des tours de table avant de constater l'avancement de chacun et de pouvoir faire part de ses demandes et interrogations auprès des autres membres.

### 14.1.3 Diagramme de GANTT

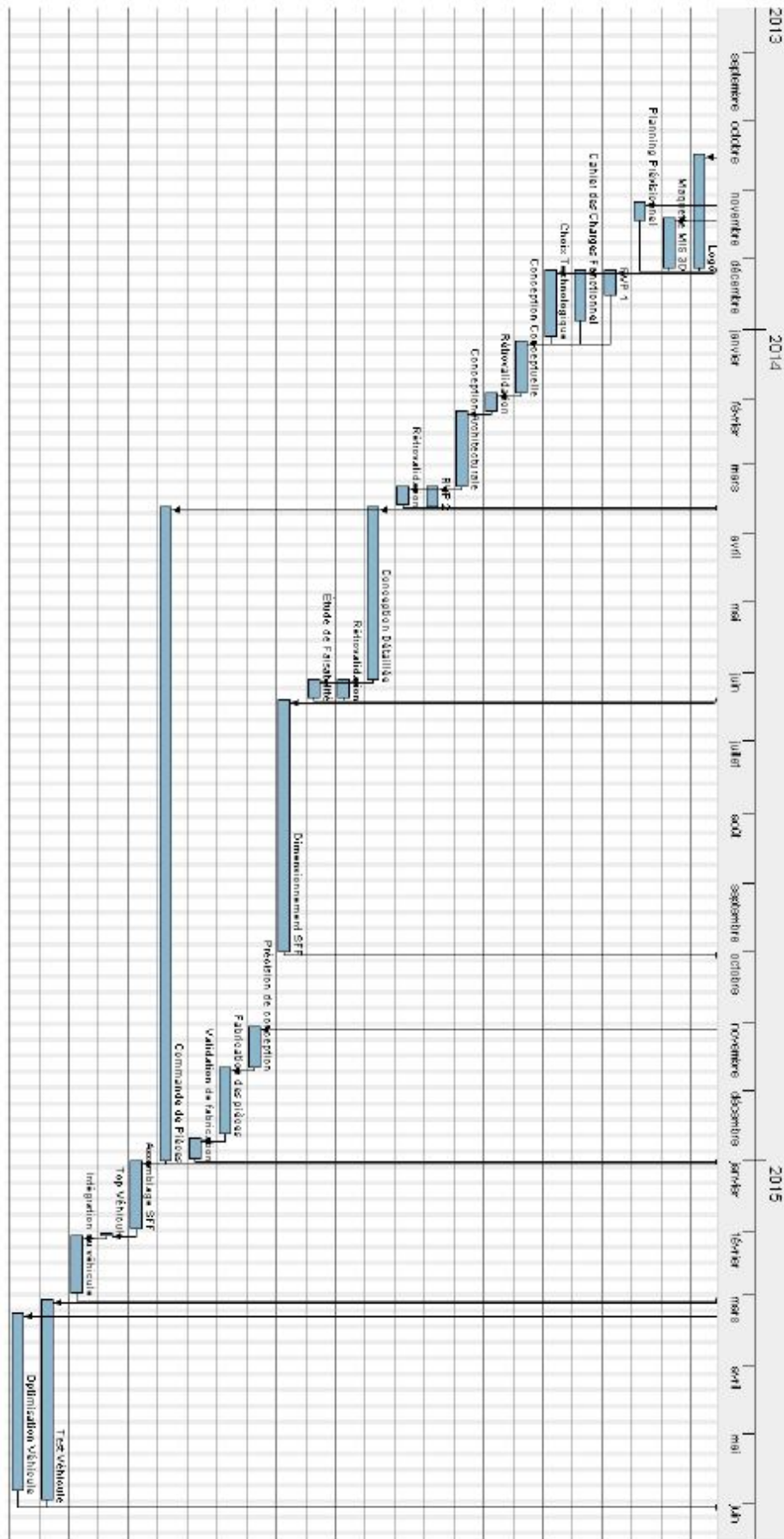


FIGURE 45 – Diagramme de Gantt d'un SFF du PE

14.1.4 Diagramme de PERT

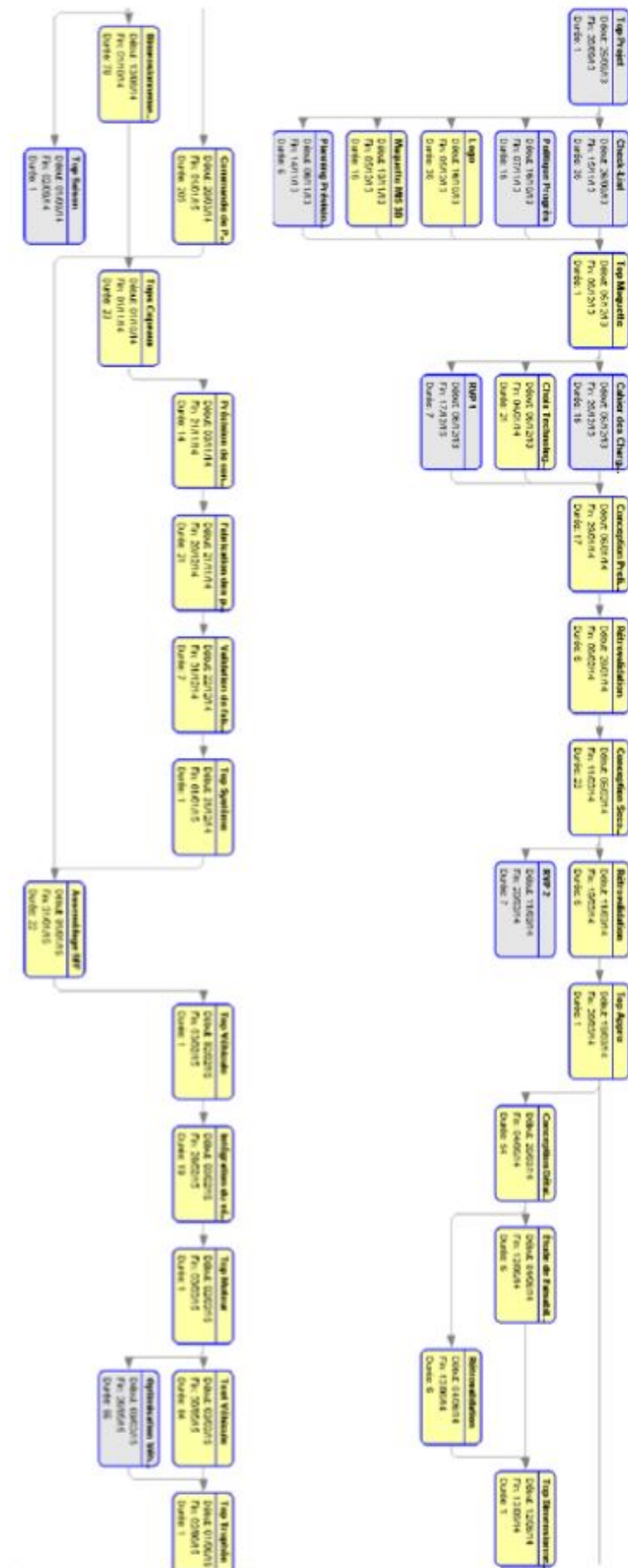


FIGURE 46 – Diagramme de PERT

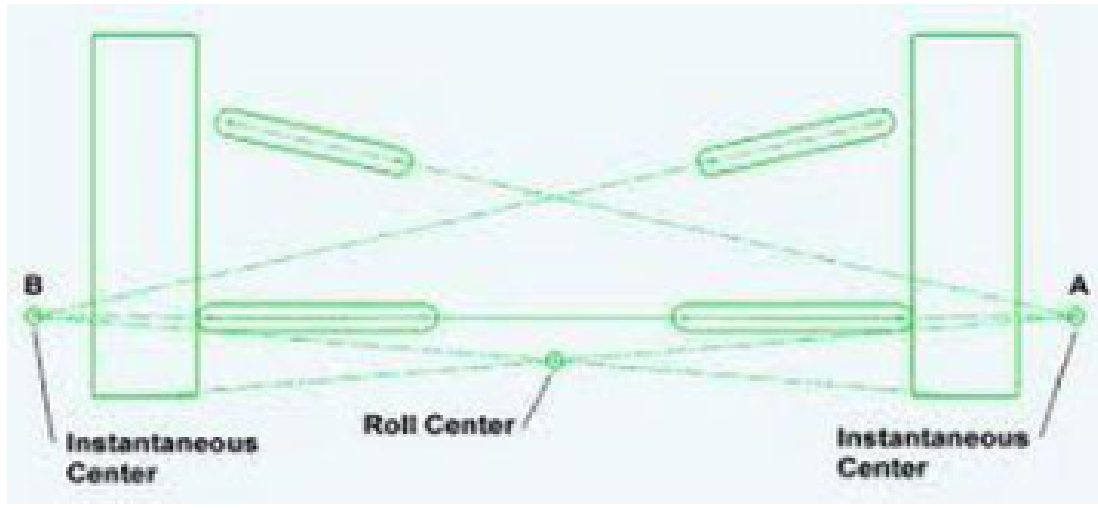
## 14.2 Dynamique du véhicule

Selon le type de mouvement et de trajectoire que le véhicule suit, il subit différentes accélérations (latérales, longitudinales) qui peuvent occasionner des transferts de charges (latéraux, longitudinaux).

### Comportement en virage

Lorsque le véhicule est en virage, la force centrifuge produit un transfert de charge latéral. Le châssis s'incline dans le sens opposé au virage (à l'inverse d'une moto). L'angle que prend le châssis par rapport à l'horizontale est appelé roulis. Les pneumatiques extérieurs sont davantage chargés que les pneumatiques intérieurs. En effet, lorsque le pilote décide de prendre un virage, c'est-à-dire d'inscrire la voiture sur une trajectoire circulaire de rayon  $R$ : il tourne le volant d'un angle  $\beta$ . La rotation du volant entraîne le braquage des roues via le système de direction, donc la dérive  $\delta$  des pneumatiques. Instantanément, la dérive des pneumatiques génère des efforts transversaux  $F_{yi}$  et  $F_{ye}$ , appelés poussées de dérive, qui font naître l'accélération transversale  $\gamma t = V^2/R$ , où  $V$  est la vitesse de la voiture. Le moment calculé sur l'axe de roulis provient de la force  $F_{\gamma} = M \cdot \gamma t$  appliquée au centre de gravité (CG). La distance  $H$  entre le centre de gravité et l'axe de roulis a donc une grande importance sur le moment de roulis. Il découle un transfert de charge de la roue intérieure vers la roue extérieure. L'angle de roulis dépend donc du moment de roulis et de la raideur antiroulis. En connaissant la distance entre le CG et le centre de roulis  $CR : H$ , la masse du véhicule et le type de virage (rayon et vitesse), il est possible de déterminer le moment de roulis. On fixe ensuite les raideurs antiroulis (somme des raideurs de la barre antiroulis, des ressorts et des pneumatiques) pour obtenir un angle maximal de roulis valant  $2^\circ$  et pour optimiser les transferts de charges entre les roues.

