



# Projet Intégrateur 4 - Optimisation moteur

## Formule SAE

Préparé pour

M. Marek Balazinski

M. Voytek Karczewski

Par

Charles Daniel Rouleau	1686306
Philippe Deschamps	1626794
Simon Fortin	1680456
Samuel Leblanc	1690738
Daniel Lelièvre	1631158
Jonathan Lemieux	1686791
Olivier Nadeau	1684888
Alexis Paquette	1688051
Peter-Alexander Papadatos	1689974
Benjamin Roy	1686161
Victor Sullivan	1683707
DongQiao Yang	1679714

25 avril 2017

## Résumé

Le projet intégrateur 4 : *optimisation moteur* a comme objectif de maximiser les résultats de la Formule Polytechnique lors de ses compétitions en améliorant les performances de son moteur. Il est mené lors de la session d'automne 2016 et d'hiver 2017 par 12 étudiants en génie mécanique et aérospatial.

La Formule Polytechnique a comme mandat de construire une voiture de course monoplace afin de participer aux compétitions organisées par la Society of Automotive Engineers (SAE). Ces compétitions regroupent plus de 500 universités à travers de monde et comportent différentes épreuves statiques et dynamiques. Le moteur utilisé par la Formule Polytechnique est le Rotax DS450 de Bombardier. Il est utilisé depuis 2013 et a été choisi pour sa fiabilité, la disponibilité de ses pièces et le service après-vente. En 2014-2015, un projet d'optimisation a été mené dans le cadre d'un projet intégrateur 4, mais les résultats n'ont pas été utilisés sur la Formule par manque de validation et d'essais.

L'objectif de ce projet est de continuer le travail entamé en 2014-2015 en vérifiant les hypothèses qui ont été posées et en effectuant des recherches additionnelles pour répondre le mieux possible aux besoins présents de la Formule Polytechnique. Ces besoins consistent à augmenter le couple développé par le moteur et déplacer sa plage de puissance.

L'équipe a choisi deux stratégies pour atteindre ces objectifs : la conception d'une nouvelle entrée d'air et la modification des composantes internes du moteur. Pour l'entrée d'air, un plénum en 3 parties à volume modifiable a été conçu et fabriqué en impression 3D. Ce plénum est caractérisé par un angle de divergent plus petit que sur la Formule 2016 afin de réduire la turbulence à la restriction. De plus, des concepts de branche primaire à longueur variable ont été étudiés pour permettre au moteur d'avoir une plage de puissance plus vaste. Pour les composantes internes, un piston à haute compression (13 :1), un calage de came différent et une tête modifiée ont été testés et caractérisés sur un dynamomètre à eau *Land and Sea*. Des gains de près de 3 hp sur presque l'ensemble de la plage d'opération du moteur ont été mesurés avec la tête modifiée, et le calage des cames a permis de produire plus de couple à haut régime. Les essais sur le plénum à volume variable ont montré qu'un volume de 3L était optimal pour la formule, optimisant la courbe de puissance tout en étant intégrable sur la voiture. Suite à des problèmes de fiabilité et de délai de fabrication, le piston haute compression et la branche primaire de longueur variable n'ont pas pu être testés.

De plus, des études sur un nouveau pot d'échappement furent effectuées afin de réduire le poids du système. Seul le silencieux de BRP répondait aux critères de la formule en termes d'intensité sonore et donc celui-ci est resté le même.

*Mots-clés : Plénum, FSAE, DS450, moteur à combustion interne, dynamomètre*

## Abstract

The objective of this 4<sup>th</sup> year engineering project is to maximize the results of the Polytechnique Montreal's Formula SAE Team during its competitions by improving the performance of its engine. It is conducted during the fall 2016 and winter 2017 sessions by 12 students in mechanical and aerospace engineering.

Formula Polytechnique's mandate is to build a single-seater racing car to compete in competitions organized by the Society of Automotive Engineers (SAE). These competitions bring together more than 500 universities around the world and include various static and dynamic events. The engine used by the *Formule Polytechnique* is the Bombardier Rotax DS450. It has been in use since 2013 and has been chosen for its reliability, availability of parts and after-sales service. In 2014-2015, an optimization project was carried out as part of an integrative project 4 but the results were not used on the Formula due to lack of validation and testing.

The objective of this project is therefore to continue the work started in 2014-2015 by verifying the hypotheses that have been put forward and by carrying out additional research in order to match the current needs of the *Formule Polytechnique*. These requirements consist in increasing the torque developed by the engine and moving its power range.

The team has chosen two strategies to achieve these objectives: the design of a new air intake system and the modification of the internal components of the engine. For the air inlet, a 3-part plenum with variable volume has been designed and manufactured using 3D printing. This plenum is characterized by a smaller diverging angle than on the Formula 2016 to reduce the turbulence at the restriction. In addition, variable length runner concepts have been studied to allow the engine to have a wider power range. For internal components, a high compression piston (13: 1), a different cam setting and a modified engine head were tested and characterized on a *Land and Sea* water dynamometer. Gains of nearly 3 hp over almost the entire operating range of the engine were measured with the modified head and the cam adjustment allowed to produce more torque at high revolutions. Testing on variable plenum show that 3L volume was the optimal configuration for the formula, optimizing between power curve and packaging on the car. Due to reliability issues and fabrication delay, high compression piston and variable length runner have not been tested.

Moreover, studies on exhaust pipe have been done to reduce weight of the system. Only the BRP exhaust meet the sound requirements for the formula, thus the exhaust has not been changed.

*Keywords: Plenum, FSAE, DS450, internal combustion engine, dynamometer*

## Table des matières

Résumé .....	i
Abstract .....	ii
Liste des figures .....	vi
Liste des tableaux .....	viii
Lexique des abréviations .....	ix
Introduction.....	1
Définition des besoins .....	2
Présentation générale.....	2
Analyse des besoins du client .....	2
Augmentation du couple du moteur .....	3
Déplacement des sommets de couple selon le RPM .....	4
Diminution de la masse.....	4
Augmentation de la fiabilité.....	4
Diminution de la consommation d'essence .....	4
Analyse de l'utilisation du moteur en 2016.....	4
Simulations de temps au tour.....	6
Admission d'air .....	10
Analyse fonctionnelle .....	10
Théorie.....	11
Admission d'air.....	11
Plénum .....	12
Branche primaire (runner) .....	13
Méthodologie .....	16
Changer le filtre à air .....	16
Concevoir un nouveau corps papillon .....	17
Modifier le volume et/ou la géométrie du plénum.....	17
Modifier la branche primaire.....	23
Résultats .....	27
Forme du convergent .....	27
Volume du plénum .....	27
Fabrication du plénum final.....	27
Branche primaire .....	29

Sélection de la valve 90° .....	30
Intégration de la valve sur la voiture .....	32
Intégration du concept final sur la voiture .....	34
Échéancier.....	37
Prototypage rapide .....	38
Impressions 3D.....	38
Système d'échappement.....	39
Définition du problème.....	39
Théorie.....	39
Méthodologie de test d'échappement.....	41
Test de son .....	41
Le silencieux original .....	41
Conception d'un nouveau silencieux .....	43
Analyse .....	44
Option 1 : Fabriquer un nouveau silencieux.....	44
Option 2 : Modification du silencieux original.....	44
Option 3 : Achat d'un silencieux sur le marché .....	45
Section composantes internes .....	46
Théorie.....	46
Augmentation de la cylindrée .....	46
Modification de la tête.....	47
Arbre à cames .....	48
Piston haute compression.....	50
Le dynamomètre .....	51
Analyse de risque .....	53
Analyse de criticité.....	53
Risques humains .....	54
Risques financiers .....	54
Risque de non-respect des échéanciers .....	54
Risque environnemental.....	55
Conclusion .....	56
Annexe A : Simulation de l'angle de divergence .....	I
Le modèle .....	I

Le maillage .....	II
Les résultats .....	III
Annexe B : Simulation OptimumLap .....	V
Annexe C : Calculs confirmant le choix de la valve 90° .....	VIII
Annexe D : Dessins techniques de pièces découpées au laser .....	IX

## Liste des figures

Figure 1 : Utilisation du moteur à l'endurance de Barrie 2016 .....	5
Figure 2 : Temps passé à plus de 70% TPS selon le régime.....	5
Figure 3 : couple et puissance du moteur de la Formule 2016 .....	6
Figure 4 : configuration initiale du moteur .....	7
Figure 5 : Configuration optimale de la courbe de couple .....	8
Figure 6 : Temps par tour selon l'augmentation de puissance .....	9
Figure 7 : Assemblage actuel de l'admission d'air de la formule .....	12
Figure 8 : Plénum d'une FSAE.....	13
Figure 9 : Propagation du son .....	14
Figure 10 : Résonateur de Helmholtz.....	15
Figure 11 : Tube changeant de section et calcul de réflexion d'onde.....	16
Figure 12 : Distribution de pression pour le divergent de 4° .....	18
Figure 13 : Distribution de pression pour le divergent de 6° .....	19
Figure 14 : Distribution de pression pour le divergent de 8,58° .....	19
Figure 15 : Couple en fonction du régime pour différents volumes de plénum .....	19
Figure 16 : Solution proposée .....	21
Figure 17 : Nouveau concept de convergent .....	21
Figure 18 : Calculs de réflexion d'onde .....	22
Figure 19 : Branche primaire variable - Solution 1.....	23
Figure 20 : Branche primaire variable - Solution 2.....	24
Figure 21 : Branche primaire variable - Solution 3.....	24
Figure 22 : Branche primaire variable - Solution 4.....	25
Figure 23 : Branche primaire variable - Solution 5.....	25
Figure 24 : Matrice de Pugh utilisée pour la branche primaire variable.....	26
Figure 25 : Forme du convergent optimal.....	27
Figure 26 : Illustration plénum final .....	28
Figure 27 : Exemple de tube d'admission à longueur variable .....	29
Figure 28 : Valve 90° et servovalve sélectionnée pour le système d'admission d'air.....	32
Figure 29 : Schéma de montage de la valve rotative .....	33
Figure 30 : Enveloppe de la Formule, vue de côté .....	35
Figure 31 : Enveloppe de la Formule, vue de derrière .....	35
Figure 32 : Installation du plénum final sur la voiture, vue de côté.....	36
Figure 33 : Installation du plénum final sur la voiture, vue de derrière.....	37
Figure 34 : Imprimante 3D.....	38
Figure 35 : Pièces imprimées 3D .....	38
Figure 36 : Design du silencieux original .....	42
Figure 37 : Design du nouveau silencieux .....	43
Figure 38 : Image représentant l'alésage «bore» d'un cylindre.....	46
Figure 39 : Illustration du cycle des arbres à cames.....	48
Figure 40 : Position des soupapes .....	49

Figure 41 : cycle thermodynamique Otto .....	50
Figure 42 : Fonctionnement du dynamomètre à eau .....	51
Figure 43 : Comparaison du couple et de la puissance du moteur entre le plénum 3L du PI4 2017 et le plénum de 2016.....	57
Figure 44 : Comparaison du couple et de la puissance du moteur entre le plénum 3L du PI4 2017 et le plénum du PI4 de 2015.....	57
Figure 45 : Résumé des calculs du débit d'un écoulement étouffé .....	I
Figure 46 : Conditions limites pour le modèle de simulation.....	II
Figure 47 : Maillage de la simulation.....	III
Figure 48 : Distribution de vitesse pour les trois angles .....	IV
Figure 49 : Distribution de pression pour les trois angles.....	IV
Figure 50 : Configuration Pyramide.....	V
Figure 51 : Configuration plat.....	V
Figure 52 : Configuration Plateau à 7500-9500.....	VI
Figure 53 : Configuration Plateau à 7000-9000.....	VI
Figure 54 : Configuration à 8000-10000.....	VI
Figure 55 : Configuration Plateau à 8000-9500.....	VII
Figure 56 : Configuration minimum à 28.....	VII
Figure 57 : Dessin technique « Intake fixation 1 » .....	IX
Figure 58 : Dessin technique « Intake fixation 2 » .....	X
Figure 59 : Dessin technique « Intake lord mount bracket » .....	X
Figure 60 : Dessin technique « Runner lord mount bracket » .....	XI



## Liste des tableaux

Tableau 1 : Pointage accordé à chacune des épreuves dynamiques .....	2
Tableau 2 : Corrélations entre les besoins de l'équipe de la Formule et ceux du projet 4.....	3
Tableau 3 : Temps par tour selon la configuration du moteur .....	8
Tableau 4 : Analyse de la faisabilité de différentes solutions selon des fonctions établies.....	10
Tableau 5 : Perte de pression en fonction de l'angle .....	19
Tableau 6 : Paramètres à considérer pour la sélection de la valve 90°.....	31
Tableau 7 : Échéancier prévu pour la session H2017 .....	37
Tableau 8 : Contraintes du silencieux.....	39
Tableau 10 : Caractéristiques du silencieux original .....	43
Tableau 11 : Paramètres du nouveau design .....	44
Tableau 12 : Évaluation des silencieux.....	45

## Lexique des abréviations

**FSAE** : Formula Society of Automotive Engineering

**Formule** : Représente l'ensemble de l'équipe de la société technique de la Formule Polytechnique de Montréal

**TPS** : Throttle position sensor : capteur d'ouverture de la valve papillon

**ECU** : Engine control Unit : Ordinateur contrôlant les paramètres du moteur

**RPM** : Rotation par minute

**PI4** : Projet intégrateur IV

## Introduction

Le projet qui sera décrit dans le présent rapport a été effectué en étroite collaboration avec l'équipe de la formule SAE de la Polytechnique Montréal. La Formule Polytechnique est le client pour lequel le projet a été réalisé et donc le tout s'est effectué dans l'optique de satisfaire leurs besoins.

La formule SAE est un projet étudiant qui, par sa réalisation, permet la mise en pratique des concepts théoriques reliés à l'ingénierie. Les étudiants impliqués dans ce projet doivent concevoir de A à Z une petite voiture de course monoplace et à combustion qui est un semblant de formule 1 à échelle réduite. En plus de la conception, ils doivent fabriquer la voiture et tester sa fiabilité avant de l'utiliser en compétition pour diverses épreuves. Ces épreuves sont variées et touchent autant aux concepts théoriques mis de l'avant lors de la conception qu'à la mesure des performances de voitures et de son pilote.

Pour aider les membres de la formule SAE de la Polytechnique, l'équipe qui a réalisé le présent projet doit leur fournir une documentation détaillée et s'assurer de maximiser les performances de la voiture. Bref, l'objectif ultime est d'assurer un maximum de points à l'équipe lors des compétitions qui se dérouleront au cours de l'été 2017. Pour se faire, l'analyse et l'optimisation du moteur de la formule SAE seront réalisées et décrites dans ce rapport.

Le rapport sera divisé en 4 sections principales. Celles-ci sont la définition des besoins, l'admission d'air, le système d'échappement et les composantes internes. Comme expliquée plus en détail dans le rapport, la section « Admission d'air » a mis l'accent sur la conception d'un plénum à volume optimal en testant différents volumes à l'aide d'un plénum expérimental à volume variable. Ensuite, dans la section « Système d'échappement » les objectifs visant l'optimisation du système d'échappement et les différentes contraintes auxquelles l'équipe a dû faire face seront présentés. Finalement, pour la section « Composantes internes », une présentation des différentes solutions sur lesquels l'équipe a travaillé sera faite. La validation des concepts initiaux à l'aide d'un dynamomètre sera détaillée dans le rapport des essais expérimentaux. De plus, une analyse des risques a été réalisée afin d'exposer les risques (autant humain, qu'environnemental, financier et non-respect des échéanciers) qui sont reliés à la réalisation de ce projet.

Chacune des sections présentera la théorie reliée à la solution concernée, s'en suivra une explication de la méthodologie utilisée et finalement un court résumé des résultats obtenu. Afin de concentrer l'information sur la théorie et les résultats principaux, les essais expérimentaux seront présentés et expliqués en détail dans le rapport "essais expérimentaux". Celui-ci servira d'accompagnement à ce rapport et pourra être consulté si le lecteur veut davantage d'informations concernant la méthodologie des tests effectués.

## Définition des besoins

### Présentation générale

Tout d'abord, le client dans le cadre de ce projet est la Formule Polytechnique de Montréal, il s'agit d'une société technique ayant pour but d'effectuer la conception et la fabrication d'une voiture monoplace de performance. Plus spécifiquement, l'équipe de la Formule utilise un moteur à combustion dans sa voiture et les performances de celui-ci sont très importantes pour lui permettre d'obtenir de bons résultats en compétition.

Au niveau des compétitions, les pointages sont accordés sous deux grandes catégories, soit les épreuves statiques et les épreuves dynamiques. Dans le cadre de ce projet, ce sont particulièrement les épreuves dynamiques où le moteur est utilisé qui nous intéressent. Il est cependant à noter que la documentation fournie par l'équipe aidera beaucoup la formule dans ses épreuves statiques. Ce sont donc ces besoins précis qui seront mentionnés et analysés dans la prochaine section.

### Analyse des besoins du client

Il est tout d'abord important de connaître le pointage associé à chaque épreuve, nous permettant d'orienter nos efforts vers des modifications sur le moteur qui engendreront le gain de points le plus considérable. Il ne faut surtout pas oublier qu'au final, l'objectif est que l'équipe puisse réussir à obtenir un maximum de points en compétitions.

*Tableau 1 : Pointage accordé à chacune des épreuves dynamiques*

Accélération	100 pts
Skid-Pad	75 pts
Autocross	125 pts
Efficiency	100 pts
Endurance	275 pts
Total	675 pts

Connaissant les besoins du client, nous avons ensuite établi les besoins du projet en tant que tel. Les corrélations entre ces besoins ont été effectuées et les pointages des épreuves dynamiques ont servi à titre de pondération. On retrouve le résultat de cette démarche dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2 : Corrélations entre les besoins de l'équipe de la Formule et ceux du projet 4

	Besoins du PI4	Augmentation du couple	Déplacements des sommets de couple selon le RPM	Diminution de la masse	Augmentation de la fiabilité	Diminution de la consommation d'essence
Besoins du client	Pondération					
Accélération	100	3	2	3	0	0
Endurance	275	1	2	0	3	1
Maniabilité de la voiture	200	1	2	2	1	0
Économie d'essence	100	0	1	3	0	3
TOTAL		775	1250	1100	1025	575

Voici le détail des corrélations utilisées dans le tableau ci-dessus :

- Corrélation élevée : 3
- Corrélation moyenne : 2
- Corrélation faible : 1
- Corrélation nulle : 0

L'analyse des besoins des deux équipes était nécessaire afin de cibler les besoins réels de notre client. Ainsi, l'équipe de PI4 a été en mesure de générer ses propres besoins dans le cadre de ce projet en considérant les requis du client. Dorénavant, on peut se concentrer sur ces besoins et tenter d'atteindre chacun d'eux. Voici une brève description des besoins retenus par l'équipe de PI4 :

#### Augmentation du couple du moteur

Sachant que l'accélération est proportionnelle au couple du moteur, l'équipe considère qu'il s'agit d'un facteur clé pouvant augmenter les performances de la voiture dans les compétitions comme l'épreuve d'accélération. De plus, l'augmentation du couple peut s'avérer très utile dans différentes manœuvres lors de la course sur circuit fermé (endurance).

### Déplacement des sommets de couple selon le RPM

Bien qu'il soit important d'optimiser le couple du moteur, un autre des besoins est que l'atteinte de cette valeur maximale de couple se produise au RPM désiré, donc dans une plage où il pourra être utilisé par le pilote. Pour ce faire, l'équipe considère modifier le système d'admission d'air afin de déplacer les sommets aux endroits optimaux.

### Diminution de la masse

Comme toute voiture de course, il est évident que la masse est un facteur clé. En effet, la diminution de la masse a un lien direct sur différentes performances comme le couple et la consommation d'essence. Ainsi, chaque modification sera analysée de manière à minimiser le plus possible ce paramètre.

### Augmentation de la fiabilité

Dans le même ordre d'idées que la masse, la fiabilité est un paramètre qui est constamment recherché sur une voiture de course. De plus, ce besoin est d'autant plus important considérant que lors des compétitions, le moindre bris empêche immédiatement l'équipe de terminer l'épreuve dynamique en question, ce qui implique une perte de points importante.

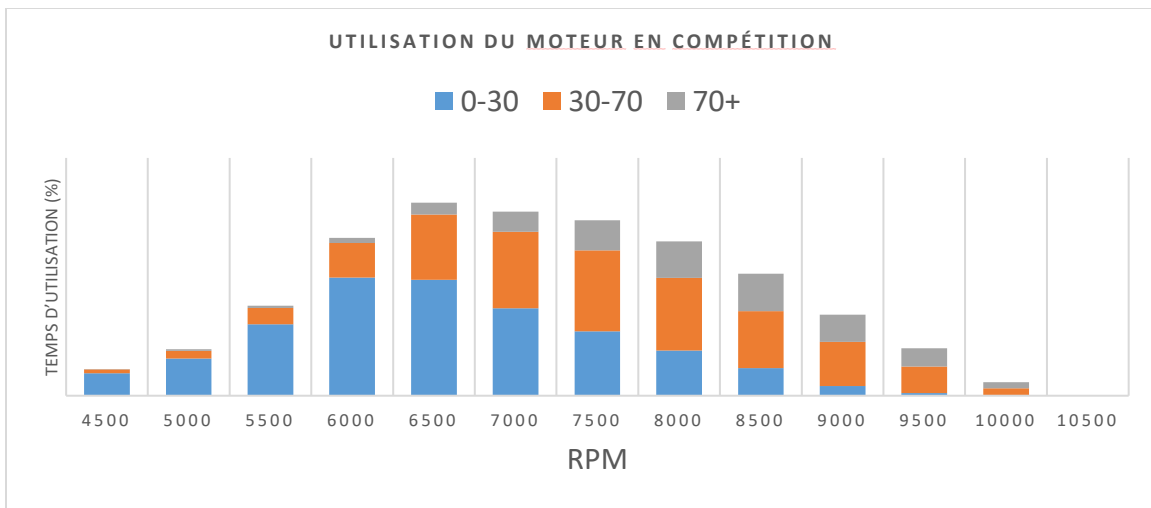
### Diminution de la consommation d'essence

La consommation d'essence est également un paramètre important au sein de tous les moteurs à combustion, souvent par souci d'économies. Dans notre cas, une faible consommation d'essence permet d'obtenir des points directs en compétition. Ainsi, il s'agit de besoin essentiel dans l'optique où l'équipe doit établir le meilleur compromis entre la performance et la consommation d'essence.