Le roulis peut modifier la géométrie des triangles et ainsi faire sortir les pneumatiques de leur zone de travail optimale. Fixer un taux de prise de carrossage en  $^\circ$  par prise de roulis en  $^\circ$  permet de rester dans la zone optimale de travail. Ceci peut être accompli en positionnant correctement les Centres Instantanés de Rotations (CIR) des roues. (Voir les figures 36 et 37). On vérifie que la géométrie créée place le CR convenablement (au-dessus du sol, ni trop loin, ni trop près du CG). La VSAL est la distance entre le CIR et l'axe médian du véhicule de face.



Front and Rear View 2D Kinematics

Camber change in Bump

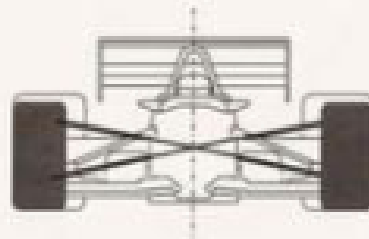
$$\Delta C [\text{rad}] = A \tan \frac{H}{VSAL}$$

$$\Delta C = 0 \text{ if } VSAL = \infty$$

Camber change in Roll

$$\Delta C [\text{rad}] = R [\text{rad}] \left( 1 - \frac{\text{Track}}{2 \times VSAL} \right)$$

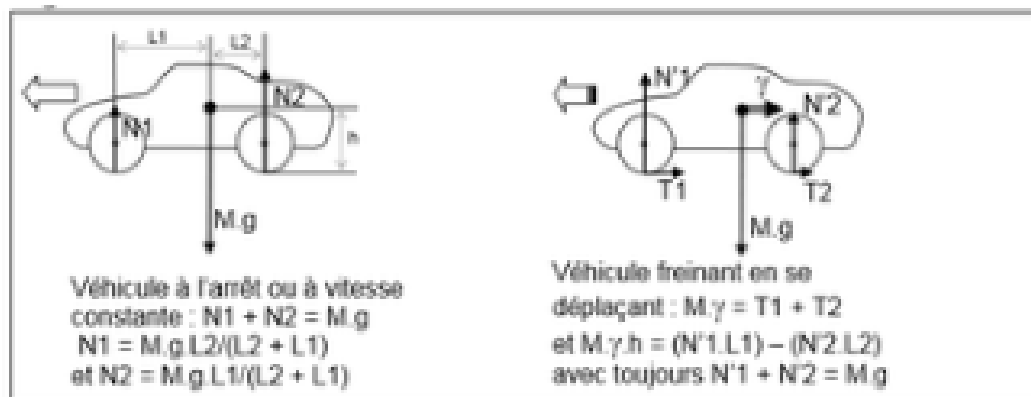
$$\Delta C = 0 \text{ if } VSAL = 1/2 \text{ Track}$$



L'action de la direction fait aussi varier la géométrie, pour un virage donné (V et R), on peut calculer l'angle des roues à fournir pour tourner. Il faut veiller à trouver une géométrie qui pour un angle de roulis et un angle des roues pour un virage donné respecte les plages de fonctionnement des pneumatiques.

### Comportement en ligne droite

Il y a également des transferts de charges longitudinaux lors des freinages et des accélérations. En effet, lors d'un freinage, des forces dont le sens est opposé au mouvement sont appliquées au niveau des 4 roues. Au CG, ces forces créent un moment qui tend à faire plonger l'avant et relever l'arrière. Cela occasionne un transfert de charge longitudinal qui charge les pneumatiques avant et soulage l'arrière. Selon le même principe, lorsque le pilote accélère, des forces motrices dans le sens du mouvement sont créés au niveau des pneus arrière. A l'inverse, le moment créé tend à cabrer le véhicule. Le transfert de charges soulage les pneus avant et charge les pneus arrière. Ces transferts de charges sont influencés par la hauteur du CG. Plus il est près du sol, moins les transferts seront importants. Ces différences de charges entre les suspensions avant et arrière peuvent faire varier l'assiette du véhicule d'un certain angle (angle de tangage). Ces variations dynamiques affectent également la cinématique en faisant varier la géométrie des triangles (carrossage, pince...). Il est possible de concevoir une géométrie qui limite l'influence de ces transferts sur la cinématique.



Ces équations sont obtenues en appliquant les principes de la dynamique au véhicule, à partir de celles-ci il est facile de montrer que :

$$N'1 = N1 + M.\gamma.h/(L1 + L2) \text{ et } N'2 = N2 - M.\gamma.h/(L1 + L2)$$

Ce qui permet de voir que le « transfert d'appui <sup>(1)</sup> » dynamique de l'AR vers l'AV vaut  $M.\gamma.h/(L1 + L2)$  et ne dépend que de la décélération et du rapport entre l'altitude du centre de gravité et l'empattement du véhicule.

## Influence de la voie et l'empattement

### *La voie*

La voie est la distance entre les points de contact des roues d'un même train. Elle peut donc être différente entre le train avant et le train arrière, d'ailleurs leur différence est limitée.

La voie arrière doit être plus faible qu'à l'avant afin d'améliorer la motricité (dans le cas d'une propulsion bien évidemment).

Une voie faible à l'avant facilite le travail de la direction mais diminue la capacité à prendre des virages. Il s'agit donc d'un compromis à trouver.

On décide donc de prendre des voies plus petites que pour Dynamix mais qui reste dans la moyenne des autres écuries, soit : Voie avant : 1220mm et Voie arrière : 1150mm

### *L'empattement*

L'empattement est la distance entre le point de contact des roues du train arrière et le point de contact des roues du train avant. Un empattement long favorise la stabilité en ligne droite et diminue le transfert de charge longitudinale.

Au contraire un empattement court favorise la mise en virage du véhicule (réduction du rayon de braquage) et augmente le transfert de charge (ce qui améliore l'accélération). 43

On décide donc de fixer l'empattement à 1550mm soit 25mm de plus que l'empattement minimal imposé par le règlement afin de faciliter le travail de la direction et améliorer la dynamique du véhicule.



## 14.3 Angles de cinématique

### 14.3.1 Angle de carrossage (Camber Angle)

Lorsque le véhicule est vu de l'avant c'est l'angle entre la verticale et le plan de roulement de la roue (voir figure 40). Le carrossage influe sur l'usure des pneus.

De manière générale, le carrossage favorise un comportement survireur du véhicule. En effet, un carrossage négatif génère un effort de poussée transversale orienté vers l'intérieur, opposé à la force centrifuge en virage, ce qui favorise le maintien du pneu sur sa trajectoire. L'adhérence en virage est privilégiée au détriment de l'adhérence en ligne droite. A l'inverse, un carrossage légèrement négatif accroît les performances en ligne droite. On comprend bien l'importance d'avoir un carrossage réglable pour optimiser les performances dans le skidpad et l'épreuve d'accélération.

La plage de réglage qui constitue le cahier des charges pour la conception des triangles est donc  $[-0.5 : -3.7^\circ]$ .

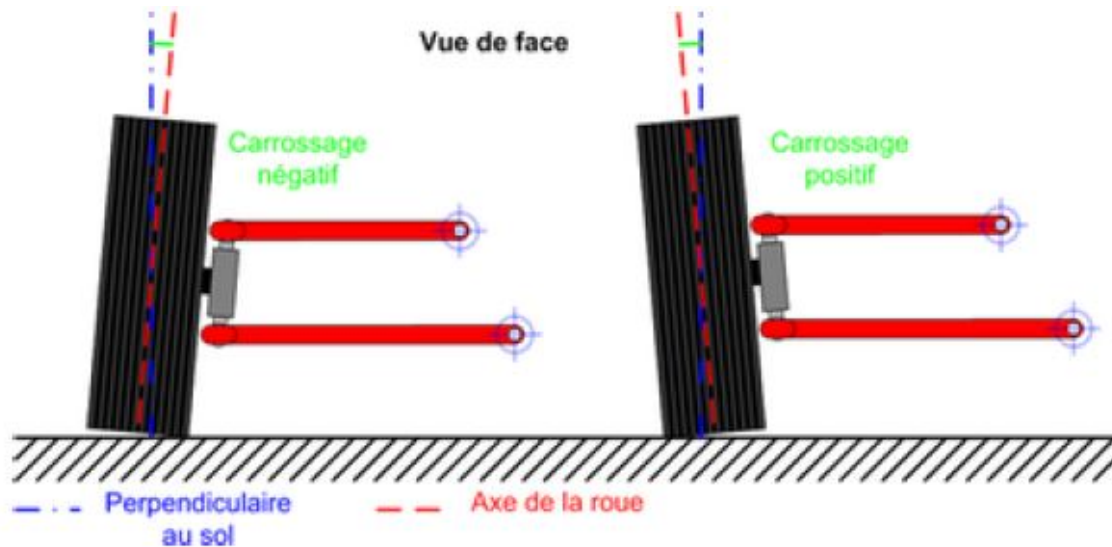


FIGURE 47 – Carrossage

### 14.3.2 Angle de pince (TOE)

L'angle de pince est l'angle entre le plan médian de la roue et l'axe longitudinal du véhicule. Il existe deux configurations possibles :

- **Pincement (Toe in)** : Angle de pince négatif, l'avant des pneus est plus proche du châssis que l'arrière.
- **Ouverture (Toe out)** : Angle de pince positif, l'arrière des pneus est plus proche du châssis que l'avant.

Influence de l'angle de pince :

- **Train avant** : sur une propulsion, du pincement permet d'obtenir une meilleure stabilité en ligne droite, tout en perdant de la réactivité en virage. (Comportement sous-vireur)
- **Train arrière** : de l'ouverture favorise le survirage

La pince est également réglable à l'avant et à l'arrière. La plage est  $[-1^\circ : 1^\circ]$ .

### 14.3.3 Angle de chasse et chasse au sol

L'angle de chasse est défini par la droite passant par les points d'attache des triangles et la verticale lorsque la vue est placée sur le côté de la roue. Cette droite est d'ailleurs l'axe de rotation de la roue. La chasse au sol est la distance projetée sur l'axe du véhicule entre le centre de la roue et l'intersection de cet axe avec le sol. Il ne faut pas confondre la chasse au sol et l'angle de chasse, par

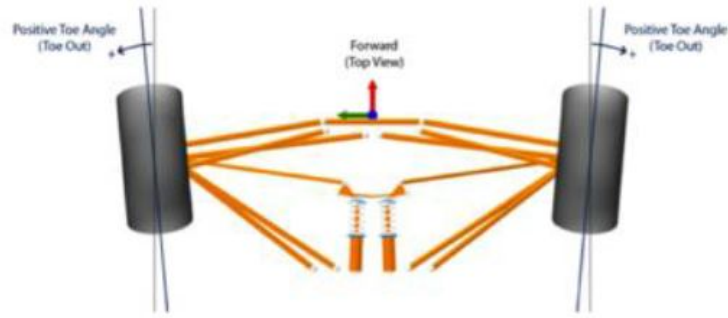


FIGURE 48 – Pince

exemple la roue d'un caddie de supermarché à un angle de chasse nul mais une chasse au sol important.

Influence de l'angle de chasse :

- **Chasse positive** : amélioration de la stabilité en ligne droite en contrepartie, le pilote doit exercer un plus grand effort pour changer de direction. Plus l'angle est important, plus cet effort est important et meilleure est la stabilité en ligne droite. Il y a un fort rappel des roues après un braquage.
- **Chasse négative** : amélioration de la maniabilité (facilité pour changer de direction) au détriment de la stabilité en ligne droite. Il n'y a plus de rappel des roues après braquage.