### Analyse de l'utilisation du moteur en 2016

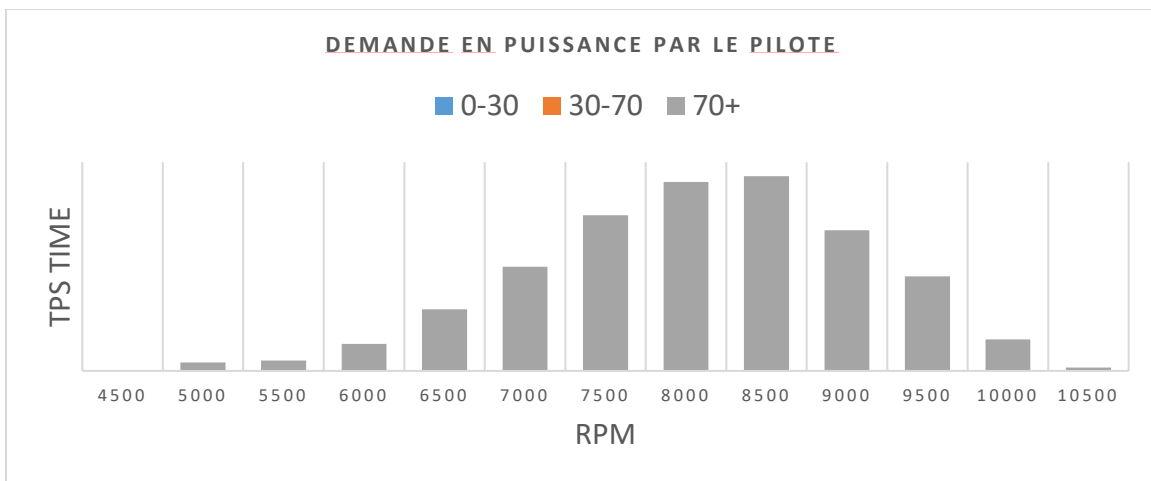
En analysant les données recueillies sur le système d'acquisition de données du véhicule 2016, il est possible de ressortir l'utilisation du moteur lors d'une épreuve d'endurance. L'objectif de cette analyse est d'identifier quels régimes sont utilisés par le pilote et où ce dernier a besoin de puissance. Il est important de noter qu'en 2016, les pilotes ont été entraînés pour rester toujours au plus haut régime possible. La Figure 1 montre l'utilisation du moteur lors de l'endurance de Barrie en 2016.

Figure 1 : Utilisation du moteur à l'endurance de Barrie 2016



De ce graphique, il est possible de voir que l'utilisation se fait majoritairement entre 6000 et 8500 rpm. Les différentes couleurs représentent la position de la pédale de gaz (TPS), la zone en gris est celle qui nous intéresse puisqu'elle représente lorsque la pédale est enfoncée à plus de 70%, soit lorsque le pilote demande de la puissance. Le graphique suivant présente la distribution du temps passé à plus de 70% TPS.

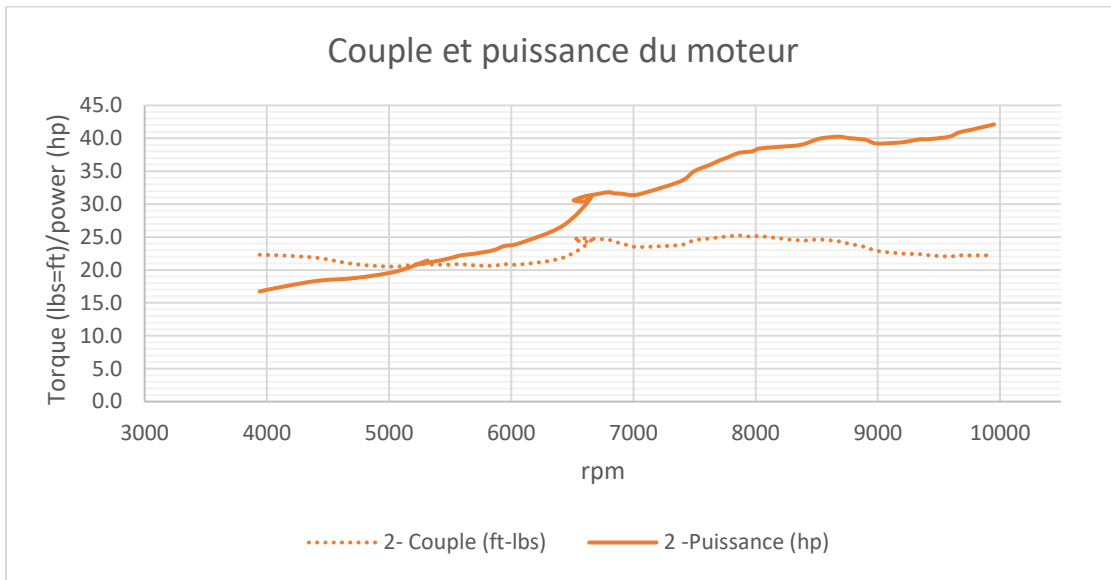
Figure 2 : Temps passé à plus de 70% TPS selon le régime



La demande en puissance suit donc une distribution normale avec un sommet à environ 8000 rpm, le moteur de la formule devrait donc délivrer son maximum de puissance à ce régime.

Toutefois, en analysant les données du moteur 2016 (Figure 3), il est possible d'observer que sa courbe de couple et de puissance ne correspond pas du tout aux demandes du pilote puisque le maximum de puissance est développé à 10 000 rpm, plage de régime très peu utilisée lors d'une compétition.

Figure 3 : couple et puissance du moteur de la Formule 2016



### Simulations de temps au tour

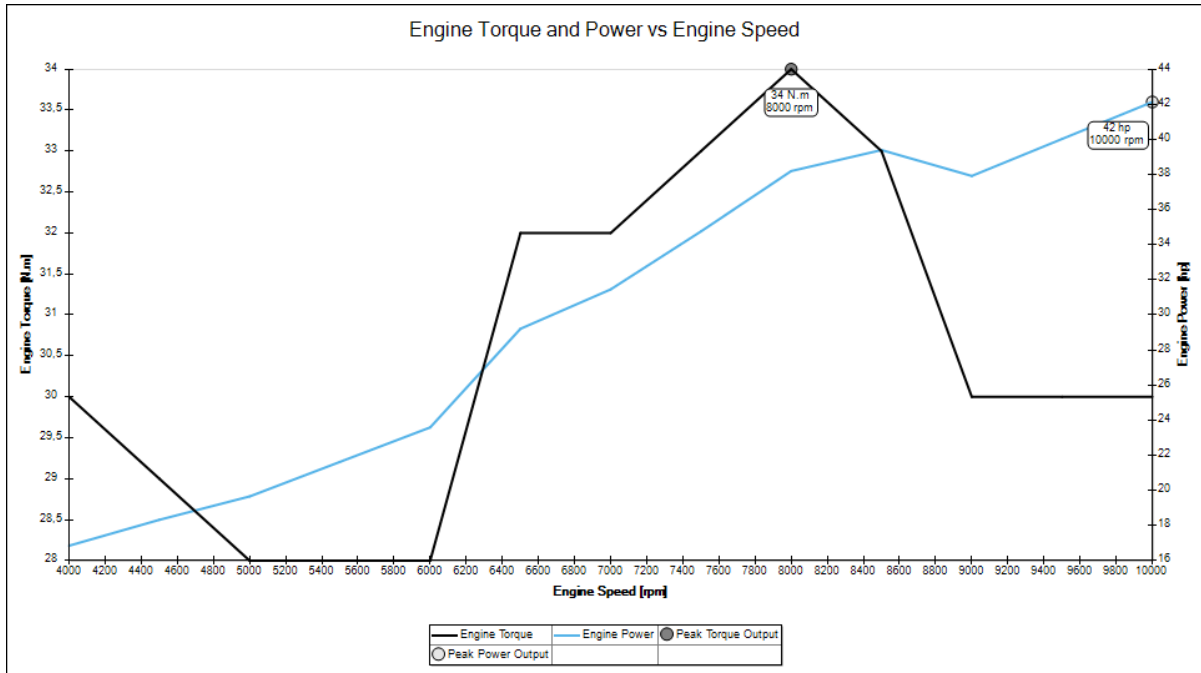
Afin de déterminer la courbe de couple idéale d'un moteur, différentes simulations de temps au tour ont été effectuées. Celles-ci permettent à l'équipe de faire un choix éclairé sur le régime où il faudrait que le moteur produise un maximum de couple.

Les simulations ont été effectuées avec le logiciel Optimum Lap. Les simulations sont faites en modifiant le couple du moteur à différent RPM et le but des simulations est d'obtenir le meilleur temps au tour, en gardant les données de couple dans une plage réaliste pour notre moteur. La plage de couple jugée réaliste est de 26 à 34 Nm. Dans un second temps, une analyse sur l'augmentation de la puissance du moteur a été effectuée afin de déterminer jusqu'à quel point un gain de puissance est bénéfique.

Afin d'optimiser la courbe du moteur, différentes configurations ont été testées. La Figure 4 présente la configuration initiale de la courbe de couple et de puissance en septembre 2016. On remarque que le couple diminue entre 5000 et 6000 rpm. De plus, il n'est pas constant entre 7000 et 9000 rpm, régime le plus utilisé dans les courses de la formule.



Figure 4 : configuration initiale du moteur



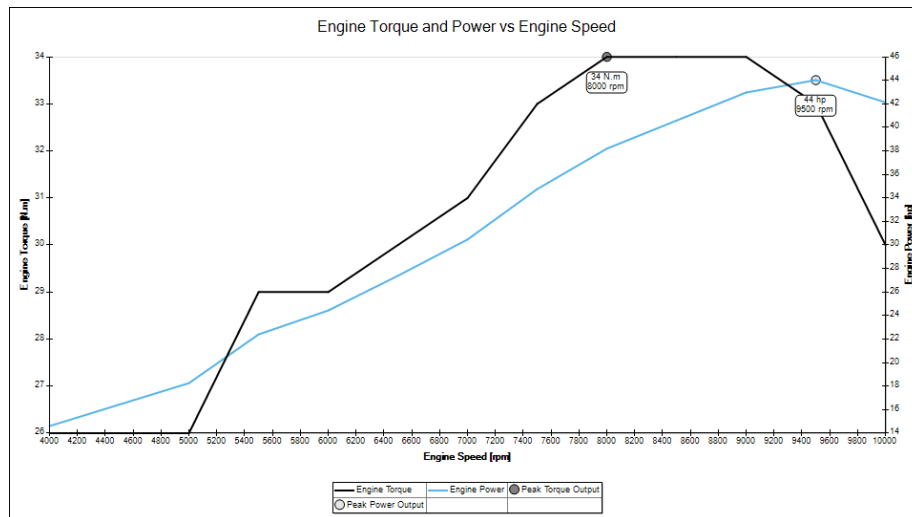
L'optimisation de la courbe de couple a été modifiée en conservant la même aire sous la courbe de couple. Le tableau 3 résume les différentes configurations testées dans les simulations avec leur temps respectif.

Tableau 3 : Temps par tour selon la configuration du moteur

configuration	temps
initial	59,68
croissant	59,68
pyramide	59,66
plat	59,86
plateau à 7500-9500	59,62
plateau à 7000-9000	59,66
plateau à 8000-10000	59,6
plateau à 8000-9500	59,59
meilleur temps	59,55

Le meilleur temps lors des simulations est de 59,55s. Cette configuration correspond à un plateau de couple entre 8000 et 9000 rpm, avec un couple moins grand en bas régime. La Figure 5 présente la forme de cette configuration.

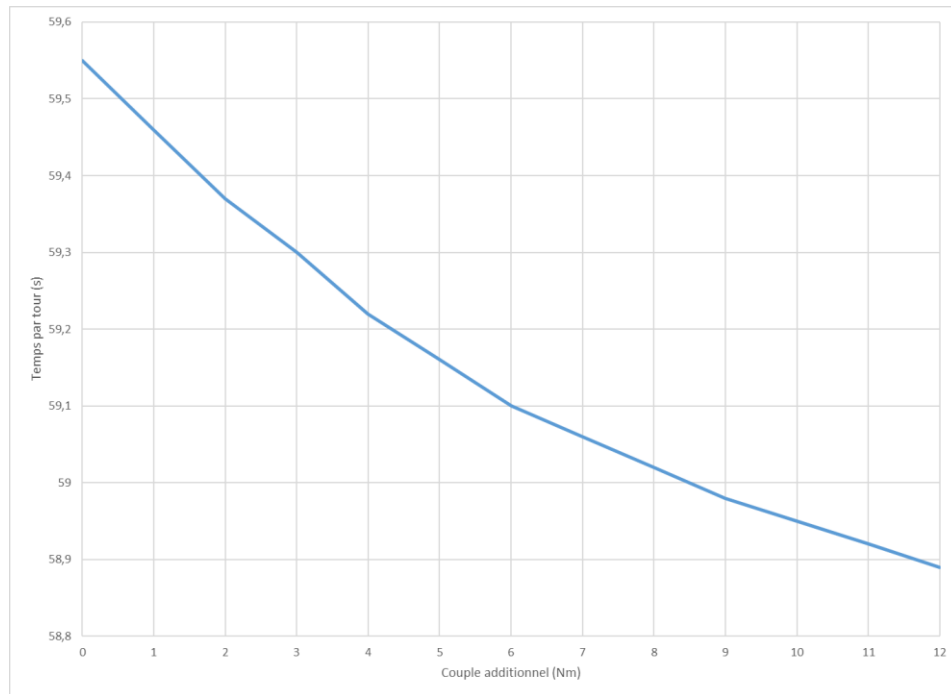
Figure 5 : Configuration optimale de la courbe de couple



On remarque aussi, dans le Tableau 3 que la majorité des configurations ont peu d'influence sur le temps par tour, la plupart se situant dans un intervalle de 1 dixième de seconde. Il est possible de conclure qu'un pilote parfait pourra toujours exploiter la courbe de puissance qui lui est donnée, il faut donc optimiser la courbe afin de faciliter le travail du pilote.

Les simulations d'augmentation de puissance ont été faites avec la courbe optimale de couple. La courbe est graduellement déplacée vers le haut, par bond de 1 Nm sur toute la plage du moteur. La Figure 6 présente les résultats du temps par tour des simulations d'augmentation de puissance.

*Figure 6 : Temps par tour selon l'augmentation de puissance*



On remarque qu'après un ajout de 6 Nm de couple, continuer à augmenter la puissance augmente de moins en moins les gains de temps au tour. Le rapport gain/coûts sera alors moins avantageux.

En conclusion, afin de maximiser le ratio gain/ressources, l'équipe devrait tenter de positionner le maximum de couple entre 8000 et 9000 rpm et augmenter l'ensemble de la plage par 6Nm. Les sections suivantes présentent comment il sera possible d'atteindre ces objectifs avec différentes modifications.

## Admission d'air

De la famille de composantes externe, c'est l'admission d'air qui aura le plus d'effet sur la combustion et le couple développé par un moteur. En effet, la quantité d'air qui peut rentrer dans le moteur est le facteur limitant, surtout lorsqu'il y a présence d'une restriction, comme en Formule SAE. Nous commencerons tout d'abord par expliquer la théorie englobant ces composantes pour en faire ressortir les améliorations possibles. Par la suite, nous construirons une matrice de décision concernant les modifications possibles. Finalement, nous présenterons, pour les modifications choisies, la méthodologie qui nous amènera à la solution retenue.

## Analyse fonctionnelle

Au niveau des différentes fonctions et solutions envisageables, il est important de mentionner que l'équipe a repris celles utilisées lors du PI4 Optimisation Moteur de 2014-2015 et des modifications ont été effectuées afin de conserver uniquement les points qui selon nous étaient pertinents.

En effet, il n'aurait pas été logique de recommencer la définition complète des fonctions et des solutions possibles alors qu'une autre équipe avait fait un travail similaire 2 ans plus tôt. Ainsi, leur tableau a été repris en ajustant ou en éliminant d'abord les solutions qu'ils ont testées et ensuite rejeter les solutions dont nous étions certains qu'elles étaient non réalisables. Finalement, des solutions supplémentaires ont été ajoutées suite au remue-méninge effectué en équipe. Le tableau à la page suivante présente les fonctions qui ont été conservées et les différentes solutions possibles qui ont été pensées ou conservées de l'ancien PI4. Finalement, pour chaque solution, une décision d'équipe a été prise à savoir si celle-ci était conservée dans le cadre de notre projet ou rejetée. Une brève explication supporte chacune des décisions prises.

*Tableau 4 : Analyse de la faisabilité de différentes solutions selon des fonctions établies*

Fonctions	Solutions possibles	Décision	Explication(s)
Alimenter le moteur en air et en carburant	1. Changer le filtre à air (augmenter sa surface de contact avec l'air)	Conservée	À tester
	2. Concevoir un nouveau corps papillon (↘ masse, ↘ restriction en air)	Conservé	À analyser
	3. Modifier le volume et/ou la géométrie du Plénum	Conservée	À analyser
	4. Modifier la branche primaire (longueur, diamètre et géométrie)	Conservée	À analyser

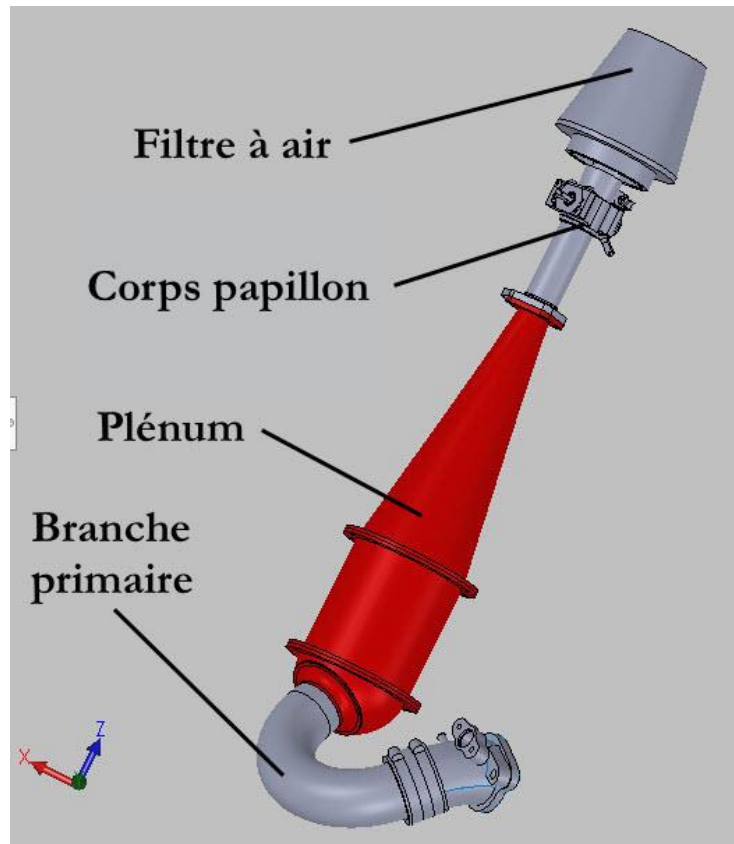
	5. Changer les soupapes/ ressorts / sièges	Rejetée	Le coût des valves (soupapes) en titane est trop élevé
	6. Ajustement des soupapes	Rejetée	Ajustement se fait régulièrement par l'équipe de la Formule
	7. Changer la linéarité de l'ouverture de la valve papillon	Rejetée	Cette option n'apporte aucun gain en puissance
	8. Plénum variable	Rejetée	Le temps de design et de fabrication serait beaucoup trop long dans le cadre d'un PI4. Beaucoup de tests à faire.

## Théorie

### Admission d'air

Comme mentionné plus tôt, l'admission d'air est possiblement la partie externe la plus importante de la voiture. En effet, sans comburant, il est impossible de créer une explosion à l'intérieur du moteur, mais encore plus, les véhicules de la FSAE sont soumis à une règle spéciale concernant l'admission des gaz : tout l'air acheminé doit passer par une restriction de 20mm de diamètre (règle IC1.6). C'est donc pourquoi il est important de bien faire la conception de chacune des composantes de l'admission d'air. En général, un « *intake* » complet ressemble à ce qui est présenté à la figure 7. Cette image représente le système utilisé en 2015 ainsi qu'en 2016.

Figure 7 : Assemblage actuel de l'admission d'air de la formule



On remarque principalement quatre composantes : le filtre à air, le corps papillon, le plénum et la branche primaire. Le **filtre à air** est une pièce, généralement en mousse, qui empêche les impuretés d'entrer dans le système d'admission. Il doit donc avoir une certaine densité sans pour autant affecter de façon considérable la quantité d'air qui entre dans le système. Le **corps papillon** est la composante qui dicte la quantité d'air qui est admise au système via une valve papillon reliée à la pédale d'accélération. C'est aussi dans cette pièce que l'on atteint la restriction de 20mm. Pour les deux autres pièces (le plénum et la branche primaire), une section de théorie leur est désignée plus bas puisqu'ils sont plus complexes.

#### Plénum

Le plénum est une composante importante des voitures de la FSAE. C'est la restriction (règle IC1.6) qui rend cette pièce aussi cruciale. Elle permet d'avoir en permanence une réserve d'air pour le moteur (à la plus haute pression possible). Sans cette composante, tout l'air aspiré à chaque cycle devrait passer par la restriction et le moteur manquerait d'air. La Figure 8 présente l'allure générale d'un plénum en série pour un moteur monocylindre de la FSAE. Il présente deux parties distinctes, le diffuseur et le convergent. Le diffuseur est la partie majeure du plénum. Il repose sur le principe de Bernoulli, c'est-à-dire que lorsque la vitesse du fluide diminue, sa pression augmente. Un bon design permet donc de récupérer le maximum de pression pour le moteur. Par contre, un mauvais design peut créer de la turbulence dans le plénum ce qui résulte en une baisse

des performances. Le convergent permet quant à lui d'acheminer le fluide vers le moteur lorsque ce dernier en demande.

Selon notre documentation, trois facteurs peuvent avoir un impact considérable sur les performances. Le volume total du plénum, l'angle de divergence du diffuseur ( $\theta$  sur la Figure 8) et les changements de section brusques.

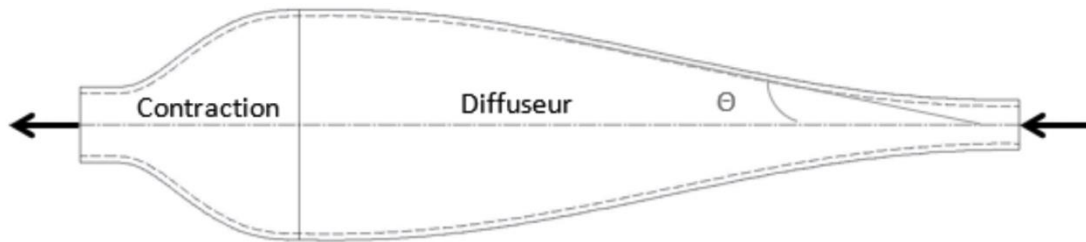


Figure 8 : Plénum d'une FSAE

#### Branche primaire (runner)

Comme il a été expliqué dans le rapport précédent (2014), la branche primaire est le tube qui fait la jonction entre le plénum et les ports d'entrée du cylindre. La longueur de cette portion est importante, car elle impacte directement la dynamique du moteur, plus précisément, la plage de puissance. Le phénomène qui entre en jeu à ce niveau est la propagation des fronts d'onde. Ceux-ci peuvent être provoqués par quelconques perturbations et elles se déplacent à la vitesse du son " $c$ ".

$$c = \sqrt{\gamma RT}$$

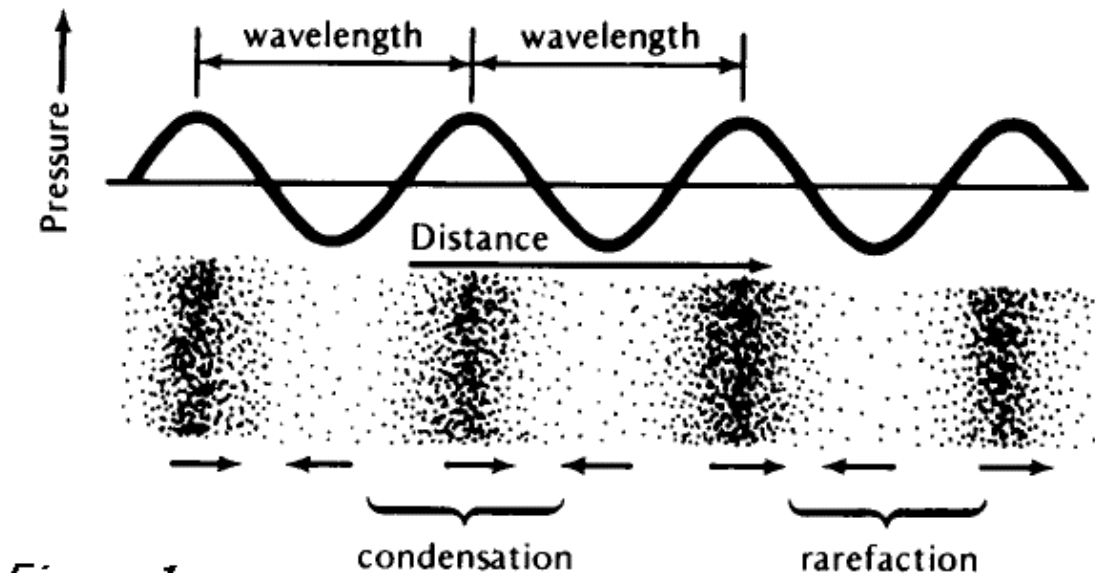
$$\gamma = C_p/C_v = \text{ratio des chaleur massique}$$

$$R = 8,314 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa} \cdot \text{mol}^{(-1)} \cdot \text{K}^{(-1)} = \text{Constante des gaz parfaits}$$

$$T = \text{température en Kelvin}$$

Cette propagation d'onde se traduit par une surconcentration et raréfaction de l'air en certains points comme l'illustre la figure suivante :

Figure 9 : Propagation du son



Contrairement à l'image précédente, dans le cas d'un moteur, les ondes ne se succèdent pas. Ce sont plutôt des ondes qui voyagent seules. Ces fronts d'onde surviennent dans la branche primaire de plusieurs façons. Ils peuvent être induits par l'ouverture ou la fermeture des soupapes et la descente ou la montée du piston.

Du moment que l'on sait que le moteur a besoin d'une grande quantité d'oxygène pour avoir de meilleures performances, on peut en déduire qu'il est plus avantageux d'avoir une plus grande quantité d'air qui entre dans le moteur. Ainsi, il est important de tirer avantage des points de surconcentration d'air en les faisant entrer dans le cylindre. On doit donc faire en sorte que l'onde de surconcentration arrive au cylindre exactement au moment de l'ouverture des soupapes. Pour ce faire, il existe deux concepts qui peuvent être utilisés afin d'en tirer avantage, soit la résonance de Helmholtz et les tubes débouchant.

#### La résonance de Helmholtz

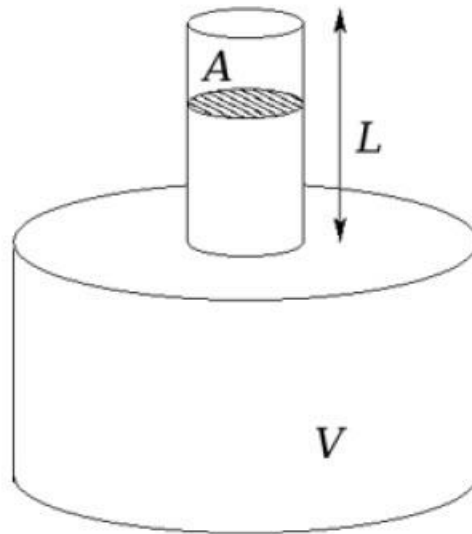
Ce phénomène survient lorsqu'une masse d'air contenue dans un certain volume est excitée par une perturbation de la pression. Par exemple, lorsque l'on souffle sur le goulot ouvert d'une bouteille et que l'on entend une résonance, c'est le phénomène de Helmholtz qui se produit. La cause de cette résonance est la perturbation barométrique à l'ouverture du système. Le volume d'air contenu dans le plénum peut être comparé à un système masse-ressort. Ainsi, sa raideur pneumatique fait en sorte que le volume oscille, provoquant une pression qui oscille et finalement en un débit qui oscille. Une simplification du plénum est présentée dans la figure suivante et où la fréquence du système peut être calculée de la façon suivante :



Figure 10 : Résonateur de Helmholtz

$$f = \frac{c}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{A}{V \cdot L}}$$

*C=vitesse du son, A=aire de section, L=longueur de la conduite, V=volume du résonateur*



Dans cet exemple, le volume est fermé. Cependant, le phénomène peut aussi survenir dans un volume ouvert, comme le plénum où l'air circule. Ces calculs ne peuvent donc pas être appliqués directement. Ils peuvent cependant servir de calculs préliminaires afin de déterminer l'ordre de grandeur selon les dimensions du modèle. Étant donné que le débit oscille, il est de mis de faire en sorte qu'un débit en direction du cylindre est synchronisé avec l'ouverture des soupapes d'admission. Ceci induirait alors une plus grande quantité d'air dans le cylindre.

#### Tube débouchant :

Lorsqu'une onde de compression ou de raréfaction voyage dans un tube qui débouche sur une section différente en dimension, comme sur la figure suivante, celle-ci est réfléchi en sens inverse et de signe opposé. Plus précisément, si c'est une onde de compression qui arrive, c'est une onde de raréfaction qui retourne. D'après les notes de cours de MEC6214A - *Contrôle du bruit des systèmes mécaniques*, il est possible de calculer la réflexion de cette onde à l'aide des formules de la figure suivante :

Il serait donc possible de faire en sorte, dans le design, que la géométrie fasse un changement de section brusque, comme sur l'image précédente. Cependant, il ne faut pas tenir pour acquis que cette théorie est directement applicable à l'entrée d'air de la formule SAE. Il faudrait procéder à une série de tests afin de valider que le concept fonctionne pour application.

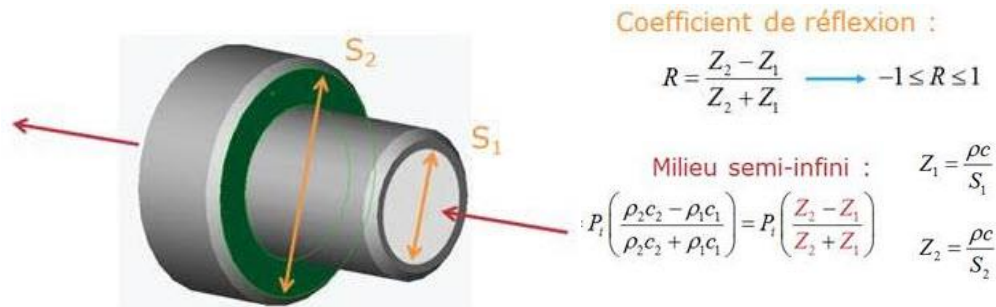


Figure 11 : Tube changeant de section et calcul de réflexion d'onde

## Méthodologie

Pour chaque solution possible conservée, les recherches effectuées ou la méthodologie utilisée afin de tester cette solution seront présentées. Ainsi, toutes les décisions prises en cours de projet seront explicitées.

### Changer le filtre à air

Le filtre à air est un élément important du système d'admission d'air de l'engin. Son but est d'enfreindre le chemin aux particules solides pour qu'il y en ait le moins possible qui se rende au moteur. Plusieurs types de filtres sont disponibles sur le marché selon les applications recherchées. La Formule SAE recherche toujours des manières d'améliorer la performance de son véhicule et le filtre à air peut en être une.

En résumé, plus le volume d'air entrant dans le système est grand, plus la performance du moteur devrait augmenter. D'après cette logique, un filtre laissant passer beaucoup d'air serait l'idéal, mais ceci est vrai jusqu'à un certain point.

Le filtre en place en ce moment est un filtre conique K&N RC-4890 pouvant recevoir l'équivalent de 0.169901 m<sup>3</sup>/s. Par contre, le moteur du véhicule, à sa puissance maximum, demande environ 0.04248 m<sup>3</sup>/s d'air soit quasiment 4 fois moins que le filtre peut laisser passer. Des problèmes de turbulences peuvent survenir lorsque trop d'air peut entrer dans le système et cela peut avoir un impact négatif sur la précision du TPS (throttle position sensor). Dans le cas du véhicule de la formule, des analyses ont été faites pour déterminer les mouvements de l'air dans les conduits et rien de significativement négatif n'était produit. Donc, un filtre plus performant serait qu'une dépense superflue sachant déjà qu'elle n'aurait aucun effet représentatif comparativement à celui en place en ce moment.

## Concevoir un nouveau corps papillon

Le corps papillon actuellement installé sur la voiture est conçu et fabriqué par AT Power spécialement pour les voitures de compétition FSAE. Il consiste en un convergent de type elliptique passant d'une entrée de 28 mm à la restriction munie d'une valve papillon sans arbre. Notre but est donc d'évaluer s'il y aurait possibilité d'améliorer ce mécanisme en réduisant la restriction d'air qu'il génère et la masse.

Tout d'abord, nous nous sommes renseignés sur les différents types de convergent possibles afin de trouver s'il existe un type plus performant. Plusieurs sources montrent cependant que celui utilisé actuellement est bel et bien la meilleure solution possible. Par exemple, une étude expérimentale et numérique de Blair et Melvin Cahoon<sup>1</sup> dit la chose suivante : *"The bests bellmouths are those that are short and fat with the elliptical the winner"*. De plus, la valve papillon offre une résistance minimale puisqu'elle est sans arbre. Il est donc peu probable que l'on puisse réduire la résistance générée par le corps papillon. Finalement, nous avons décidé d'écarter la fabrication d'un modèle plus léger puisque le modèle actuel est déjà plutôt léger et que nous rendrions probablement moins fiable. Il s'agit d'une pièce très importante, car sans elle, nous ne pouvons pas participer aux compétitions.

## Modifier le volume et/ou la géométrie du plénum

Lors du PI4 de 2014, un nouveau plénum avait été conçu et fabriqué. Cependant, même si Ricardo WAVE prédisait une hausse des performances, les résultats en essai furent décevants. En effet, le moteur perdait de la puissance à haut régime. L'hypothèse principale est que l'angle de divergence n'était pas optimal causant de la turbulence et une forte perte de pression à l'entrée du plénum. De plus, cette hypothèse concorderait avec la mauvaise prédiction de Ricardo étant donné qu'il ne simule pas les écoulements d'air.

Comme nous l'avons mentionné au début de ce chapitre, nous croyons qu'entre autres deux facteurs pourraient nous permettre d'augmenter les performances du moteur : le volume du plénum et l'angle de divergence du diffuseur. Ces deux facteurs ont été analysés en commençant par déterminer l'angle puis un volume cible. La géométrie en découlera naturellement.

Pour éviter l'erreur commise précédemment, nous avons décidé d'effectuer des simulations d'écoulements de fluides pour déterminer un angle de divergence optimale. Heureusement, la formule FSAE bénéficie d'une licence de Star-CCM+, un logiciel de volumes finis permettant de résoudre les équations de Navier-Stokes couplés avec un modèle de turbulence. Nous avons donc effectué des simulations axisymétriques pour nous permettre de savoir quel angle nous permettait d'obtenir la plus faible perte de charge à travers la restriction et le diffuseur. Nous avons décidé d'analyser trois angles possibles soit l'angle actuel de 8,56°, l'angle minimal de 4°

---

<sup>1</sup> G. Blair and W Melvin Cahoon (2010), RET BELLMOUTH, SPECIAL INVESTIGATION : DESIGN OF AN INTAKE BELLMOUTH,

(pour avoir une géométrie réalisable) et un angle médian de  $6^\circ$ . Les angles de  $4^\circ$  et  $6^\circ$  sont souvent les plus performants selon la littérature. Pour que chaque modèle soit équivalent, nous avons imposé un débit à la sortie du diffuseur (modélisant l'aspiration moyenne du moteur à son maximum). Les détails de la simulation sont disponibles en annexe, cependant, les résultats en termes de pression sont présentés aux figures suivantes. Le

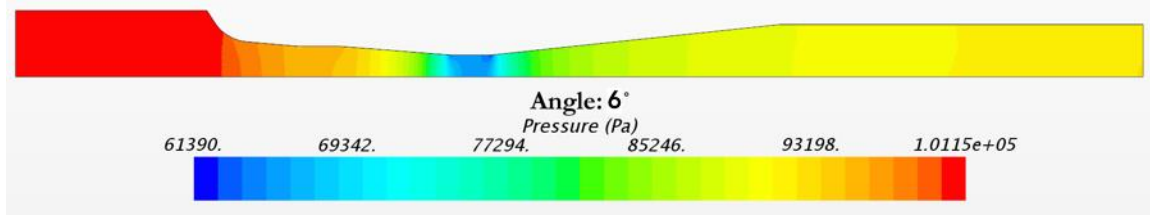


Figure 13 : Distribution de pression pour le divergent de  $6^\circ$

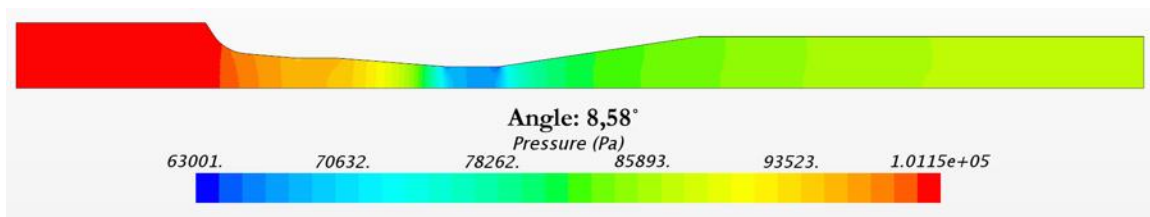


Figure 14 : Distribution de pression pour le divergent de  $8,58^\circ$

Tableau 5 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente quant à lui les pertes de pression à travers le divergent. On remarque que la solution actuelle n'est pas la solution optimale. En effet, il s'agit du modèle qui cause la plus importante perte de pression. De plus, l'analyse visuelle des résultats montre bel et bien que l'angle de  $8,56^\circ$  causait de la turbulence tout juste en aval de la restriction.

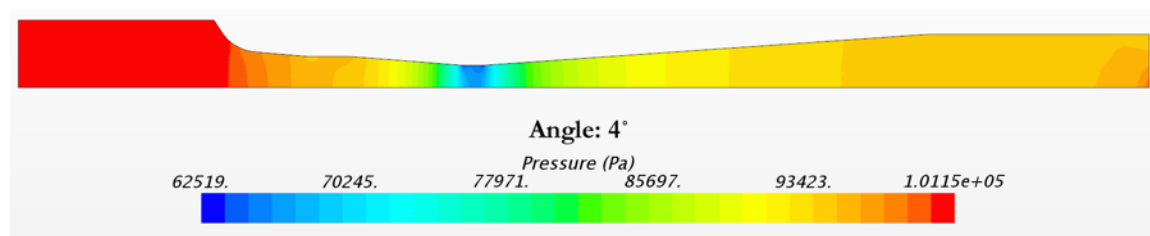


Figure 12 : Distribution de pression pour le divergent de  $4^\circ$

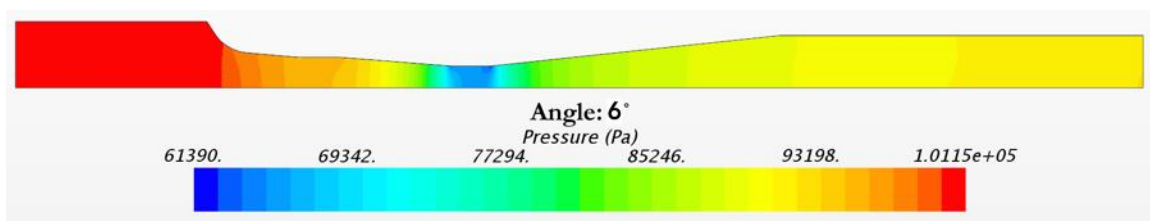


Figure 13 : Distribution de pression pour le divergent de 6°

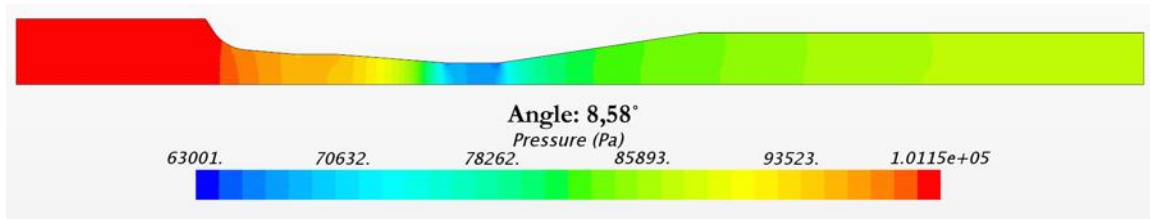


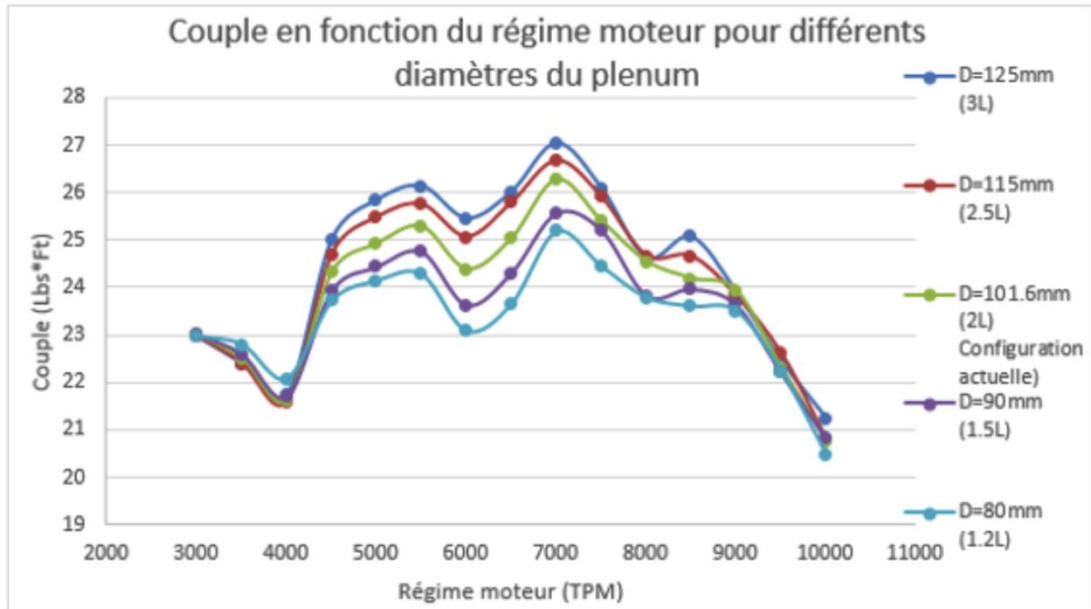
Figure 14 : Distribution de pression pour le divergent de 8,58°

Tableau 5 : Perte de pression en fonction de l'angle

Angle de divergence (°)	Perte de pression (Pa)
4	5 204
6	8 798
8,56 (Actuel)	14 564

Nous avons effectué plusieurs recherches pour déterminer quel volume de plénum serait optimal. Cependant, les sources se contredisent. On peut notamment citer le modèle Ricardo du PI3 de Turcot-Jetté qui semblait démontrer une corrélation directe et positive entre l'augmentation de volume et la hausse des performances (voir Figure 15) et les essais de l'équipe en 2016 qui montrent que le volume n'a pas nécessairement un impact positif. Nous avons donc décidé d'utiliser notre avantage d'avoir un dynamomètre et fixer ce paramètre à l'aide d'essais. Il nous faudra donc un concept où le volume est facilement modifiable. Nous viserons des volumes variant de 2L (volume actuel) à 3L (maximum de performance selon Ricardo).