On choisit donc une chasse positive et on doit faire attention à ce qu'elle ne devienne pas négative en virage. En ce qui concerne la valeur de chasse que l'on veut, elle correspond à une chasse au sol 15mm, cela correspond à un angle de  $3.6^\circ$ .

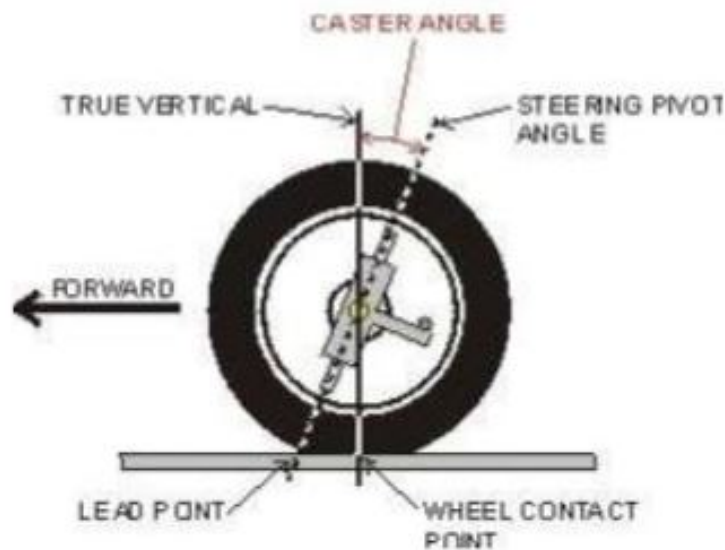


FIGURE 49 – Chasse et angle de chasse

### 14.3.4 Angle de pivot

L'angle de pivot est défini, lorsque le véhicule est vu de face, par l'axe de pivot de la roue et la verticale. Comme pour l'angle précédent c'est le déport dû au pivot qui est important (projection). Influence du déport : Le pivot influe sur la dureté de la direction au volant. Il doit être suffisamment faible pour diminuer les réactions de direction ainsi que la dureté de direction et suffisamment fort pour avoir du rappel de direction ainsi qu'une bonne stabilité en ligne droite. En ce qui concerne la valeur du déport que l'on veut, il correspond à 18mm.

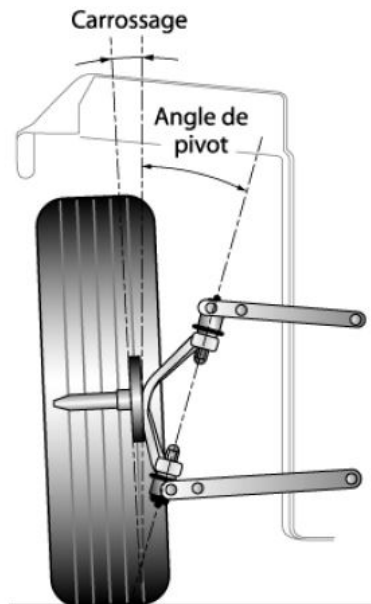


FIGURE 50 – Angle de pivot

A l'aide d'une modélisation 3D sous GeoGebra on peut obtenir l'angle de pivot, le déport, l'angle de chasse et la chasse simplement en rentrant les coordonnées des deux points d'attache du triangle.