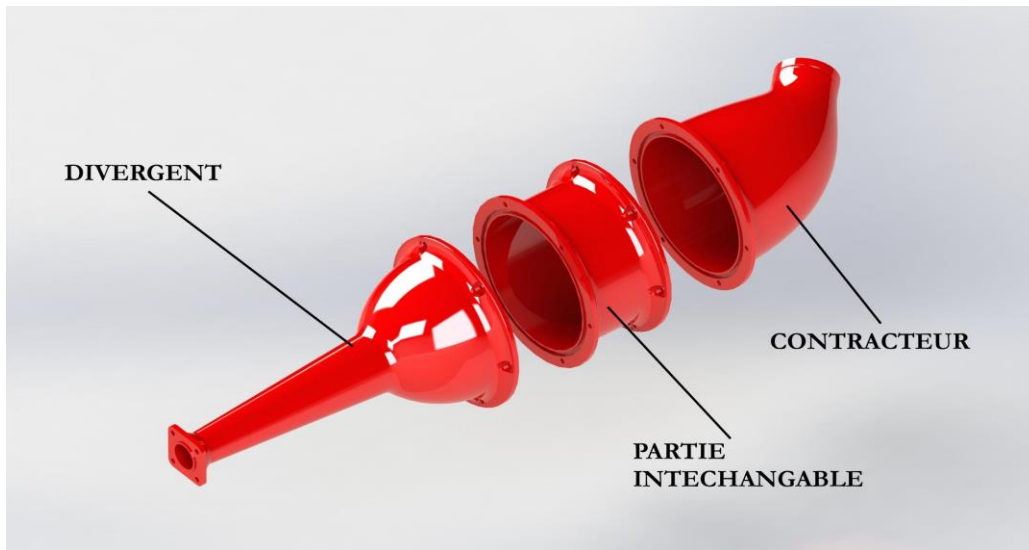
Figure 15 : Couple en fonction du régime pour différents volumes de plénum



(Tiré du PI3 de Guillaume Turcot-Jetté)

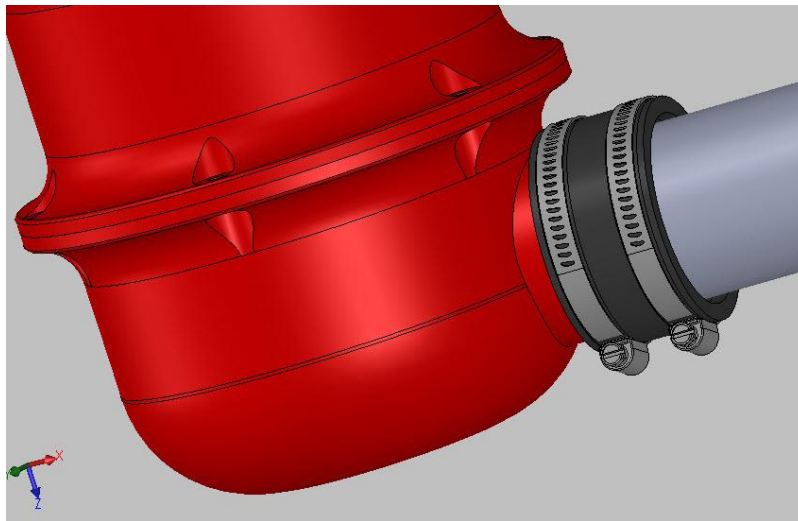
Nous avons maintenant les ingrédients de base pour le concept du plenum, soit l'angle de divergence et le volume (comme nous venons de le voir, il s'agit plutôt de volumes variables). La solution proposée pour les essais est visible à la Figure 16. Il est à noter que ce concept n'est pas le final. Pour les mêmes raisons énumérées lors du PI4 de 2014, nous avons décidé de le fabriquer en impression 3D.

Figure 16 : Solution proposée



En complément, afin de tirer avantage des fronts d'onde, comme mentionné précédemment, l'équipe a choisi de se lancer dans un concept alternatif de raccord de branche primaire au plénum. Celui-ci n'est que préliminaire et servira de test pour confirmer ou infirmer la théorie. En voici le modèle :

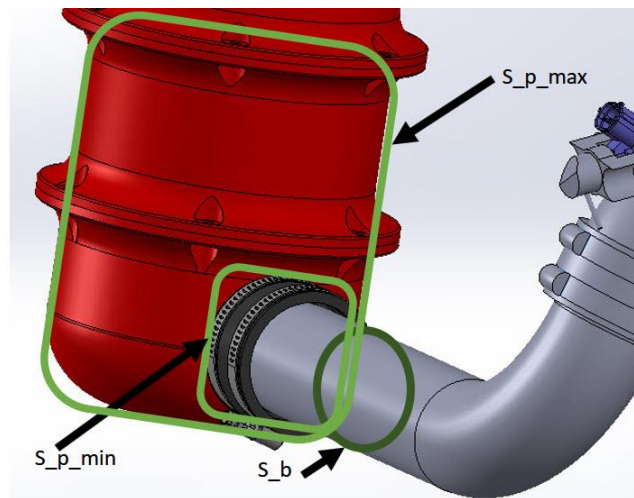
Figure 17 : Nouveau concept de convergent



Comme on le constate, le changement de section est brusque entre la branche primaire et le plénum. Celui-ci permettrait donc d'accentuer la réflexion d'onde et ainsi alimenter le moteur davantage en air.

D'après les formules présentées dans la figure 18, la réflexion de l'onde serait environ égale à  $R_{\text{moy}} = -0.48$  et en voici le détail des calculs :

Figure 18 : Calculs de réflexion d'onde



Des sections de plénum  $S_{p\_min}$  et  $S_{p\_max}$  ont été déterminées de la façon suivante ainsi que la section de la branche primaire  $S_b$  :

- $S_{p\_min}$  : carré de côté égal au diamètre de la branche primaire
- $S_{p\_max}$  : projection de la portion cylindrique et contraction du plénum
- $S_b$  : aire de section du tube

Et voici les valeurs de toutes les sections :

- $S_{p\_min} = 25 \text{ cm}^2$
- $S_{p\_max} = 238 \text{ cm}^2$
- $S_b = 20 \text{ cm}^2$

Maintenant, supposant que la vitesse du son et la densité sont identiques dans la branche primaire et dans le plénum puisque c'est un volume continu, il est possible de reformuler l'équation de la réflexion de telle sorte que :

$$R = \frac{S_1 - S_2}{S_1 + S_2} = \frac{S_b - S_p}{S_b + S_p}$$

Ainsi, avec les bornes sur la valeur de  $S_p$ , on calcul que :

$$-0,84 < R < -0,11$$

D'abord, si la valeur de  $R$  est 0, l'onde n'est pas réfléchiée et si la valeur est de 1 ou -1, l'onde est complètement réfléchiée. On constate que les deux bornes sur  $R$  sont inférieures à 0. Ceci implique que le signe de l'onde sera inversé au changement de section. Ainsi, une onde de raréfaction sera réfléchiée en onde de compression. Il sera donc nécessaire, lors des tests, de coordonner les ondes de raréfaction qui remontent la branche primaire, et non les ondes de compression.



De plus, on remarque que plus la différence de section est grande, plus l'onde est réfléchie. Dans ce cas, on devrait s'attendre à trouver une valeur à l'intérieur de ces bornes lors de la phase de test. Si on en fait une moyenne, trouve que  $R_{\text{moy}} = -0.48$ , comme présenté précédemment.

### Modifier la branche primaire

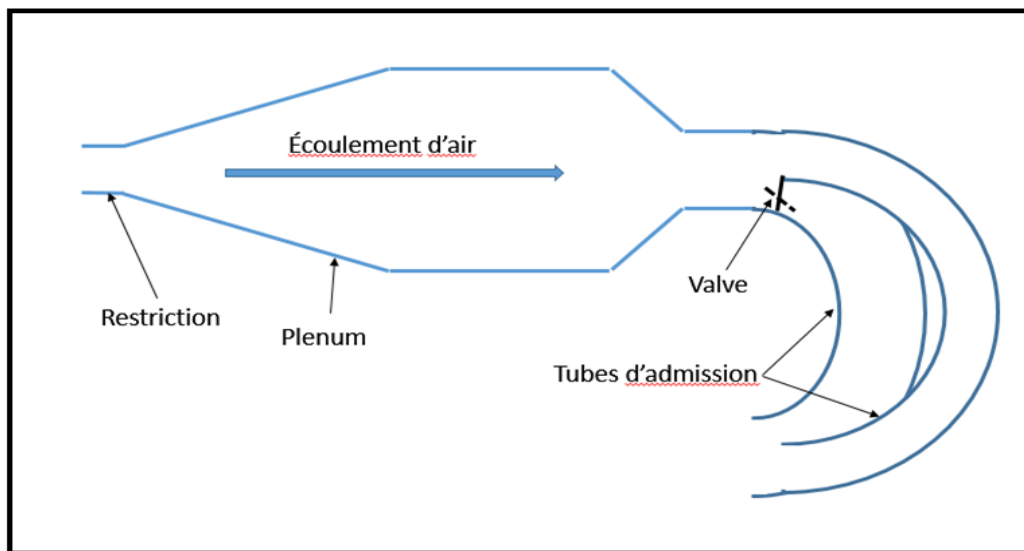
Tout d'abord, la section *Théorie* montre l'importance de la longueur de la branche primaire dans les performances du système d'admission d'air et donc du moteur. Étant consciente de ce phénomène, l'équipe de composantes externes s'est penchée sur le concept de la branche primaire.

En effet, la longueur de cette branche a un impact direct sur le positionnement du sommet du couple sur le graphique du couple en fonction du régime moteur (RPM). Ainsi, une conception adéquate de la forme et de la longueur de la branche primaire permettrait de positionner ce sommet exactement à l'endroit désiré. L'optimisation permettrait au pilote d'obtenir son couple maximal là où il en a le plus besoin. Cependant, le désavantage de toutes branches primaires simple comme celle que nous utilisons est qu'elle engendre un et un seul sommet de couple sur toute la plage du régime moteur.

Ainsi, il nous est venu à l'idée l'élaboration d'une branche primaire à longueur variable, ce qui pourrait en effet créer plusieurs sommets de couple et améliorer de façon considérable les performances de la voiture lors d'une course. Afin d'analyser les possibilités du concept, des recherches ont été effectuées dans le but de sortir une multitude de solutions possibles et une matrice de Pugh a été créée afin de classer ces solutions.

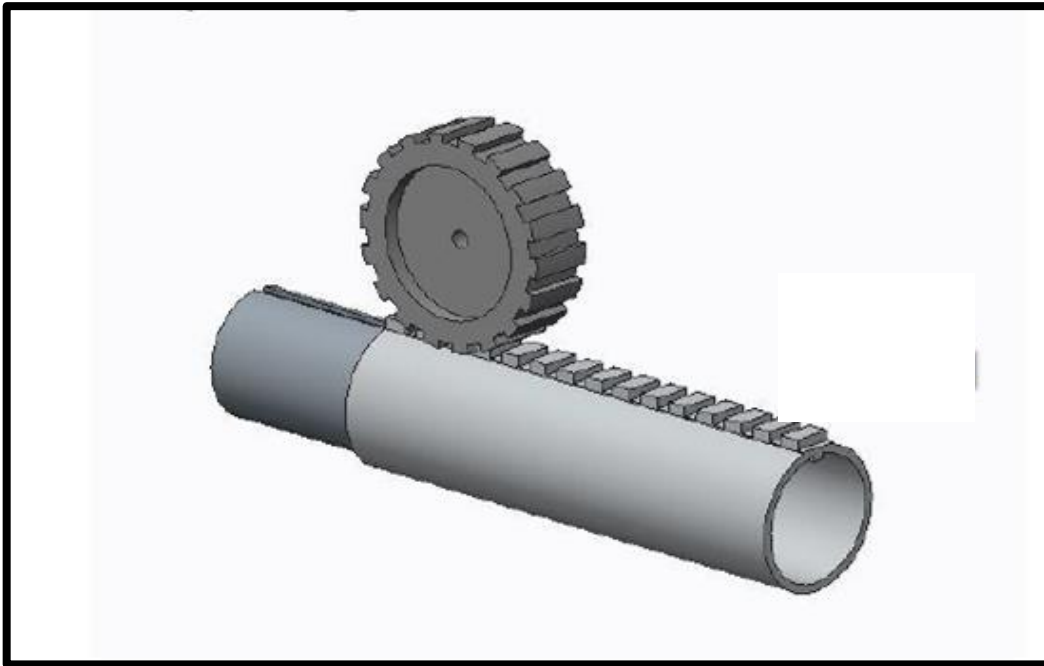
En premier lieu, voici une présentation des différentes solutions trouvées :

*Figure 19 : Branche primaire variable - Solution 1*



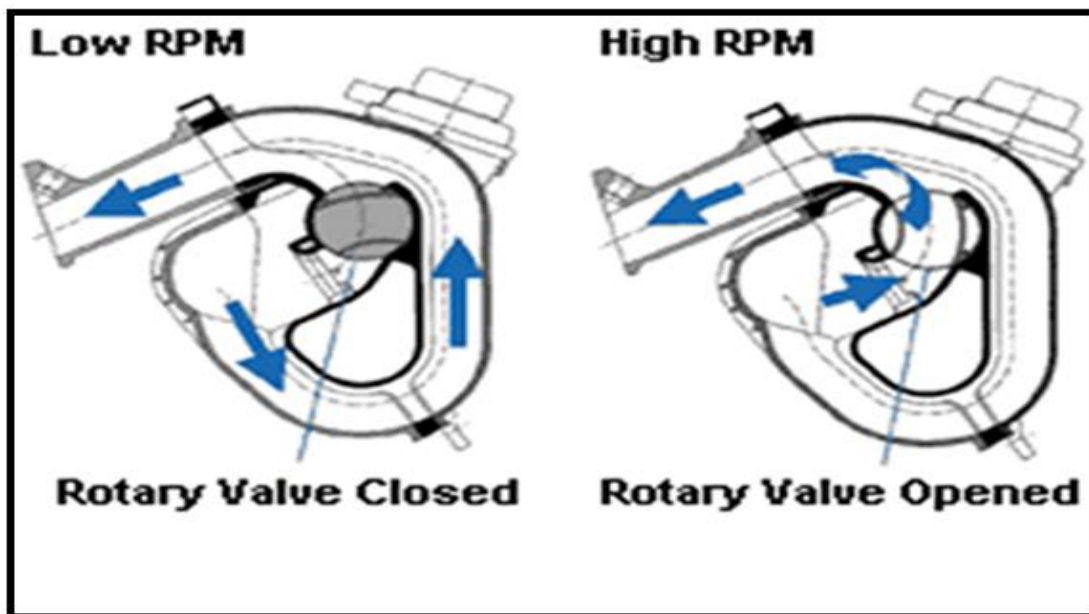
Cette solution utilise l'ouverture d'une valve afin d'ajouter de façon instantanée un deuxième passage possible pour l'air et donc modifier la longueur totale de la branche primaire.

Figure 20 : Branche primaire variable - Solution 2



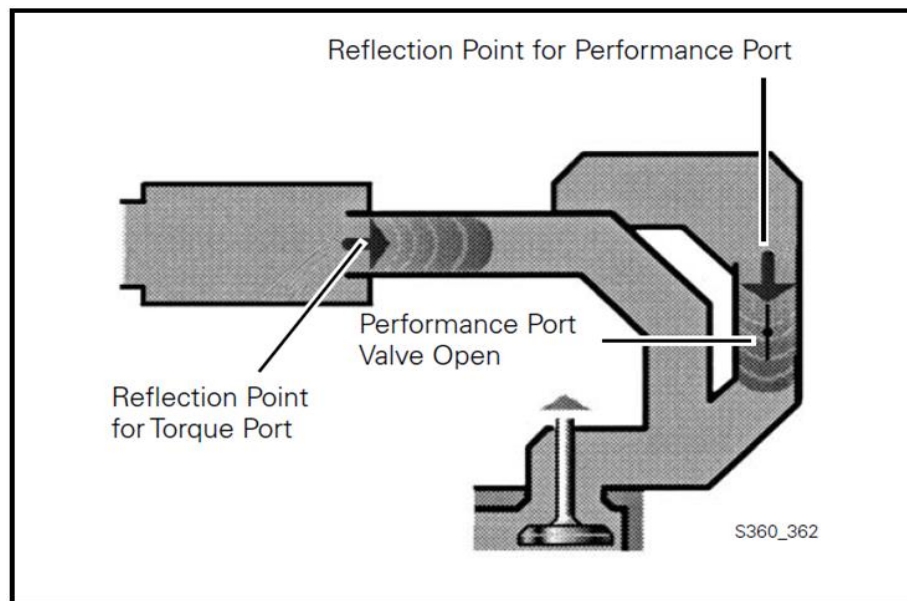
Cette solution propose le déplacement linéaire de 2 tubes concentriques à l'aide d'un engrenage. Ainsi, cette solution permet une multitude de longueurs de branche primaire, étant donné que le mécanisme peut s'allonger de la distance exacte nécessaire.

Figure 21 : Branche primaire variable - Solution 3



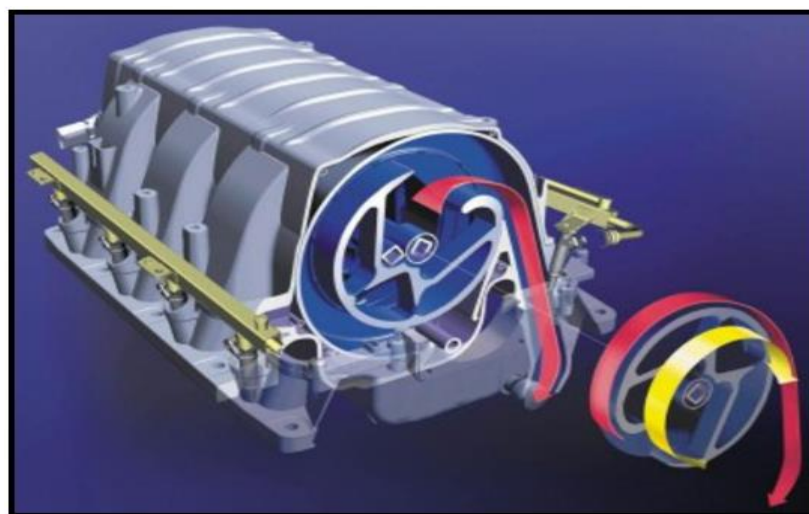
Cette solution propose une valve rotative qui, dans un cas, bloque le passage de l'air et force celle-ci à prendre un chemin plus long alors que dans l'autre cas, son ouverture crée un chemin plus court. Ainsi, cette solution comporte deux longueurs fixes différentes.

*Figure 22 : Branche primaire variable - Solution 4*



Cette solution propose une entrée d'air à longueur variable. L'image montre un port de performance du côté droit qui entre en jeu seulement à des révolutions plus rapides. Ce port ajoute un parcours plus court pour l'air. Il est muni d'une valve contrôlée par l'ordinateur moteur (ECU) qui permet de choisir quand il est ouvert ou fermé. Ce concept permet donc les ajustements lors des phases de test.

*Figure 23 : Branche primaire variable - Solution 5*



Dans le cas de cette solution, il s'agit d'une pièce rotative qui dicte le cheminement de l'air vers l'entrée du moteur. En effet, le chemin le plus court est lorsque l'air peut accéder directement. Cependant, la rotation de la partie centrale force constamment l'air à prendre un parcours différent. Ainsi, cette solution permet une multitude de longueurs de branche primaire, en fonction de la rotation de la pièce.

Afin d'être en mesure de faire ressortir la meilleure solution pour notre projet, une matrice de Pugh doit être effectuée. L'équipe choisit alors différents critères pour juger les solutions et une importance relative est associée à chacun de ces critères. Le résultat de cette matrice de décision est présenté dans la figure ci-dessous.