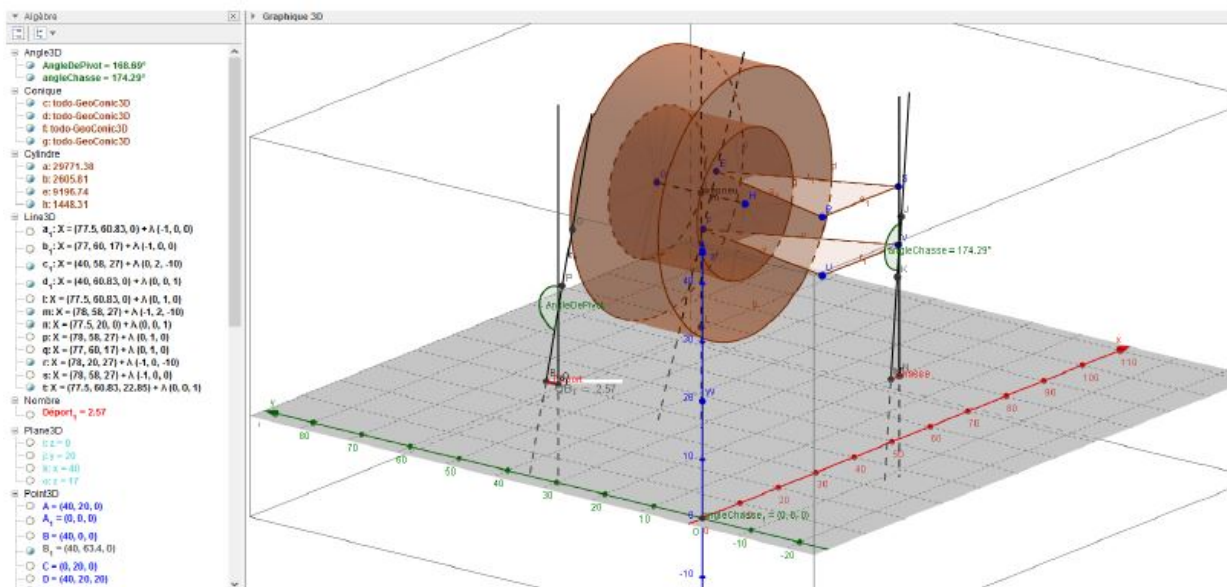


FIGURE 51 – Modélisation 3D sous Geogebra

## 14.4 Porte-moyeu

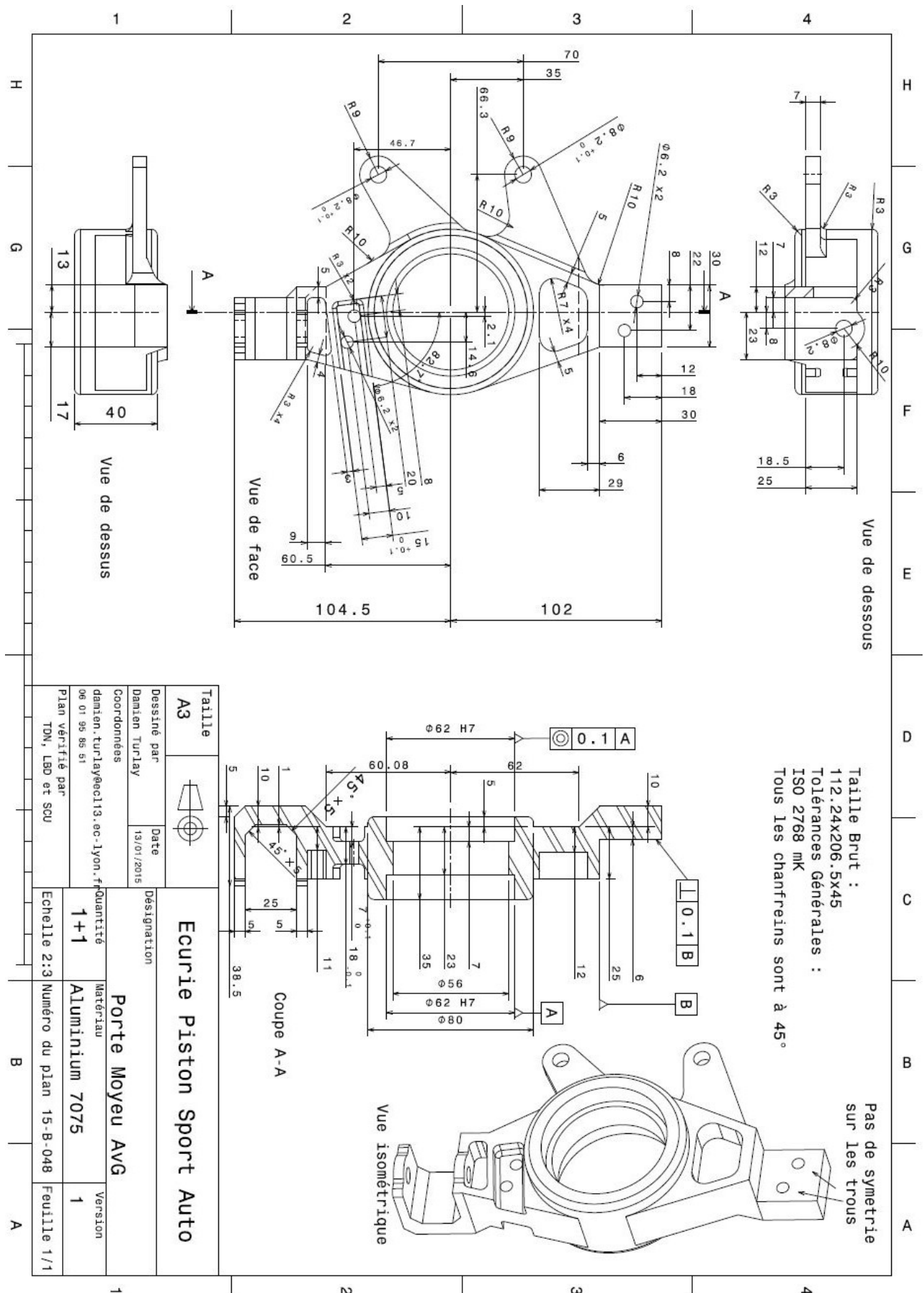


FIGURE 52 – Plan d'un porte-moyeu

## 14.5 Système de freinage

Les annotations suivantes sont définies comme suit :

- $d$  la distance de freinage
- $v$  la vitesse du véhicule avant le début de la phase de freinage
- $m_v$  la masse du véhicule à vide
- $m_p$  la masse du pilote
- $R_r$  le rayon de la roue
- $F_p$  l'effort appliqué par le pilote sur la pédale de frein
- $\alpha$  pour définir le pourcentage du freinage du circuit arrière par rapport à la force totale de la pédale.
- $\mu$  le coefficient de friction entre le disque et la plaquette
- $A_c$  la section en sortie du maître-cylindre
- $A_{p\_av}$  la section du piston du frein avant
- $A_{p\_arr}$  la section du piston du frein arrière
- $N_{av}$  le nombre de pistons par plaquettes dans les freins avant
- $N_{arr}$  le nombre de pistons par plaquettes dans les freins arrière

### Calculs

L'objectif de ces calculs est de dimensionner le système de freinage de notre véhicule.

On cherche en premier lieu la force nécessaire pour freiner arrêter le véhicule sur une certaine distance  $d$  en fonction de sa vitesse. Pour cela on calcule la décélération maximale au freinage. Pour les calculs on a commencé par calculer la force totale de freinage dans les quatre roues. Pour faire cela on calculera  $a_m$  qui est l'accélération maximale pendant le freinage, le calcul sera fait avec la vitesse et la distance du cahier de charge avec cette formule :

$$a_m = \frac{v^2}{2d}$$

La somme des masses du véhicule et du pilote donne la masse totale  $m_t$ .

$$m_t = m_v + m_p$$

On obtient ainsi la force totale  $F_t$  à répartir sur les quatre roues:

$$F_t = a_m m_t$$

Une fois la force totale obtenue on cherche à en déterminer le rayon des disques. Le pilote peut appliquer un effort maximal de 215N sur la pédale ce qui correspond à un effort de 900N de la pédale sur le circuit grâce au bras de levier de la pédale.

Soit  $F_{av}$  la force appliquée au maître-cylindre avant et  $F_{arr}$  la force sur le maître-cylindre arrière :

$$F_{av} = (1 + \alpha) \frac{F_p}{2}$$

$$F_{arr} = (1 - \alpha) \frac{F_p}{2}$$

On peut remonter aux pressions  $P_{av}$  et  $P_{arr}$  pour les pressions dans les circuits avant et arrière respectivement :

$$P_{av} = \frac{4F_{av}}{\pi A_p}$$

$$P_{arr} = \frac{4F_{arr}}{\pi A_p}$$

On calcule ainsi l'effort que chaque étrier applique sur le disque avec  $F_{étr,av}$  et  $F_{étr,arr}$  les efforts dans les étriers avant et arrières.

$$F_{étr,av} = P_{av} N_{av} A_{p,av}$$

$$F_{étr,arr} = P_{arr} N_{arr} A_{p,arr}$$

La force des étriers nous permet de calculer la force de friction sur chaque disque.  $F_{f,av}$  Et  $F_{f,arr}$  pour chacun des différents disques un à l'avant et l'autre à l'arrière.

$$F_{f,av} = \mu F_{étr,av}$$

$$F_{f,arr} = \mu F_{étr,arr}$$

Après tous ces calculs on obtient une équation à deux inconnues, ces deux inconnues sont le rayon effectif de chaque disque. On doit donc fixer la taille d'un des deux disques pour obtenir la taille de l'autre. Comme la contrainte de taille est plus importante dans les disques avant on fixe la taille de ces disques. On obtient ainsi l'équation suivante permettant de déterminer le rayon effectif à l'arrière :

$$R_{eff,arr} = \frac{\frac{F_r R_r}{4} - R_{eff,av} F_{f,av}}{F_{f,arr}}$$

Avec  $R_{eff,av}$  le rayon effectif du disque avant. Une fois les deux rayons connus on peut vérifier avec cette formule si les disques choisis dans le commerce possèdent bien un rayon effectif supérieur ou égal à celui recherché.

$$R_{eff} = \frac{2(R_e^3 - R_i^3)}{3(R_e^2 - R_i^2)}$$

Avec  $R_{eff}$  le rayon effectif du disque choisi,  $R_e$  le rayon du cercle défini par l'extérieur de la plaquette et  $R_i$  le rayon défini pour l'intérieur de la plaquette. En effet seul la surface du disque entre  $R_e$  et  $R_i$  sera en contact avec les plaquettes.

Force homme (N)	150,00
relation	5,60
force après relation(N)	840,00
alpha	-0,20
alpha*2	-0,40
proportion de la force dans le circuit Avant	0,70
proportion de la force dans le circuit arrière	0,30
force maitre-cylindre avant(N)	588,00
force maitre-cylindre arrière(N)	252,00
diamètre de maitre-cylindre(m)	0,012
Pression avant(Pa)	5199061,47
pression arrière(Pa)	2228169,20
Pression avant (bar)	51,99
pression arrière (bar)	22,28
diamètre piston avant(m)	0,03
area piston avant (m <sup>2</sup> )	0,000804
diamètre piston(m)	0,0257
area piston (m <sup>2</sup> )	0,0005187
numéro de pistons par face arrière	1,00
numéro de pistons par face avant	1,00
force étrier avant	4181,33
force étrier arrière	1155,86
nu	0,50
Force total freinage avant	2090,67
Force total freinage arrière	577,93
discs	
rayon avant(m)	0,09650
rayon Intérieur avant(m)	0,07000
rayon effective avant(m)	0,08395
rayon et arrière(m)	0,09500
rayon Int arrière(m)	0,06500
rayon effective arrière(m)	0,08094

Normal avant(N)	351,04
Normal arrière (N)	93,55
Rayon pneu(m)	0,23
Force pneu avant(N)	1535,59
Force pneu arrière(N)	409,24
Force total(n)	3889,65
poids avec pilote (Kg)	290,00
décélération ( $m \cdot s^{-2}$ )	13,41
vitesse ( $ms^{-1}$ )	27,78
distance(m)	28,77
transférée de charge(Kg)	61,75
pourcentage poids avant	0,48
pourcentage poids arrière	0,52
poids avant pendant le freinage(Kg)	196,15
poids arrière pendant le freinage(Kg)	83,85



## 14.6 Système de direction

### 14.6.1 Epure d'Ackermann

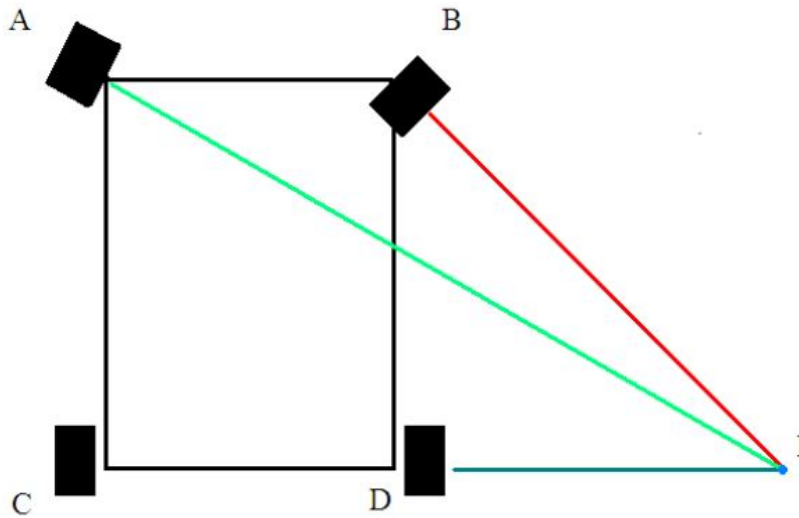


FIGURE 53 – Géométrie d'un véhicule respectant l'épure d'Ackermann en virage

Empattement  $e=AC$ , voie  $a=AB$ ,  $\alpha$  l'angle intérieur  $DIB$  et  $\beta$  l'angle extérieur  $CIA$ .