Figure 24 : Matrice de Pugh utilisée pour la branche primaire variable

Concept		Importance	System Design Concept				
Critères		Relative	1	2	3	4	5
Coût (-)		3	D A T U M	-	-	S	-
Facilité de fabrication (+)		4		-	-	-	-
Sécurité (+)		5		-	S	S	S
Performance (+)		5		+	+	+	+
Masse (-)		2		S	S	S	-
Encombrement (-)		2		-	+	S	-
Fiabilité (+)		5		-	S	-	-
Somme +				5	7	5	5
Somme -				19	7	9	16
Somme S				2	12	12	5
		(Somme +) - (Somme -)		-14	0	-4	-11

En analysant les résultats, on remarque que 2 solutions arrivent à égalité, soit la solution 3 ainsi que la solution de référence 1. Dans cette situation, l'équipe a 2 options. Tout d'abord, elle peut simplement choisir l'une des 2 solutions considérant qu'elles sont aussi bonnes l'une que l'autre selon l'analyse. Sinon, l'équipe peut également tenter de créer une version hybride à partir des 2 solutions, en prenant les points forts de chacune d'elles.

Dans notre cas, l'équipe a choisi une solution hybride en prenant le concept de la solution 1, mais en y intégrant le principe de circulation de la solution 3. Ainsi, la solution physique est celle de la solution 1, mais au lieu que la valve ouvre un chemin supplémentaire pour l'air, la valve pivote de manière à toujours bloquer l'une des 2 entrées et laisser l'autre ouverte. Ainsi, la rotation de la valve permettra une modification instantanée de la longueur de la branche primaire.

## Résultats

### Forme du convergent

Suite aux résultats expérimentaux détaillés dans le document d'accompagnement de ce rapport, on a conclu que le convergent courbé était le concept idéal pour notre voiture. En effet, celui-ci permet une augmentation de la puissance du moteur sur toute la plage désirée, comparativement à un convergent 90 degrés. De plus, au niveau structurel, cette configuration est plus facile à fabriquer avec une imprimante 3D et est plus solide, car elle ne nécessite aucun collage (elle est faite en une seule pièce). Voici une illustration de la configuration choisie pour la forme du convergent :

*Figure 25 : Forme du convergent optimal*



### Volume du plénum

Après avoir testé différents volumes de plénum à l'aide du dynamomètre, nous avons conclu que le plus gros volume permettait d'obtenir les meilleures performances, soit un volume de 3L. De la même façon que pour la forme du convergent, le volume de 3L permettait d'obtenir une courbe de puissance plus élevée, principalement à bas régime. Cependant, un aspect négatif de ce résultat est qu'il est plus difficile de positionner un plénum de cette envergure sur la voiture tout en respectant l'ensemble des règlements. Nous verrons plus bas comment l'intégration sur la voiture a été gérée.

### Fabrication du plénum final

Pour la fabrication du concept final du plénum, nous avons opté pour un partenariat avec une compagnie nommée *Fablab*, spécialiste en impression 3D. En effet, pour le plénum final, on désirait une grande qualité d'impression de manière à minimiser les défauts et les risques de fissures.

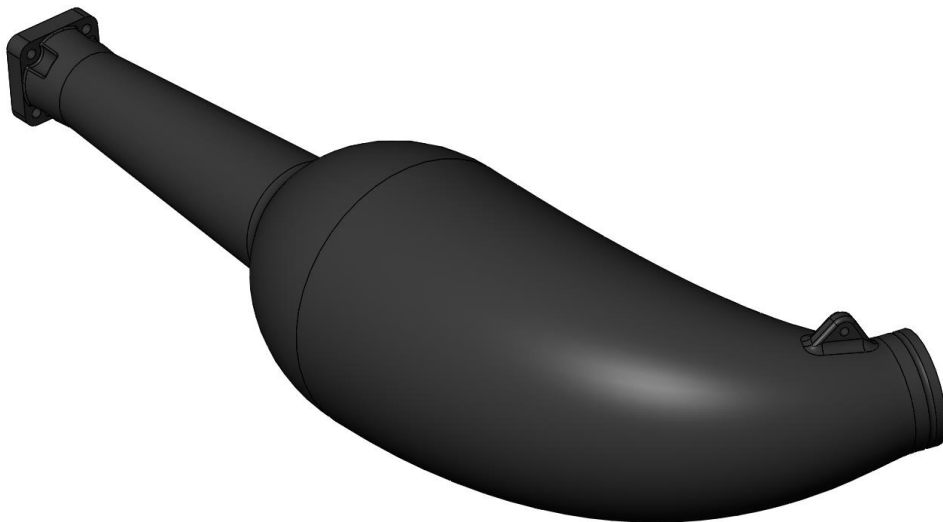
Au niveau du matériau, on a utilisé le même que celui utilisé pour les essais effectués au dynamomètre, soit de l'ABS. Ce matériau a été choisi pour ses propriétés ductiles lui permettant de se déformer sans se rompre, contrairement au PLA. De plus, la température à laquelle il commence à ramollir est beaucoup plus élevée soit environ 110 °C contrairement à environ 60 °C pour le PLA. Il s'agit d'un aspect important puisque c'est une pièce qui n'est pas très loin de la chaleur dégagée par le moteur, en plus de la température extérieure qui peut facilement atteindre 40 °C lors des compétitions estivales.

Au niveau de la résistance structurelle du plénum, certaines modifications ont été apportées à la solution finale. En effet, suite aux essais effectués sur le dynamomètre, les vibrations ont causé quelques fissures sur la partie divergente du plénum. Ainsi, l'épaisseur de la paroi pour cette section a été augmentée de 3mm à 6mm. Toutes les autres parties du plénum ont résisté aux essais du dynamomètre et n'ont donc pas été modifiées.

En ayant utilisé l'ABS comme matériel, on avait la possibilité d'effectuer un traitement avec de l'acétone puisque ce dernier réagit avec l'ABS et est en mesure de le faire fondre. Ainsi, en plaçant la pièce dans une zone avec une forte concentration d'acétone vapeur, celle-ci fond en surface ce qui donne un fini lisse et réduit grandement les risques de fissures de la pièce. D'un autre côté, si le procédé est mal contrôlé et que la pièce y reste trop longtemps, elle risque de se déformer de façon permanente. Pour notre plénum final, on a décidé de ne pas effectuer de traitement acétone considérant que le fini de la pièce était déjà acceptable et que les risques de fissures étaient très faibles. Par contre, dû aux limitations de la taille de l'imprimante utilisée, le plénum a dû être imprimé en 2 parties et on a utilisé de l'acétone afin de coller les 2 pièces ensemble, ce qui a donné un excellent résultat.

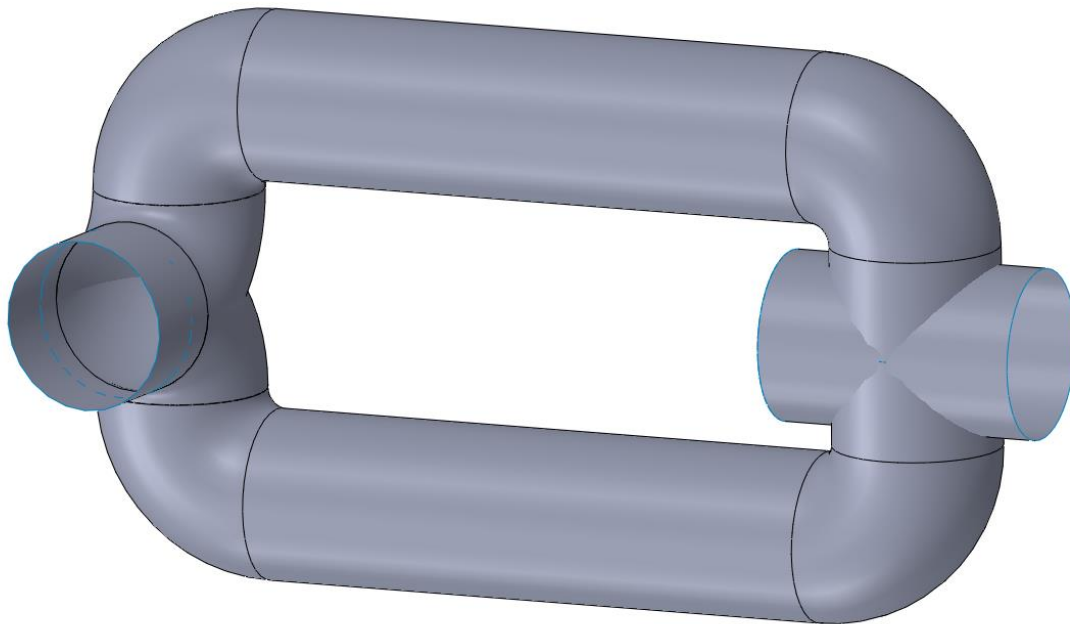
En terminant, voici ci-dessous une image du plénum final en 2 parties. La jonction entre les deux parties est faite où l'on aperçoit le trait noir à la section la plus large du plénum :

*Figure 26 : Illustration plénum final*



### Branche primaire

Ayant l'idée en tête de concevoir une branche primaire à longueur variable, la matrice de Pugh a grandement aidé afin de comparer les différentes pistes de solutions possibles. Nous avons donc été en mesure de déterminer la solution idéale pour notre application et ainsi commencer le processus de conception à l'aide d'un modèle 3D. En effet, on présente ci-dessous le résultat préliminaire de la modélisation de la branche primaire variable.



*Figure 27 : Exemple de tube d'admission à longueur variable*

Selon la figure ci-dessus, l'écoulement d'air arrive du système d'admission d'air par la droite, entre dans le tube et est dirigé dans l'un des 2 chemins possibles (haut ou bas) pour finalement terminer son chemin à l'extrême gauche et entrer dans le moteur. La section de droite avec les intersections de tubes à 90 degrés inclura une valve pneumatique à déplacement rotatif de 0-90 degrés. Ainsi, selon la position de la valve, l'air sera dirigé dans le conduit du haut ou dans celui du bas.

On observe que les 2 chemins ont une longueur identique. En effet, le modèle 3D a été construit avec des valeurs paramétrées de manière à pouvoir modifier aisément l'angle et la longueur des différents chemins, afin d'obtenir les 2 longueurs fixes désirées. Afin de déterminer ces 2 longueurs, des essais avec le nouveau système d'admission d'air sont prévus sur le dynamomètre en modifiant par petits incréments la longueur de la branche primaire. Ainsi, nous allons pouvoir analyser l'impact de la longueur de la branche primaire sur le positionnement du sommet de couple en fonction du RPM et fixer les 2 longueurs optimales désirées selon les besoins du pilote lors d'une course.

Une fois les longueurs fixées, les 2 seules restrictions restantes seront la fabrication et l'installation sur la voiture. Tout d'abord, au niveau de la fabrication, on veut s'assurer que le concept demeure le plus simple possible à fabriquer, d'où les plis au 90 degré. Des courbures complexes viendraient éliminer certains processus de fabrication comme le pliage de tubes métalliques. En conservant la géométrie le plus simple possible, on évite d'avoir des problèmes lorsque viendra le temps de la fabrication. Ensuite, au niveau de l'installation sur la voiture, il faudra s'assurer que le produit final soit suffisamment compact pour ne pas entrer en interférence avec quoi que ce soit qui est présent sur la voiture. La complexité de l'intégration sera abordée sous peu.

La branche primaire était la dernière étape au niveau de nos essais expérimentaux. Cependant, des bris au niveau du moteur et du dynamomètre ont repoussé ces essais au courant de la session. De plus, le commanditaire avec lequel on voulait faire fabriquer cette branche primaire variable nous a laissés tombé au milieu de la session d'hiver. Nous avons donc concentré nos énergies à terminer les essais expérimentaux sur les autres pièces de l'admission d'air et avons mis de côté la fabrication d'une branche primaire variable. Avec la forme courbée du convergent et le volume de 3L du plénum, on obtient des résultats très satisfaisants au niveau de la courbe de puissance du moteur. En effet, celle-ci est plus élevée et également décalée vers la droite, signifiant une hausse de puissance à plus bas régime. De plus, la courbe forme un certain plateau entre 6500RPM et 8500 RPM ce qui est similaire à ce qu'on aurait voulu créer avec une branche primaire variable. Finalement, l'insertion d'un concept de branche primaire variable sur la voiture aurait été un défi très grand dû à l'espace très restreint pour l'accueillir. Pour toutes ces raisons, on a opté pour une branche primaire fixe de 325mm ce qui nous permettait de bonnes performances et une insertion facile et réglementaire sur la voiture.

La branche primaire variable demeure un concept très intéressant qui mérite d'être analysé encore davantage dans les prochaines années. Ainsi, les prochaines sections du rapport présentent des éléments importants à considérer dans l'optique où ce concept serait implanté sur la voiture.

### Sélection de la valve 90°

La sélection de la valve 90° qui sera utilisée pour diriger l'écoulement d'air vers un tube d'admission ou l'autre après le plénum a été faite en considérant plusieurs facteurs. La plupart venaient de contraintes imposées par la voiture déjà conçue auxquelles nous devons nous adapter. Nous avons deux principaux choix, soit une valve électronique ou pneumatique. La valve électronique imposait seulement de respecter une certaine tension d'alimentation et d'être le plus léger possible, l'alternateur du moteur pouvant fournir amplement la puissance consommée par une valve utilisée dans ce genre d'application. Une valve pneumatique impose cependant plus de contraintes. Voici un tableau résumé des aspects importants à considérer dans ce cas.



Tableau 6 : Paramètres à considérer pour la sélection de la valve 90°

#	Paramètres à respecter	Valeur ou plage à respecter
1	Tension d'alimentation (V)	5 <u>OU</u> 12
2	Pression d'alimentation (PSI)	100 (sans quoi un autre régulateur de pression est nécessaire)
3	Masse totale du système	Plus faible possible
4	Volume d'air consommé par déplacement ( $\text{po}^3$ )	Maximum 0.30

1. Ce critère est autant vrai pour une valve électronique que pneumatique. Dans le cas d'une valve électronique, nous l'alimentons directement, alors que pour une valve pneumatique, nous alimentons plutôt une servovalve qui alimente à son tour en air comprimé la valve en question. La batterie de la voiture fournit du 12V et alimente, entre autres, l'ordinateur de la voiture qui offre une tension régulée à 5V. Ces deux valeurs de voltage sont donc celles disponibles sur la voiture et nous devons nous y conformer. Ce critère ne devrait pas être un problème, ces tensions étant très standards.
2. Dans le cas d'une valve pneumatique, nous devons l'alimenter avec de l'air comprimé. Le régulateur de pression présent sur la voiture permet de réguler la pression de l'air sortant du réservoir à 100 psi, car c'est la pression optimale à laquelle le levier d'embrayage de la voiture fonctionne. Pour éviter l'ajout d'un second régulateur, il faudrait que la servovalve fonctionne à 100 psi.
3. Autant pour une valve pneumatique qu'électrique, nous voulons une masse aussi faible que possible.
4. Grâce au système d'acquisition de données de la voiture, nous pouvons estimer assez fidèlement combien de cycle la valve effectuera lors de la plus longue course possible, soit une endurance. Nous pouvons sortir un graphique qui représente le régime moteur (RPM) en fonction de la distance pour un tour précis. Nous pouvons compter le nombre de fois où le régime correspond à la valeur à laquelle la valve devra être alimentée et extrapoler pour obtenir une endurance complète. Comme le réservoir d'air comprimé de la voiture a une certaine limite, il ne faut pas que le volume d'air utilisé par cycle soit trop grand. Bref, les détails des calculs ayant mené au volume limite à respecter sont présentés en annexe.

Nous avons réalisé quelques recherches tout en considérant les contraintes mentionnées plus haut et nous sommes rendu compte qu'il était difficile d'obtenir une valve électronique 90° et qui était légère. Nous avons donc orienté nos recherches vers une valve pneumatique et avons trouvé un ensemble qui comprenait toutes les composantes nécessaires. Celui-ci contenant la valve à 90°, la servovalve et les tubes d'alimentation. De plus, les valves fonctionnent à 100 psi et à 12V, pèsent les deux ensembles 120g et consomment  $1.5 \text{ cm}^3$  ( $0.0915 \text{ po}^3$ ) par déplacement ( $\frac{1}{2}$  cycle). L'ensemble a été pris chez Gears Educational Systems, à l'adresse suivante : [http://www.gearseds.com/rotary\\_actuator.html](http://www.gearseds.com/rotary_actuator.html).

Figure 28 : Valve 90° et servovalve sélectionnée pour le système d'admission d'air



### Intégration de la valve sur la voiture

Dû aux différentes problématiques mentionnées ci-dessus, le tube d'admission variable n'a pas été implémenté sur la voiture 2017. Il n'a pas non plus été testé. Comme nous croyons fortement que le concept apporterait de bonnes améliorations sur la plage de puissance exploitée par le pilote, nous décrivons ici l'installation à réaliser pour rendre le concept fonctionnel.

Comme mentionné précédemment, la bouteille d'air comprimée (HPA) fournit de l'air à une pression de 100 psi à la sortie du régulateur. Il suffit de mettre une jonction sur le tube pneumatique pour également fournir une pression de 100 psi à la valve 5/2\*. Le "Y" à utiliser a déjà été acheté chez McMaster-Carr, avec le numéro de produit #5779K44. Ensuite, il faut passer d'un tube pneumatique 5/32" de diamètre intérieur à 3/32" de diamètre intérieur pour s'adapter aux tubes de la valve 5/2. L'union utilisée a déjà été achetée chez McMaster-Carr également et porte le numéro de produit # 5117K56. Le tube fourni avec la valve peut ensuite être utilisé pour acheminer l'air à cette même valve. Cette valve 5/2 sera contrôlée avec l'ordinateur de la voiture et du 12V provenant de la batterie. Le fil rouge doit être branché sur le 12V de la batterie, alors que le fil noir doit être connecté à une sortie numérique (digital output) de l'ordinateur de la voiture. La convention utilisée sur la voiture est un fil vert pour un fil transmettant un signal, d'où la couleur verte sur le schéma plus bas même si le fil est noir sur la valve. Les deux ports pneumatiques de sortie de la valve doivent être connectés à la valve rotative 90°.

Lorsque la valve 5/2 n'est pas alimentée en 12V, l'air comprimé sort par une des deux sorties. Lorsqu'elle est alimentée en 12V, l'air sort par l'autre sortie, ce qui provoque la rotation de 90° de la valve rotative. Le contrôle de l'alimentation se fait via l'ordinateur de la voiture (ECU). En condition normale, le fil noir de la valve connecté au fil vert se rendant à l'ECU agit comme un circuit ouvert, c'est-à-dire qu'il est connecté à aucun négatif et donc aucun courant ne le traverse lui et la valve. Lorsqu'une certaine condition est respectée, l'ECU crée un contact entre le fil et le négatif de la batterie, ce qui permet au courant de passer et à la valve d'effectuer la rotation. Le

réglage de cette condition se fait via le logiciel pe3 de Performance Electronics, le logiciel de l'ECU. Il suffit de régler la sortie numérique (digital output) correspondant sur la condition "RPM" et sélectionner une valeur de RPM à laquelle on veut que la valve tourne et achemine l'air dans l'autre conduite d'admission d'air.

\*"5/2" signifie que l'électrovalve possède 5 ports et 2 positions possibles. Les 5 ports sont : une entrée d'air, deux sorties d'air et deux "exhausts". Les "exhausts" sont les ports par lesquels l'air comprimé compris dans la valve sort lorsqu'un changement de position survient. Les 2 positions sont : envoyer l'air comprimé vers la sortie 1 OU envoyer l'air comprimé vers la sortie 2.

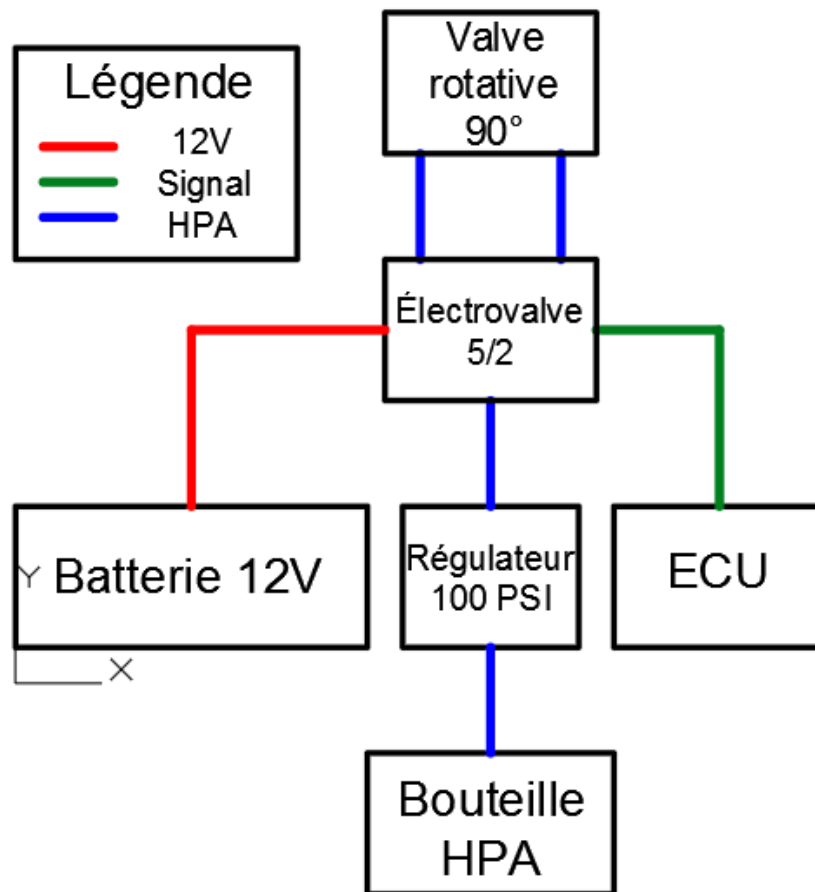


Figure 29 : Schéma de montage de la valve rotative

## Intégration du concept final sur la voiture

L'intégration du prototype final du système d'admission d'air sur la voiture nous a imposé plusieurs contraintes qui n'ont pas rendu possibles tous les concepts. Par exemple, il faut s'assurer que le concept soit fabricable, que l'équipe de la formule ou un commanditaire puisse le fabriquer, qu'il respecte les règlements, qu'il entre dans une zone limitée, qu'il n'obstrue pas l'accès à diverses composantes, qu'il soit le plus léger possible et enfin qu'il résiste aux chargements qu'il est susceptible de subir. Si l'on se réfère au document "Essais expérimentaux" qui accompagne ce rapport, on comprend qu'il est important de respecter trois requis essentiels pour assurer la meilleure performance du moteur testée. Il s'agit, du volume du plénum, de la longueur de la branche primaire et de l'angle formé entre l'entrée et la sortie d'air du plénum. A-t-il été possible de respecter tous ces critères à la fois ? Presque, et les prochaines lignes détailleront pourquoi. Elles serviront également à faire prendre conscience aux étudiants de tous les facteurs entrant en jeux lors de prochains concepts d'entrée d'air. Les facteurs les plus limitants pourront donc être connus dès le départ.