On a :  $e = DI \tan(\alpha)$  et  $e = (a + DI) \tan(\beta)$ , on obtient :  $e = \left(a + \frac{e}{\tan(\alpha)}\right) \tan(\beta) = \left(\frac{a + e \cot(\alpha)}{\cot(\beta)}\right)$  d'où :

$$\boxed{(\cot(\beta) - \cot(\alpha)) = \frac{a}{e}}$$

### 14.6.2 Modèle 2D Geogebra

Un modèle Geogebra en deux dimensions constitue une très bonne approximation avant de confirmer sur CATIA en jouant sur les contraintes. Il est en effet aisé de modifier les différents paramètres et d'observer de façon claire leurs différentes influences jusqu'à trouver une configuration satisfaisante.

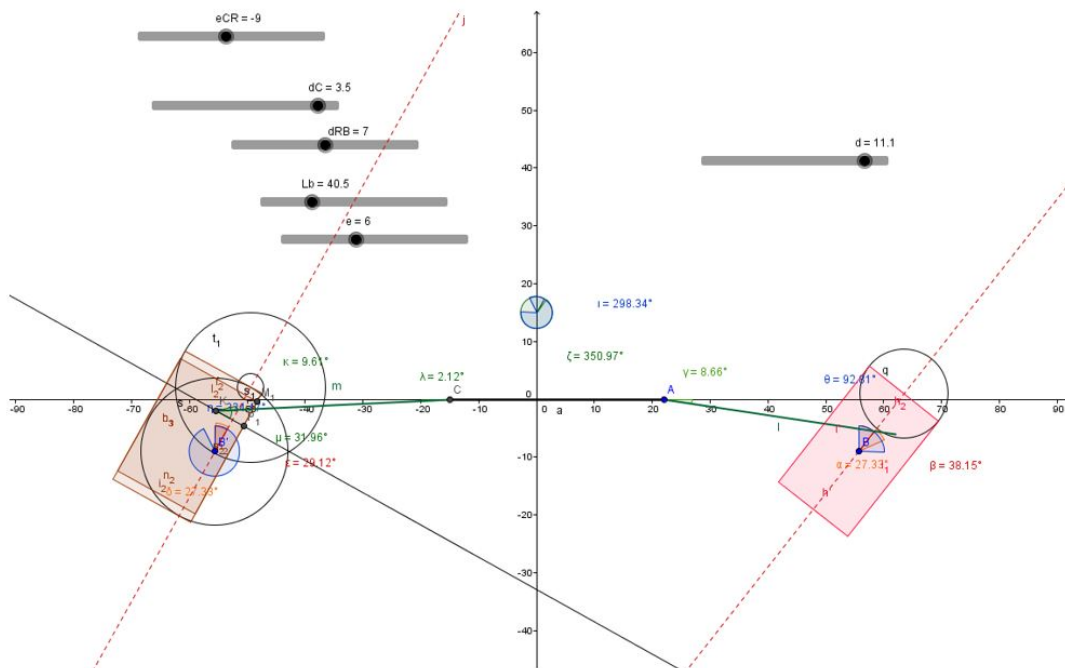


FIGURE 54 – Modèle 2D Geogebra

### 14.6.3 Loi entrée-sortie

Voici la loi entrée sortie de la cinématique de direction :

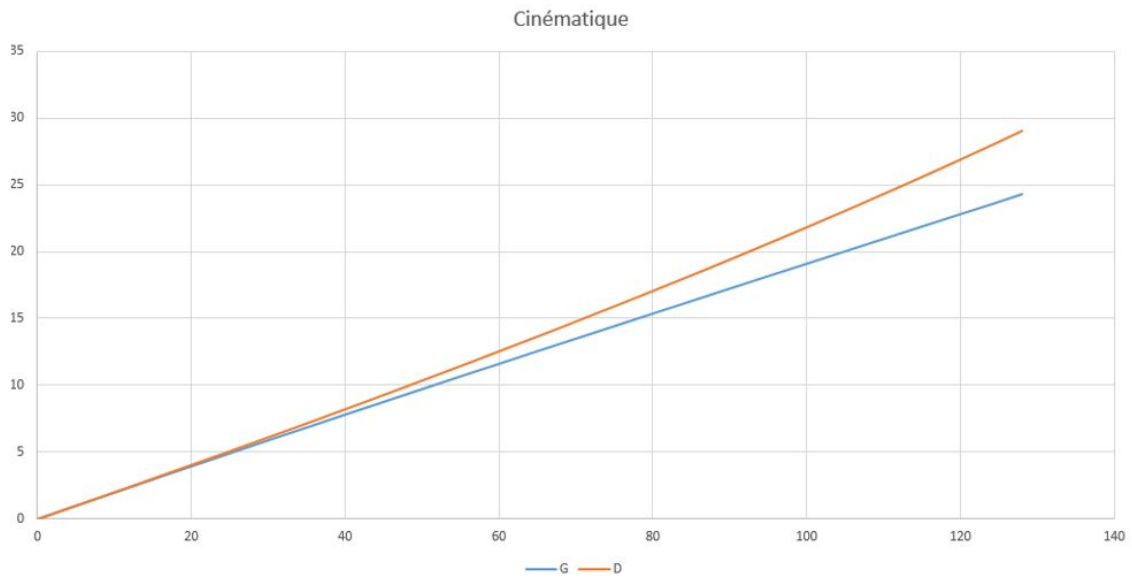


FIGURE 55 – Loi entrée-sortie de la cinématique de direction