Les règlements qui affectent principalement le système d'entrée d'air sont ceux qui mentionnent que celui-ci doit rester à l'intérieur de "l'enveloppe" de la voiture et qu'il doit être fixé de façon solide à partir du filtre à air jusqu'au moteur. "L'enveloppe" de la voiture est une région délimitée par des segments imaginaires tout le tour de la voiture. Celle-ci dépend de la position des roues et du "main hoop", comme le montrent les deux images plus bas. Le trait oblique est la limite de cette "enveloppe". Bref, la forme du système d'admission d'air doit se conformer à cette contrainte. Ensuite, le second règlement qui aborde les fixations solides est présent pour éviter que les différentes parties se désassemblent et que de l'air puisse entrer librement dans le système d'admission sans passé par la restriction de 20 mm. Un joint un caoutchouc serré avec des collets n'est pas accepté. Aux deux endroits où nous utilisons cette méthode d'assemblage, il fallait rajouter une fixation additionnelle préventive. Ces fixations sont également présentes sur les photos plus bas et leurs dessins techniques sont présentés en annexe. Ces fixations sont en aluminium 6061-T6, ont une épaisseur de 0.061" et ont été découpées à l'eau dans les laboratoires de l'école. La même façon de faire est utilisée pour fixer le "throttle body" au châssis, mise à part que les pièces sont en acier 0.040". Notez que sur les dessins techniques en annexe la totalité des cotes n'est pas présente, car le fabricant n'en a pas besoin pour découper la pièce. Le dessin est uniquement pour lui donner une idée de la forme et des dimensions de la pièce.

Figure 30 : Enveloppe de la Formule, vue de côté

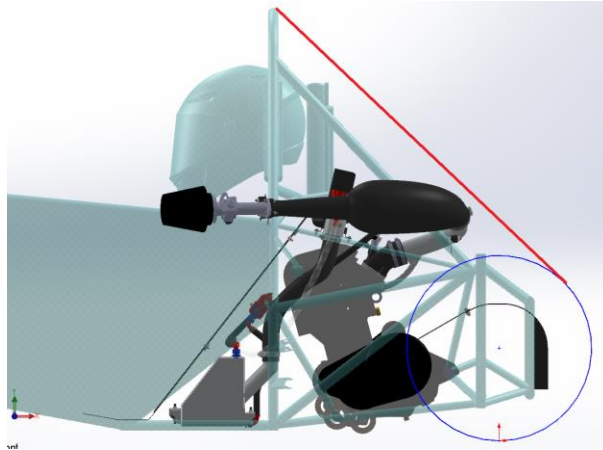
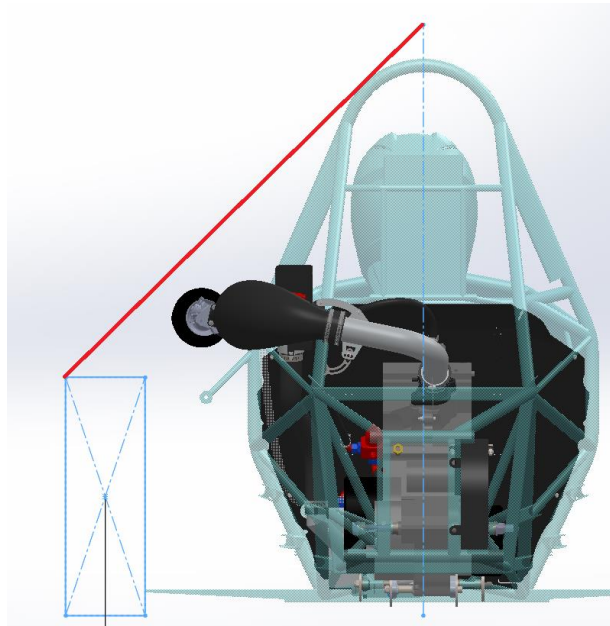


Figure 31 : Enveloppe de la Formule, vue de derrière



Ensuite, à cause des différents systèmes présents sur la voiture, "l'enveloppe" de la formule disponible devient très limitée. De plus, il faut assurer une bonne accessibilité au système pneumatique servant à changer de vitesse et au bouchon servant à remplir le réservoir d'essence. Il faut également que le tube transparent relié au système d'essence soit visible par les juges pour qu'ils puissent bien voir le niveau d'essence. Enfin, nous ne pouvons pas faire un plénum de n'importe quelle longueur. En cas de situation d'urgence, le pilote doit pouvoir sortir de la voiture en moins de 5 secondes. Comme le système d'échappement est situé à droite de la voiture, il doit sortir à gauche, c'est-à-dire du côté du plénum. Celui-ci ne doit donc pas être dans le chemin.

En gardant tout ça en tête, nous avons itéré le modèle 3D du plénum jusqu'à temps de respecter un maximum de critère. Nous avons conservé le volume de 3L, nous avons conservé la longueur de la branche primaire de 325mm, les composantes sont accessibles, le pilote peut sortir sans danger et le système est fixé de façon sécuritaire. Seule différence : l'angle entre la sortie et l'entrée du plénum de 45° est passé à 77°. Comme celui-ci est beaucoup plus proche de 90° que de 45°, nous aurions pu nous attendre à avoir des résultats décevants. Cependant, les tests au dynamomètre ont montré la même courbe de puissance que le plénum à 45°. Ceci est dû au fait que la transition se fait de façon progressive et non abrupte, ce qui facilite le parcours de l'air.

Le dernier point à considérer est les vibrations très fortes sur la voiture due au fait que le moteur est un monocylindre. Pour éviter les vibrations dans le système d'air et de grandes amplitudes de déplacements, le système est maintenu à 2 endroits ; à la jonction entre le "throttle body" et le plénum et à la jonction entre le plénum et la branche primaire. Entre ces points de fixation et le châssis, des amortisseurs en caoutchouc sont présents. Le tout permet au système d'être fixé de façon rigide, tout en n'étant pas affecté par les vibrations à haute fréquence.

*Figure 32 : Installation du plénum final sur la voiture, vue de côté*



Figure 33 : Installation du plénum final sur la voiture, vue de derrière



### Échéancier

Au niveau de la section des composantes externes, voici l'échéancier des étapes principales ayant été utilisé au cours de la session d'hiver 2017. Celles-ci ont été modifiées en raison de divers délais et, entre autres, les essais expérimentaux ont pris la place de tout ce qui était en lien avec le tube d'admission d'air variable.

Tableau 7 : Échéancier prévu pour la session H2017

Tâches	Durée approximative
Fixer le volume de plénum à l'aide d'essais expérimentaux	2 semaines
Fixer les 2 longueurs de branche primaire désirée à l'aide d'essais expérimentaux	2 semaines
Fixer le design de la branche primaire variable	0.5 semaine
Acquérir toutes les pièces manquantes nécessaires (valve, joints toriques)	1 semaine
Fabriquer un prototype de la branche primaire variable	1 semaine
Faire fonctionner la valve avec l'ordinateur de la voiture	0.5 semaine
Tester le fonctionnement complet de la branche primaire variable	2 semaines
Faire améliorations/modifications nécessaires au bon fonctionnement	2 semaines
Fabriquer le design final (plénum + branche primaire)	2 semaines
Installer le système d'admission d'air complet modifié sur la voiture	2 semaines
TOTAL	15 semaines



### Prototypage rapide

Afin de pouvoir faire des tests rapidement et avec une capacité itérative rapide, l'équipe a décidé d'investir dans la remise en fonction d'une imprimante 3D (image ci-contre) qui fonctionne sous le principe de « Fused deposition modeling » (FDM), soit modélisation par dépôt de matériel en fusion.

C'est une imprimante de type « delta » de grande dimension (10,5 pouces de diamètre par 14 pouces de hauteur). Elle est capable d'accueillir la plupart des modèles conçus pour l'entrée d'air.

Cela permet non seulement de fabriquer de grandes pièces, mais aussi lors des tests, s'il y a des bris, il est possible de lancer une impression le jour même et d'avoir une pièce imprimée pour le lendemain. Cela accélère donc le processus de la phase de tests.

De plus, ce type de fabrication permet d'obtenir des géométries qui ne seraient pas réalisables autrement. Cela procure donc une plus grande liberté au design.

Dans un autre ordre d'idées, les pièces imprimées pourraient aussi être utilisées comme moule afin de fabriquer des pièces en composite.

Finalement, le prototypage rapide procure plusieurs avantages qui permettront d'obtenir un produit final meilleur.

### Impressions 3D

L'image ci-contre montre quelques pièces qui ont déjà été imprimées pour la partie expérimental du plenum.

Figure 34 : Imprimante 3D



Figure 35 : Pièces imprimées 3D





## Système d'échappement

### Définition du problème

L'objectif ici est de diminuer la masse du silencieux de la voiture tout en respectant les règles de formule SAE.

Les options explorées étaient de modifier le système existant, acheter un nouveau silencieux ou en fabriquer un nouveau. Il y avait trois contraintes principales qui ont été suivies lors de cette recherche.

*Tableau 8 : Contraintes du silencieux*

Contrainte	Budget	Masse	Sonorité
Valeur	100\$	< 4.2kg	<103 dBC au "idle" <110 dBC à 7000 RPM

Premièrement, il a fallu respecter le budget imposé par la Formule SAE qui était d'environ 100\$. Deuxièmement, il était nécessaire que le nouveau système ait une masse inférieure au silencieux qui était présentement utilisé, donc environ 4.2 kg. Enfin, il était nécessaire que la limite de sonorité imposée par la compétition de la Formule SAE soit respectée. Cette limite est de 103 dBC à bas régime et 110 dbC à haut régime. Si cette limite n'est pas respectée, l'équipe ne peut pas participer aux épreuves dynamiques.

### Théorie

Le système d'échappement a pour but de faire l'évacuation des gaz lors du dernier temps d'un moteur à quatre temps. Il sert également à atténuer le bruit causé par les gaz chauds sortants du moteur et de neutraliser leur toxicité pour les rendre moins nocifs pour l'environnement. Ceci dit, pour atteindre ces standards, les gaz doivent passer par une panoplie d'étape au travers du système.

Tout d'abord, ils vont passer par le collecteur d'échappement. Sa fonction est de collecter les gaz brûlés sortant par les soupapes du moteur et de les acheminer dans un seul conduit. À leur sortie, ils passeront par un détecteur d'oxygène pour déterminer si le ratio carburants/air du mélange dans les cylindres du moteur est adéquat. S'il détecte trop d'oxygène, il va émettre un signal au système de contrôle du moteur pour injecter plus de carburant et s'il en détecte peu, il va en injecter plus. C'est-ce qu'on appelle "closed loop" en calibration de moteur. Le guide du dynamomètre accompagnant ce rapport en fait mention.

Ensuite, les gaz passent dans un convertisseur catalyseur. Son rôle est de diminuer la pollution dans l'air en réduisant ou en détruisant les gaz polluants grâce à un système de catalyse. C'est d'ailleurs à l'aide de métaux précieux comme le platine et le rhodium qu'il va être en mesure de faire son boulot. Il va donc transformer le dioxyde d'azote et le monoxyde de carbone en

substance non polluante. Un détecteur d'oxygène est également installé après celui-ci pour déterminer son efficacité de nettoyage.

Par la suite, ils traversent un résonateur d'échappement qui aura comme but de réduire le son de certaines plages fréquentielles. Les ondes de bruit d'échappement vont passer par la chambre de résonance où une interférence destructive sera créée entre les ondes sonores opposées pour venir atténuer de beaucoup les bruits. Par contre, cette pièce n'est pas présente dans tous les véhicules, mais reste toutefois bien répandue.

Finalement, les gaz vont passer par le silencieux. Celui-ci est destiné à limiter le bruit de la majorité des fréquences sonores. Les paragraphes qui suivent explicitent la théorie derrière le maniement des sons :

Le son provenant du système d'échappement est une onde de pression formée par des impulsions d'air de hautes et basses pressions. Ces impulsions font leur chemin dans les conduits à la vitesse du son. Dans un moteur, les impulsions se créent lorsque les soupapes d'échappement s'ouvrent et laissent passer les gaz à haute pression à travers les conduits du système d'échappement. Les molécules des gaz entrent en collision avec celles à basses pressions, résidant dans les tuyaux, et s'empilent les unes sur les autres. À fur et à mesure, cet empilement va s'étendre jusqu'à la fin du conduit, laissant derrière une zone de basse pression. C'est ainsi que les ondes sonores traversent le tuyau beaucoup plus rapidement et créent le bruit qu'on remarque lorsqu'un silencieux est défectueux ou bien manquant.

Les deux principales caractéristiques d'un son proviennent de sa fréquence et du niveau de la pression de l'air. Plus une fréquence est haute, plus la pression d'air va fluctuer rapidement. Donc, plus le moteur roule à un régime élevé, plus haut le son sera fort et vice versa.

Le premier élément important à retenir ici est que les sons que nous percevons sont la sommation de toutes les ondes sonores frappant notre tympan en même temps. Les oreilles retiennent donc une seule pression d'air à n'importe quel moment. Le deuxième élément est qu'il est possible de concevoir une onde sonore qui est exactement l'opposé d'une autre créant ainsi une interférence destructive. En effet, lorsque deux ondes complètement déphasées s'additionnent, le résultat donne un son nul.

Les concepteurs des silencieux ont utilisé ces principes pour diminuer de beaucoup les sons des véhicules. En effet, en examinant leur structure interne, ils sont composés de tubes et/ou de plaquettes conçues pour faire dévier les ondes entre elles pour les annuler. Trois types de silencieux sont disponibles sur le marché.

Le premier, le silencieux à passage direct est plus fréquemment utilisé lorsque l'on recherche de la performance. Au cœur de celui-ci se trouve un tube perforé entouré de laine en fibre de verre ou en acier pour venir absorber les ondes sonores. N'ayant quasi aucune restriction, la performance du véhicule n'est pas affectée et il permet de faire plus de bruits.

Le deuxième, le silencieux à chicane, permet dépendamment de sa conception, d'avoir une panoplie de son différent. Voici comment ils fonctionnent : les gaz sont acheminés à travers plusieurs chambres et autour d'un certain nombre de plaques angulaires et de plaques d'annulation de son appelée chicane. Avec peu de restriction en cours de route, les débits d'échappement sont augmentés, augmentant ainsi la puissance, le couple et permet de faire une économie de carburant.

Le troisième, le silencieux turbo, permet d'avoir de la performance tout en ayant un son moins fort que celui d'un silencieux à passage direct. Son concept est similaire à celui du silencieux à chicanes, mais se différencie au niveau du nombre de tubes et chicanes que les gaz doivent circuler à travers ou autour.

### Méthodologie de test d'échappement

Dans cette section, la méthodologie utilisée afin de tester et déterminer la solution optimale d'échappement sera présentée. De plus, les décisions prises au cours du projet seront explicitées.

#### Test de son

Les silencieux doivent réduire le niveau du bruit à la sortie de la voiture à une valeur prescrite par les règles. Le test est fait avec un sonomètre quand la voiture est aux différents régimes. Le son est pris directement à la sortie du silencieux.

Selon les règlements de la SAE 2017 :

1. Limite de son au régime ralenti (idle) : 103 dB
2. Autres régimes du moteur : 110 dB

#### Le silencieux original

Nous avons démonté le silencieux original qui vient avec le moteur, puis nous avons été capables de faire le dessin suivant.

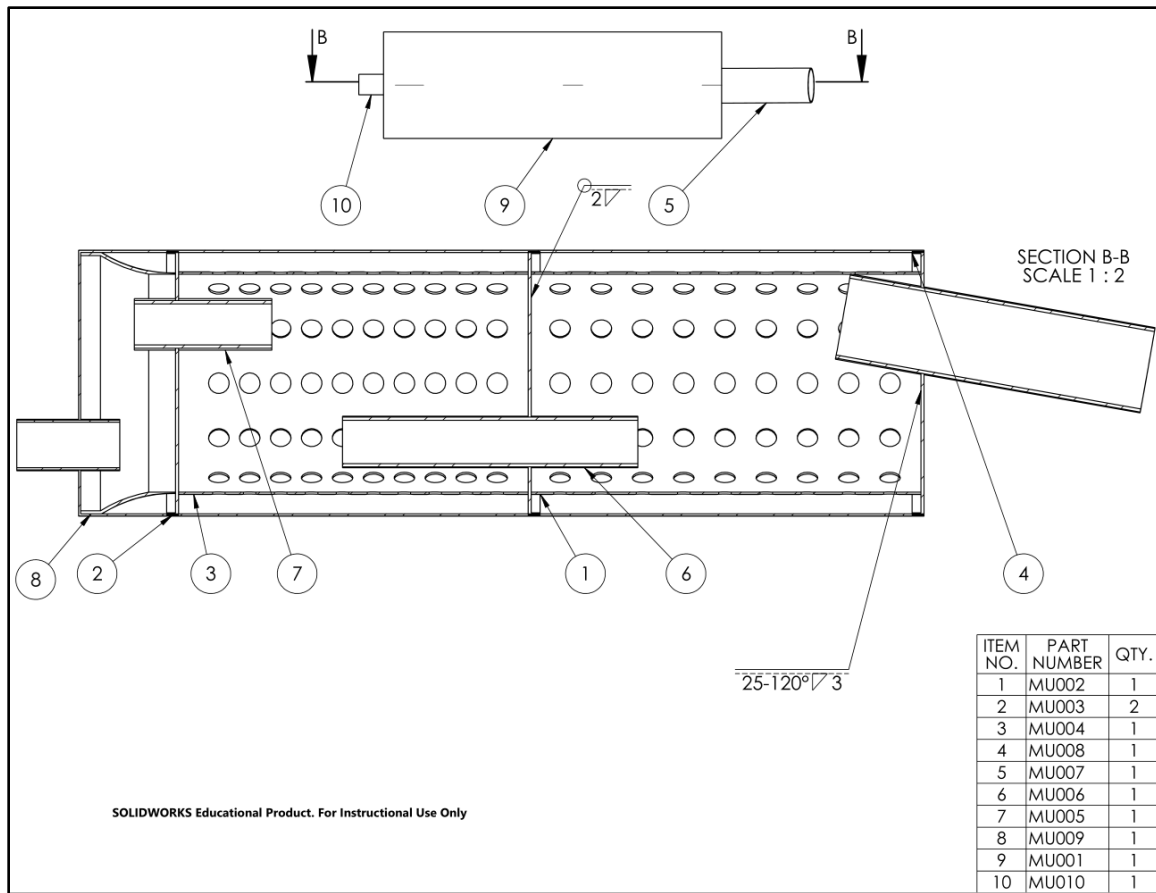


Figure 36 : Design du silencieux original

*Tableau 9 : Caractéristiques du silencieux original*

Masse	4.2 kg
Niveau de son au régime ralenti (idle)	100 dB
Niveau de son aux autres régimes	105 dB

## Conception d'un nouveau silencieux

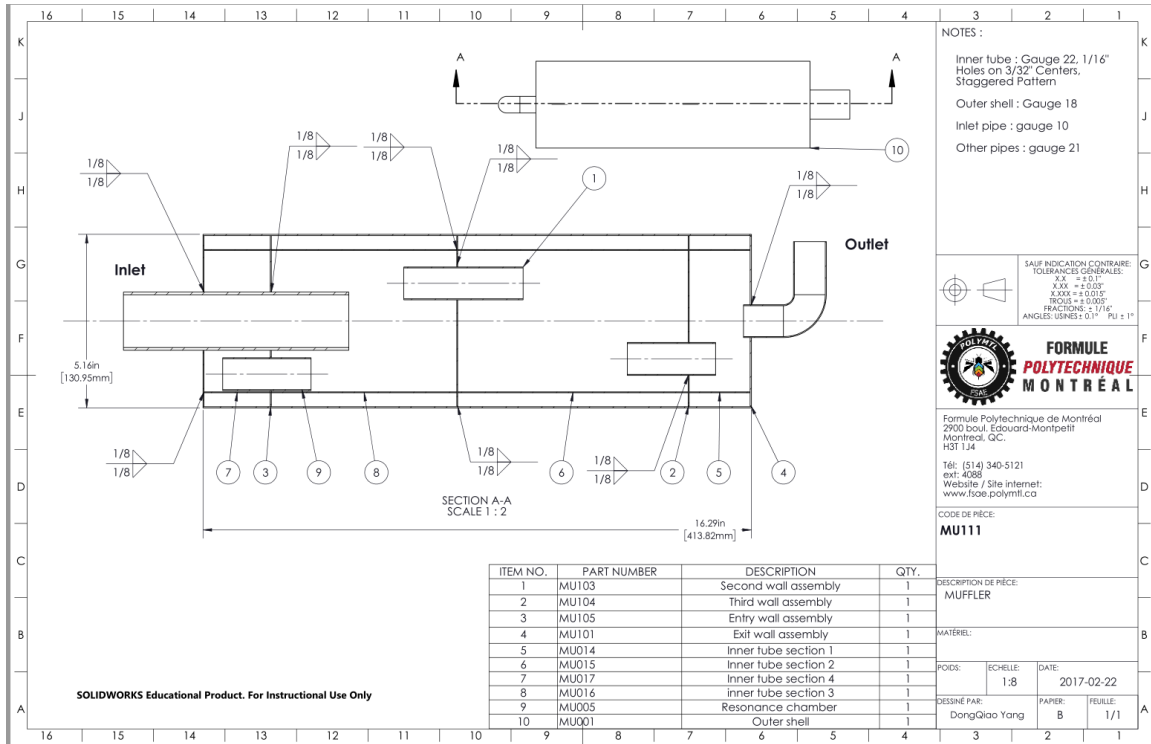


Figure 37 : Design du nouveau silencieux

Dans le nouveau concept, nous sommes restés le plus fidèle possible à la géométrie initiale. Le tuyau d'entrée original en angle a été remplacé par un tuyau droit afin de faciliter la fabrication du silencieux et son intégration à la voiture. Aussi, une nouvelle chambre de résonance a été ajoutée près du tuyau d'entrée afin de diminuer davantage le niveau du son.

Tableau 10 : Paramètres du nouveau design

Paramètres	Valeur	Matériau
Épaisseur de la coque extérieure	0.04 inch/1mm	Acier 2024
Épaisseur de la paroi intérieure	Gauge 22,	McNICHOLS® Quality Perforated Metal, Round Hole, Galvanized G90, 22 Gauge, Mill Finish, 41% Open Area, 1/16" Holes on 3/32" Centers, Staggered Pattern
Épaisseur des tuyaux d'échappement	0.03 inch	Acier 2024
Épaisseur des séparateurs de chambres	0.03 inch	Acier 2024

Masse prédite par le modèle 3D : 2.81kg

## Analyse

### Option 1 : Fabriquer un nouveau silencieux.

Comparé à la masse du silencieux original de 4.2kg, le nouveau design avait le potentiel de diminuer la masse de 1,4 kg, soit 33.3%. Cependant, nous n'avons pas pu fabriquer le silencieux puisque nous étions restreints dans le temps et dans le budget. En effet, nous n'avons malheureusement pas trouvé de commanditaire pour la fabrication de ce dernier. Aussi, par la restriction d'argent, payer pour fabriquer cette pièce dépassait notre budget. De plus, cette option n'offrait aucune garantie que la sonorité du silencieux allait respecter les contraintes imposées par la compétition FSAE.

### Option 2 : Modification du silencieux original

Une autre option pour le projet était la modification de la paroi extérieure du silencieux. En effet, selon les simulations de masse sur CAO, la masse de la paroi extérieure (1mm d'épaisseur) était de 1.3 kg, ce qui représente proche du tiers de la masse du silencieux. Remplacer ce dernier par le même matériel, mais d'une épaisseur plus mince (0.5mm) aurait pu être une option intéressante.

Cependant, on nous a informés lors des visites industrielles que la modification de notre silencieux serait complexe et coûteuse. De plus, le fait d'enlever et remplacer la paroi extérieure de notre silencieux nous fait économiser de la masse, mais n'offre aucune garantie que la limite de son allait être respectée, puisque des changements aux composantes internes modifient directement la sonorité du silencieux. Le risque associé à la fabrication d'un nouveau silencieux était trop élevé et cette option a été rejetée.

### Option 3 : Achat d'un silencieux sur le marché

Ensuite, la prochaine option explorée était d'acheter un silencieux, qu'il soit neuf ou usagé, qui allait respecter les trois contraintes imposées au départ. Après avoir appelé et visité plusieurs usines et distributeurs, nous avons conclu que les deux options les plus fiables étaient un silencieux GSXR 750 acheté chez Moto Recyclage Mtl inc. (10423, rue Éthier Montréal-Nord, QC) au coût de 80\$ et un silencieux en titane acheté chez Kiko Muffler (8532 9e Avenue, Montréal, QC) au coût de 100\$. Le tableau ci-dessous montre les résultats des essais faits sur ces deux modèles :

*Tableau 11 : Évaluation des silencieux*

Silencieux	Contrainte 1 (Budget)	Contrainte 2 (Masse)	Contrainte 3 (Sonorité)
Suzuki GSXR 750	Respectée	Respectée	Non Respectée
Titane KIKO	Respectée	Non Respectée	Non évaluée

Le silencieux Suzuki respectait notre contrainte budgétaire avec un coût de 80\$ et pesait 2.9kg. Cela nous permettait d'avoir une réduction de 1.3kg par rapport au silencieux existant. Par contre, la contrainte de sonorité n'était pas respectée puisque le niveau de son était de 4 dB au-dessus de la limite imposée. À cause que ce silencieux était très léger, il a quand même été retenu par la FSAE comme option pour l'année prochaine, au cas où la limite de son était changée.

Le silencieux en Titane respectait la contrainte budgétaire avec un coût de 100\$. Par contre, ce système pesait 4.6 kg, ce qui dépassait le poids du système présentement en place sur la voiture de compétition de 0.4kg. Suite à cette réalisation, cette solution a été rejetée et le silencieux a été retourné au fournisseur.

Pour conclure, la solution qui a été choisie était de garder le silencieux qui était présentement sur la voiture puisqu'une solution n'a pas pu être trouvée avec les contraintes qui nous étaient imposées.

## Section composantes internes

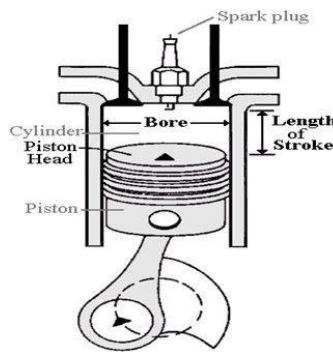
Maintenant que toutes les composantes se trouvant à l'extérieur du moteur ont été traitées, les composantes internes à celui-ci seront abordées. La modification des composantes internes permet de modifier le couple produit par le moteur sans ajouter de masse ou de complexité au système. En venant modifier seulement certaines pièces, il est possible d'aller chercher des gains considérables en performance pour la Formule. La section suivante présente d'abord la théorie de fonctionnement des différentes composantes puis lesquelles ont été modifiées dans le cadre du projet.

### Théorie

#### Augmentation de la cylindrée

Chaque moteur est qualifié par la dimension de sa cylindrée, qui détermine le volume d'air qui peut entrer dans le moteur à chaque cycle. En augmentant la largeur de l'alésage (*Bore*), la cylindrée est elle aussi augmentée et le moteur peut produire plus de couple à chaque cycle.

*Figure 38 : Image représentant l'alésage «bore» d'un cylindre*



Les avantages d'une telle opération consistent en une augmentation considérable de la puissance de manière assez simple, sur un bloc moteur donné. De plus, l'alésage d'un cylindre peut se faire afin de réparer la paroi interne qui aurait été endommagée par une défaillance mécanique.

Toutefois, l'augmentation de la cylindrée par alésage apporte son lot de désavantage. Bien qu'elle constitue une façon d'améliorer significativement les performances du moteur, la consommation d'essence augmente aussi, et il faut modifier de nombreuses composantes majeures comme le piston et le vilebrequin. De plus, BRP mentionne que son bloc moteur ainsi que différentes composantes ne sont pas assez solides pour prendre les vibrations et le couple produit par une augmentation de la cylindrée. De plus, l'écoulement d'air peut être affecté.

L'équipe a donc décidé d'écarter à court terme l'option du «boring», car le gain de performance comparativement à la complexité et au coût n'est pas bénéfique. De plus, les coûts qu'engendrerait une telle opération sont très importants, compte tenu du fait qu'il faut repercer le cylindre, changer le piston, bielle et vilebrequin.



### Modification de la tête

Plusieurs études ont été effectuées afin de mieux comprendre l'écoulement de l'air dans les conduits d'entrée et comment celui-ci affecte le rendement du moteur. Une étude réalisée par S.A Sulaiman dans l'International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME) a permis de démontrer qu'un écoulement turbulent à l'entrée des ports serait favorable pour l'homogénéisation du mélange carburant/air dans le cylindre. Ainsi, un meilleur mélange augmenterait la performance générale du moteur. Afin d'obtenir un écoulement turbulent du fluide, son nombre de Reynold doit augmenter. Sachant que ce nombre est caractérisé par la formule suivante :

$$Re = \frac{(V * D)}{\frac{\mu}{\rho}}$$

$\mu$  et  $\rho$  (**viscosité et densité**) sont des paramètres physiques non modifiables propres au fluide. Il en convient que pour augmenter le nombre de Reynold et par le fait même la turbulence du fluide, il faut modifier le diamètre et la vitesse. Étant donné que la vitesse et le diamètre sont deux variables liées entre elles par l'équation de continuité, le fait de varier l'un fait aussi varier l'autre. Ainsi, le débit volumique peut s'écrire comme suit :

$$Q = A_1 * V_1 = A_2 * V_2$$

L'aire d'un cylindre est définie par :

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Donc, prenons un exemple où le port d'entrée du moteur possède un diamètre  $D_1$  et dont la vitesse d'écoulement de l'air est définie par  $V_1$ . Si l'on diminue le diamètre du port pour qu'il soit plus petit par exemple :

$$D_2 = \frac{D_1}{2}$$

Alors la vitesse de l'air en est modifiée. En effet, le débit volumique reste constant, car il est caractérisé par le rendement volumétrique interne du moteur. Ainsi on obtient l'équation suivante :

$$\frac{\pi D_1^2}{4} * V_1 = \frac{\pi D_1^2}{16} * V_2$$

$$V_2 = 4 * V_1$$

Par conséquent, on peut remarquer que si le diamètre du port diminue de moitié, alors la vitesse de l'air est augmentée de quatre fois. Ainsi, le nombre de Reynold double. C'est pourquoi le fait d'ajouter de la matière afin de réduire le diamètre à l'entrée des ports est une modification que l'on pense plutôt bénéfique quant aux performances du moteur. Un diamètre trop petit peut toutefois créer une restriction indésirable.

### Arbre à cames

Le profil des cames et leur calage sont une des premières choses que les écuries de course attaquent lorsque vient le temps de modifier un moteur. Ces modifications peuvent permettre d'aller chercher des gains de puissance et modifier la courbe de couple. Le profil des cames contrôle la durée de l'ouverture des soupapes. Avant d'aller plus loin, il convient de définir quelques termes et de comprendre l'influence du calage et du profil de cames sur les performances. Le point mort haut (PMH) correspond au point le plus haut où le piston peut se trouver. À l'inverse, le point mort bas correspond au point le plus bas où un piston peut descendre. C'est à un point mort que le piston s'arrête pour repartir en sens inverse. Voyons maintenant à quelle position devraient être les soupapes à différents moments dans le cycle de combustion.

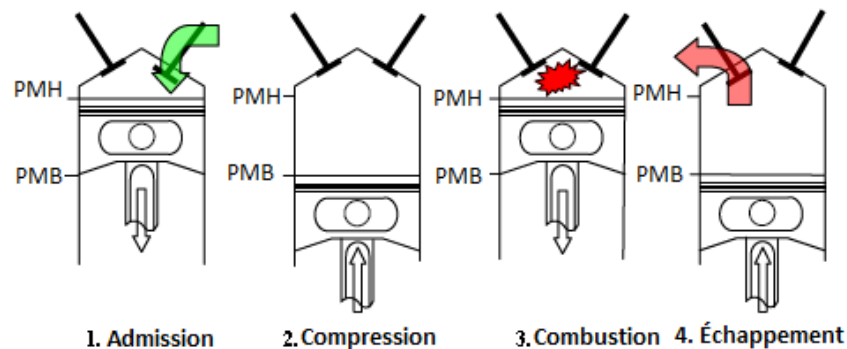


Figure 39 : Illustration du cycle des arbres à cames

Au premier temps, à l'admission, le piston est au PMH, les soupapes d'admission s'ouvrent à ce moment alors que les soupapes d'échappement sont déjà fermées. Le piston descend en créant une passe pression dans le cylindre. L'air continue d'entrer jusqu'à ce que le piston atteigne le PMB, à ce moment les soupapes d'admission se ferment.

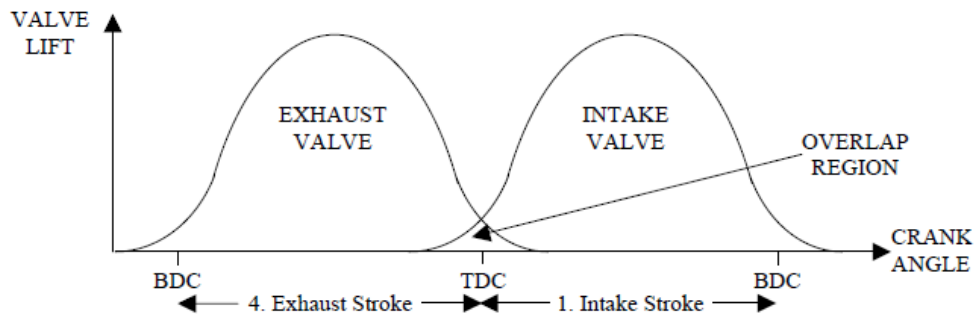
Au deuxième temps, la compression, toutes les soupapes sont fermées. Le piston part du PMB et monte jusqu'au PMH en comprimant le mélange air essence.

Au troisième temps, la combustion est initiée par la bougie d'allumage lorsque le piston arrive au PMH. L'expansion des gaz due à la chaleur pousse le piston vers le bas jusqu'au PMB.

Finalement au quatrième temps, l'échappement, les soupapes d'échappement s'ouvrent lorsque le piston est au PMB. Elles restent ouvertes pendant la remontée du piston et se ferment lorsque le piston atteint le PMH.

Ainsi, le piston effectue 2 cycles (montée-descente) pour chaque cycle des soupapes. La position du piston s'exprime généralement en degré de rotation du vilebrequin sur le cycle où les valves sont effectivement activées. En réalité, l'ouverture et la fermeture des soupapes ne suivent pas exactement le comportement énoncé plus haut. Ces événements se produisent plutôt avant et après le PMH et le PMB comme on peut le voir dans la figure ci-dessous.

Figure 40 : Position des soupapes



Le décalage du moment de l'ouverture et de fermeture avec les points morts affecte grandement les performances du moteur en fonction du régime, c'est ce qu'on appelle le calage des soupapes. Regardons de plus près l'impact d'une modification du calage des soupapes pour chaque évènement.

#### Ouverture des soupapes d'échappement

Lors de l'ouverture des soupapes d'échappement, la pression dans le cylindre diminue. On désire faire diminuer cette pression au plus bas possible, ceci est possible en ouvrant les soupapes avant le PMB. En revanche, on tire le travail du moteur par la force que cette pression exerce sur le piston, pour que ce travail soit maximal on doit ouvrir les soupapes d'échappement après le PMB. Le moment d'ouverture doit donc optimiser le travail qu'on tire du moteur et la plus basse pression atteinte dans le cylindre.

Le moment d'ouverture est un compromis qui varie en fonction du régime. Devancer l'ouverture permet à la pression de descendre plus bas, spécialement à haut régime, et donc d'augmenter le couple à haut régime. À l'inverse, retarder l'ouverture permet d'aller chercher un maximum de travail. Comme à bas régime la pression descend plus rapidement, cette solution permet d'augmenter le couple à bas régime.

#### Fermeture des soupapes d'échappement

Le moment de fermeture des soupapes d'échappement contrôle la quantité de gaz brûlés restant dans le cylindre. Pour minimiser cette quantité, on voudrait que les soupapes restent ouvertes le plus longtemps possible. Toutefois, lorsque le piston commence à redescendre, il fait diminuer la pression et tire de l'air et des gaz brûlés si les soupapes sont encore ouvertes. Réutiliser des gaz brûlés permet de réduire les émissions polluantes et améliore l'efficacité de la combustion, mais fait diminuer le couple produit.

Ainsi, retarder la fermeture des soupapes réduit les émissions et augmente l'efficacité à bas régime. En contrepartie, le couple maximal à plein régime est diminué. À l'inverse, avancer la fermeture augmente les émissions, mais permet de tirer un maximum de puissance à plein régime.

### Ouverture des soupapes d'admission

Ouvrir avant le PMH permet de faire entrer un maximum d'air dans le cylindre, mais ouvrir trop tôt permet aux gaz brûlés de retourner en partie dans l'entrée d'air. Cela provoque la réutilisation de gaz brûlé qui a les effets discutés plus haut.

L'ouverture tardive des soupapes d'admission limite la quantité d'air qu'il est possible de faire entrer dans le cylindre. En revanche, elle assure que moins d'air passe directement de l'admission à l'échappement, surtout à haut régime où la vitesse de l'air est élevée.

En bref, avancer l'ouverture permet de faire entrer plus d'air lorsque le régime du moteur est bas. Retarder l'ouverture peut améliorer la puissance à haut régime en limitant la quantité de gaz brûlé qui va en direction de l'admission. Aussi, puisque la durée de croisement est plus petite, à haut régime, moins d'air sera porté à passer directement de l'admission à l'échappement.

### Fermeture des soupapes d'admission

La fermeture des soupapes d'admission contrôle aussi la quantité d'air dans le cylindre. En retardant la fermeture, cette quantité augmente jusqu'au point où de l'air est repoussé dans l'entrée d'air. En faisant entrer plus d'air, le moteur est plus efficace.

Généralement, on voudrait que le temps de fermeture augmente avec le régime pour capturer un maximum d'air et donc un maximum de puissance.

### Piston haute compression

Le piston permet d'effectuer le cycle thermodynamique Otto représenté à la figure suivante :

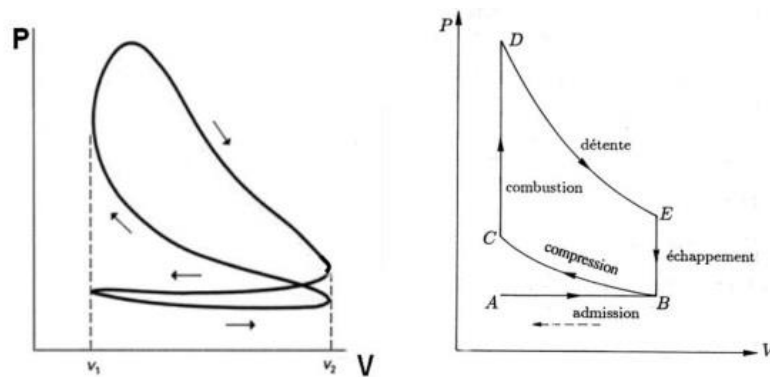


Figure 41 : cycle thermodynamique Otto

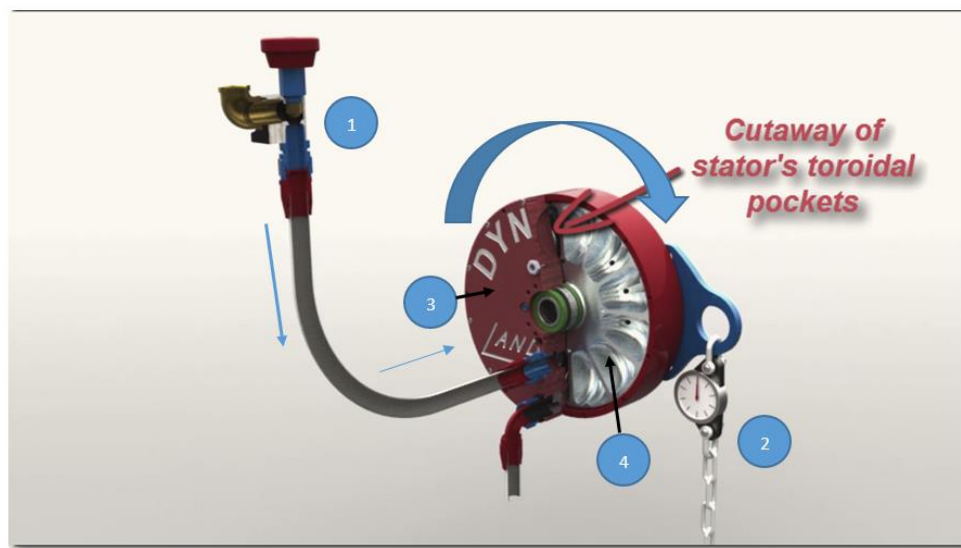
Dans leur rapport, l'équipe de 2014-2015, avait obtenu une commandite de Wiseco et proposait d'utiliser leur piston haute compression de ratio 13 :1. Cette compagnie se spécialise dans la fabrication de pistons de haute performance et le ratio a été choisi afin de permettre à l'équipe de continuer d'utiliser une essence à indice d'octane de 94. En effet, un taux de compression plus élevé augmente la température dans la chambre de combustion et nécessite donc un indice d'octane plus élevé.

## Le dynamomètre

Afin de mesurer le couple du moteur et obtenir des résultats expérimentaux, l'équipe a utilisé un dynamomètre à eau de marque *Land & Sea*.

La fonction principale du dynamomètre est de mesurer la puissance et le couple du moteur afin de quantifier chaque modification effectuée sur celui-ci. Ainsi, il sera possible de déterminer si la modification apporte des gains notables ou à l'inverse, diminue la performance. De plus, cet outil nous permet de valider certaines hypothèses théoriques quant à certaines modifications. Par exemple, dans le cas du "porting", il est possible de valider si le fait de diminuer le diamètre des ports augmente l'homogénéisation du mélange par l'intermédiaire et ainsi augmente le rendement du moteur. Ou, si le fait de changer la came d'entrée d'air avec la came de sortie d'air permet d'augmenter la puissance du moteur en haut régime.

Figure 42 : Fonctionnement du dynamomètre à eau



Un dynamomètre peut ressembler en quelque sorte à une pompe inefficace qui utilise la puissance transmise par le moteur afin de faire tourner le rotor (4) de celui-ci et ainsi de faire circuler de l'eau. Cette eau provient d'un réseau d'eau refroidi contrôlé par un actuateur électrique (1) et agit comme une charge pour le moteur. En effet, la géométrie particulière des poches du dynamomètre permet avec la force centrifuge de faire percuter les particules d'eau sur une surface qui est fixée au châssis (stator) et qui induit par le fait même un couple. Ce couple est lu par l'intermédiaire d'une cellule de charge qui elle aussi est fixée au châssis (2) et c'est ce dernier qui permet de mesurer le couple et la puissance du moteur. En d'autres mots, si l'on augmente la quantité d'eau qui entre à l'intérieur du rotor, la charge sera plus grande, et donc le couple lu par la cellule de charge sera plus grand également. Ceci a pour conséquence de faire diminuer la vitesse de rotation du moteur (rpm) puisqu'un supplément d'eau induit une résistance supplémentaire au vilebrequin. À l'inverse, si l'on diminue la quantité d'eau dans le rotor, la charge diminue et la vitesse de rotation du moteur augmente.

Pour résumer, si l'on cherche à déterminer le couple exercé par le moteur pour un certain régime donné, la quantité d'eau à fournir doit permettre au moteur de garder ce régime constant afin d'obtenir un équilibre. Il en résulte que l'on peut lire la valeur du couple du moteur directement à partir de la cellule de charge et l'on peut obtenir la puissance du moteur par la formule suivante :

$$Puissance (Hp) = \frac{Torque (Lbs - ft) \times RPM}{5252}$$

Tous les tests expérimentaux ont été effectués sur ce dynamomètre, une méthodologie a aussi été élaborée afin d'obtenir les résultats les plus précis possible.

## Analyse de risque

Dans les grands projets, les risques sont toujours présents. Afin de bien les contrôler, il est nécessaire d'en faire une analyse approfondie. Ainsi donc, avant de conclure, la section qui suit présentera les risques du projet de développement moteur et ils seront traités en catégorie et plus en détail.

### Analyse de criticité

Premièrement, les risques de ce projet sont évalués par la méthode de l'analyse de criticité. Celle-ci requiert de connaître la probabilité d'occurrence, la gravité et la probabilité de non-détection. Il est important de faire cette analyse afin de mettre les efforts aux bons endroits pour en atténuer les risques. Le tableau suivant montre les risques jugés acceptables et inacceptables.

Tableau 1 : Analyse de criticité

		Gravité			
		Insignifiant	Mineur	Critique	Catastrophique
Probabilité	Très probable	Acceptable	Inacceptable	Inacceptable	Inacceptable
	Probable	Acceptable	Inacceptable	Inacceptable	Inacceptable
	Peu probable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable
	Improbable	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable

Ce tableau montre les risques qui nécessitent plus d'attention de la part de l'équipe. En effet, les risques de gravité insignifiante ne sont pas pris en compte et il n'y a pas d'actions prises à leurs égards. L'équipe de la Formule SAE et de PI4 ont de fortes capacités de résolution d'incidents. Alors, les risques insignifiants sont acceptés à faible proportion dans ce projet puisqu'une solution peut être trouvée pour chacun d'eux. De plus, tous les risques "Peu probables" et "Improbables" sont laissés de côté, étant donné que l'équipe ne compte pas rencontrer de tels incidents à l'intérieur de la durée du projet, soit huit (8) mois. Les risques mineurs à catastrophiques qui sont "probables" à "très probables" ralentirait beaucoup trop le projet. Ceci aurait une forte influence sur les coûts et les délais et c'est pour cette raison que l'équipe s'efforce d'éviter tous types de risques qui se retrouvent dans cette catégorie.

La formule qui permet d'évaluer la criticité est la suivante :

$$C = P * G * D$$

Où *P* est la probabilité, *G* la gravité et *D* la probabilité de non-détection.

Cette méthode de détection de risques étant fiable, elle permet de tolérer des risques ayant des gravités extrêmes, si toutefois ils peuvent être détectés. Par gravité extrême, il est question d'endommagement irréversible du moteur. Dans un tel projet, il est obligatoire de courir certains risques puisque, sans eux, il serait impossible d'améliorer les performances du moteur.

## Risques humains

La sécurité des individus est considérée comme très importante dans ce projet. Si les membres de l'équipe ne se sentent pas en confiance et en sécurité lorsqu'ils effectuent des tâches pour le projet, ils ne devraient pas les effectuer.

Les plus grands risques humains surviennent dans la salle du banc d'essai moteur. C'est pour cette raison que des listes de vérification ont été implantées dans les procédures d'utilisation du banc d'essai. En effet, il y a désormais une liste de vérification avant et après la mise en marche du moteur. Celles-ci permettent de s'assurer que tous les éléments de risque de blessure sont éliminés.

Aussi, une grande amélioration au niveau du câblage électrique a été apportée afin de minimiser les risques de feu par contact d'étincelle à essence.

De plus, toutes les commandes pour actionner le moteur sur le banc d'essai sont placées à l'extérieur de la salle. Cela permet de diminuer davantage le risque humain.

Afin de diminuer les inhalations de gaz toxiques, une amélioration a été apportée au niveau du conduit d'échappement. En effet, il a été mieux isolé avec du silicone pour bloquer les fuites. Ainsi, lors de longues séances de banc d'essai, les membres peuvent respirer de l'air meilleur.

## Risques financiers

Les bris matériels sont le plus grand risque financier du projet. Effectivement, les pièces de remplacement moteur sont non seulement chères, mais elles peuvent aussi coûter cher en main-d'œuvre si l'équipe n'est pas qualifiée pour effectuer les réparations elle-même.

Afin de diminuer les risques de bris matériel, l'équipe suit à la lettre les spécifications du manufacturier lorsque des modifications sont effectuées sur le moteur. Ainsi, le moteur est théoriquement remonté parfaitement, et les bris ne pourraient pas être issus d'une erreur humaine. Aussi, des listes de vérification du moteur et dynamomètre ont été implantées afin de minimiser les risques de bris matériel lors de l'utilisation. De plus, de l'instrumentation est installée sur le moteur afin de détecter les anomalies. Ainsi, il est possible de détecter et de prévenir certains bris potentiels.

En dernier recours, l'équipe de la formule SAE se porte volontaire pour absorber tous les dépassements de budget qui surviendrait à cause de problèmes majeurs.

## Risque de non-respect des échéanciers

Le principal but de ce projet est de permettre une amélioration des performances du moteur pour la Formule SAE aux prochaines compétitions. La première compétition étant en début mai, il est important de finir tous les essais expérimentaux le plus tôt possible afin de permettre à l'équipe d'effectuer ses essais avec la voiture complète et le moteur amélioré.

En effet, plusieurs petits incidents ou bien un grand incident peuvent provoquer de grands retards importants. Tout cela à cause du fait que les tests du moteur sont séquentiels donc tous les



retards s'accumulent. Ceux-ci n'empêcheraient cependant pas à la Formule SAE de participer à ses compétitions, toutefois elle perdrait du temps de tests, donc de préparation de la voiture aux compétitions.

D'autres circonstances hors de notre contrôle sont les délais occasionnés par les commanditaires ou bien les fournisseurs de pièces. Ceux-ci nous donnent les pièces ou effectuent le travail au rythme qui leur convient et nous devons nous y adapter.

### Risque environnemental

Une des facettes de l'optimisation du moteur gardée plus discrète tout au long du projet est l'amélioration de son rendement. C'est-à-dire, d'augmenter ses performances tout en diminuant son empreinte écologique. En effet, une des épreuves des compétitions de Formule SAE est « L'Économie d'essence ». Celle-ci vaut 10% des points de la compétition, ce qui est tout à fait non négligeable. Le projet se voit donc opter pour la voie verte et rend le moteur plus efficace en modifiant les pièces moins performantes. Ces modifications permettent un meilleur ratio air à essence, ce qui implique une diminution des gaz à effet de serres et de produits toxiques dans l'atmosphère.

L'ancien projet d'optimisation moteur avait permis de remporter une première place à l'épreuve d'économie d'essence à la compétition Formula North à Barrie en Ontario en 2016. C'est sur cette lancée que l'équipe continue d'améliorer le rendement du moteur.

De plus, lors de l'utilisation du moteur ou bien lors des modifications, plusieurs produits chimiques sont utilisés. L'équipe s'engage donc à disposer des liquides usés aux endroits sécuritaires pour l'environnement.

Un autre aspect environnemental important est le bruit. Étant donné que la salle du banc d'essai est située à l'intérieur de l'école et que le moteur est de type « combustion interne », le bruit généré peut être ennuyant. C'est pour cette raison que l'équipe s'est engagée à effectuer ses essais sur le moteur au moment où cela dérange le moins possible la communauté de l'école.

## Conclusion

L'objectif de ce projet était d'améliorer la puissance du moteur de la formule SAE en général, mais principalement dans une plage exploitée par le pilote. Pour ce faire, plusieurs aspects variés ayant un impact sur le moteur ont été pris en considération, passant de l'entrée d'air jusqu'à la sortie des gaz par le tube d'échappement. Au final, qu'est-ce qui a été officiellement validé et implanté pour la formule 2017 et quels ont été les résultats de ces modifications ?

Le système d'admission d'air a maintenant un angle de divergent de  $8^\circ$  qui conserve l'écoulement d'air laminaire et qui évite une chute de puissance brusque à haut régime. Il possède un volume de 3 litres qui offre un meilleur rendement ainsi qu'une longueur de tube d'admission de 325 mm qui permet de décaler le maximum de puissance du moteur vers la gauche, dans la zone exploitée en majorité du temps par le pilote. La courbure dans le plenum assure une transition douce qui évite toute perturbation de l'écoulement d'air.

La modification de la tête du moteur a permis un décalage de la courbe de puissance vers le haut, alors que le calage des soupapes a donné des résultats plutôt décevants. Le piston haute compression, selon la théorie, donne des résultats intéressants, mais n'a pas pu être implanté sur la voiture. Le conduit d'échappement est resté le même en raison des règlements liés aux limites de son très contraignantes et au manque de commanditaire pour la réalisation d'un nouveau système plus léger. Enfin, les analyses sur Ricardo ne sont pas fiables, alors que celles-ci ne reflètent pas totalement les résultats mesurés au dynamomètre. BRP ne peut pas nous fournir d'information quant au modèle de combustion. Nous pouvons donc utiliser le modèle pour prévoir l'impact de certains changements, mais pas pour obtenir des valeurs sûres. Il faut également que les prédictions de changements ne soient pas en lien avec le modèle de combustion pour qu'un impact plutôt fiable soit notable.

Ce qui, selon nous, offrirait le meilleur rapport gain/effort dans le futur serait l'implantation d'un tube d'admission variable, un piston haute compression ainsi qu'un système d'échappement plus léger. Toutefois, pour une courbe de puissance comme la nôtre, c'est-à-dire un plateau entre 6500 RPM et 9000 RPM, un tube d'admission variable ne serait pas tellement bénéfique, car son intérêt était justement d'offrir ce genre de plateau.

Enfin, on rappelle ici deux courbes intéressantes présentées dans le document "essais expérimentaux" qui résument assez bien le projet. Sur la première, on peut voir la courbe de puissance du moteur suite aux modifications comparées à celle du moteur de l'an dernier. On voit très bien la hausse de puissance autour de 7000 RPM et le plateau au détriment de plus de puissance à très haut régime, dans une zone très peu utilisée. Selon les pilotes ayant été présents lors des deux années précédentes, le moteur actuel a plus de couple qu'au paravent et est plus facile à piloter. Ensuite, sur la seconde courbe, on voit la puissance du moteur suite à ce projet comparé à la puissance suite au projet IV de 2014. Cette fois-ci, c'est de la puissance à haut régime que l'on gagne. Le pilote se trouve régulièrement autour de 8500 RPM, donc il est quand même important de ne pas trop négliger cette plage.

Bref, il s'agit toujours d'une question de compromis. Souvent des gains à un endroit sont des pertes à un autre endroit. Ce projet a été réalisé avec l'optique de maximiser les points en compétition. Nous avons donc pris des décisions et favorisé l'amélioration de certains paramètres en croyant que c'était le bon choix pour l'équipe. En mai 2017 se tiendra la première compétition de l'année. C'est à ce moment que réellement nous pourrons voir si le projet a été un succès et que les efforts ont été mis aux bons endroits.

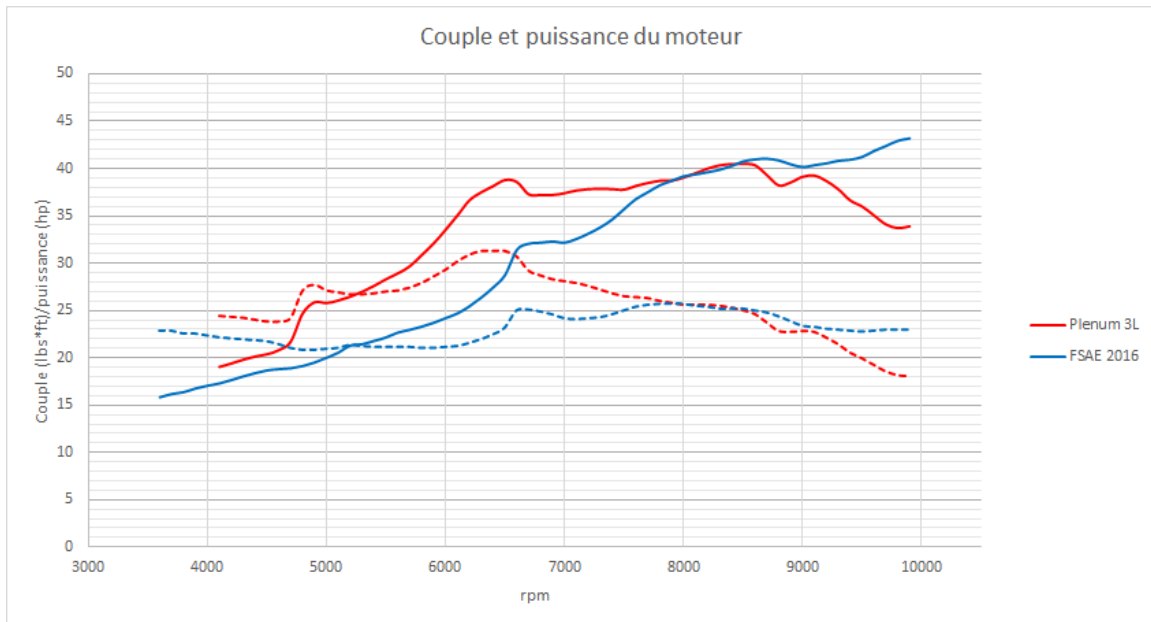


Figure 43 : Comparaison du couple et de la puissance du moteur entre le plenum 3L du PI4 2017 et le plenum de 2016

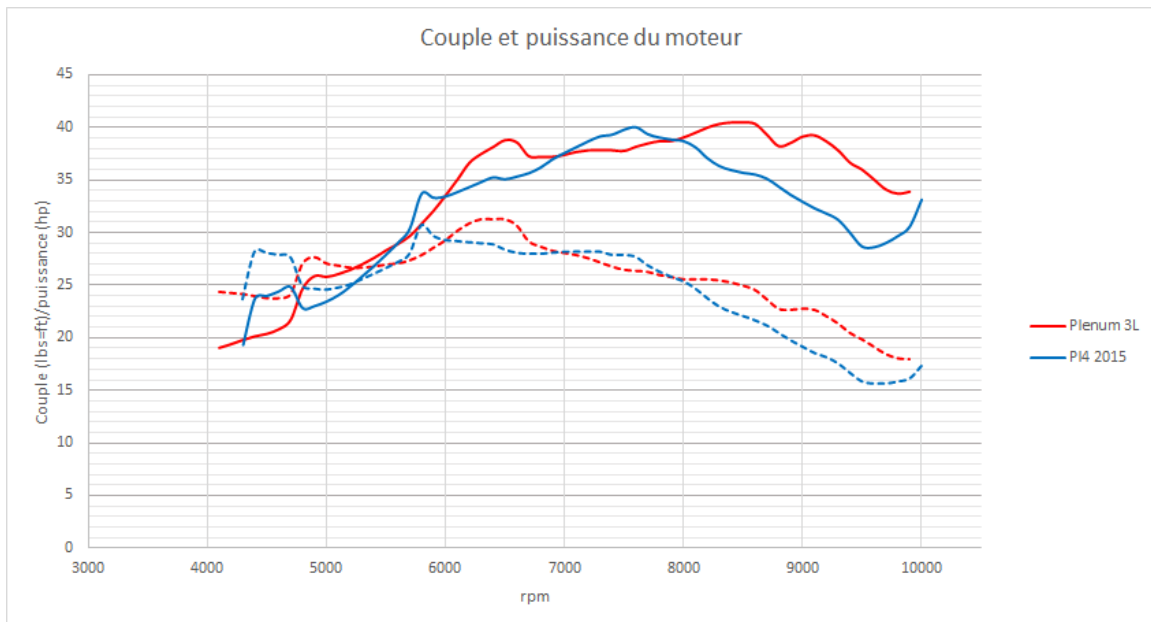


Figure 44 : Comparaison du couple et de la puissance du moteur entre le plenum 3L du PI4 2017 et le plenum du PI4 de 2015

# Bibliographie

Mechadyne. (n.d.). *The impact of valve events upon performance and emissions* . Retrieved from Mechadyne-int: <https://www.mechadyne-int.com/app/uploads/2015/05/the-impact-of-variable-valve-actuation-on-engine-performance-and-emissions.pdf>

*Mechanics of sound transmission*. (n.d.). Retrieved from Neurophys: <http://www.neurophys.wisc.edu/h&b/textbase/s1-p2.html>

S. A. Sulaiman, S. H. (n.d.). *STUDY OF FLOW IN AIR-INTAKE SYSTEM FOR A SINGLE-CYLINDER*. Retrieved from International Journal of Automotive and Mechanical Engineering: [http://ijame.ump.edu.my/images/Volume\\_1/S.%20A.%20Sulaiman%20et%20al.pdf](http://ijame.ump.edu.my/images/Volume_1/S.%20A.%20Sulaiman%20et%20al.pdf)

Ross, A. (2015) *Contrôle du bruit des systèmes mécanique (MEC6214A)* Tiré des cours du le site [www.polymtl.ca](http://www.polymtl.ca) [En ligne]

*Résonance de Helmholtz*. (2014, 10 3). Consulté le 11/29/2014, sur Wikipedia: [http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sonance\\_de\\_Helmholtz](http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sonance_de_Helmholtz)

# ANNEXE


## Annexe A : Simulation de l'angle de divergence

Cette annexe a pour but d'expliquer en détail les étapes des simulations effectuées sur le logiciel Star-CCM+ dans le but de déterminer l'angle de divergence optimale du diffuseur. Nous commencerons par présenter la physique du problème (conditions limites, modèles utilisés, etc). Par la suite, nous montrerons le maillage généré pour, finalement, présenter les résultats.


### Le modèle

Comme nous l'avons déjà mentionné, le but est de déterminer l'angle optimal nous permettant de diminuer la perte de charge à travers la restriction et le diffuseur pour nous permettre d'avoir le maximum de pression dans le plénum. Pour ce faire, il nous faut faire un choix judicieux de conditions limites pour le modèle. Étant donné que la valeur qui nous intéresse est la perte de pression, nous fixerons un débit à la sortie du diffuseur et ce débit sera le même pour chaque cas. Pour trouver le débit à imposer, nous utiliserons la condition d'étouffement ("Choking condition" en anglais) soit le pire cas acceptable. Un résumé des équations est disponible à la Figure 45.

Figure 45 : Résumé des calculs du débit d'un écoulement étouffé



### Mass Flow Choking



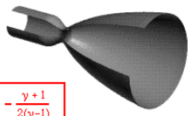
A = Area    R = Gas Constant    V = Velocity     $T_t$  = Total Temperature  
 $\rho$  = Density     $\gamma$  = Specific Heat Ratio    M = Mach     $p_t$  = Total Pressure

Mass Flow Rate:     $\dot{m} = \rho V A$

For an ideal compressible gas:

$$\dot{m} = \frac{A p_t}{\sqrt{T_t}} \sqrt{\frac{\gamma}{R}} M \left( 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$

Mass Flow Rate is a maximum when  $M = 1$   
At these conditions, flow is choked.

$$\dot{m} = \frac{A p_t}{\sqrt{T_t}} \sqrt{\frac{\gamma}{R}} \left( \frac{\gamma+1}{2} \right)^{-\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}$$


(source: NASA, tiré de: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/mfchck.html>)

Dans notre cas,

$$M = 1,$$

$$A = 0.001256 \text{ m}^2, \text{ (restriction de 20mm)}$$

$$p_t = 101325 \text{ Pa}$$

$$T_t = 300 \text{ K}$$

$$R = 0.286 \text{ Kj/KgK}$$

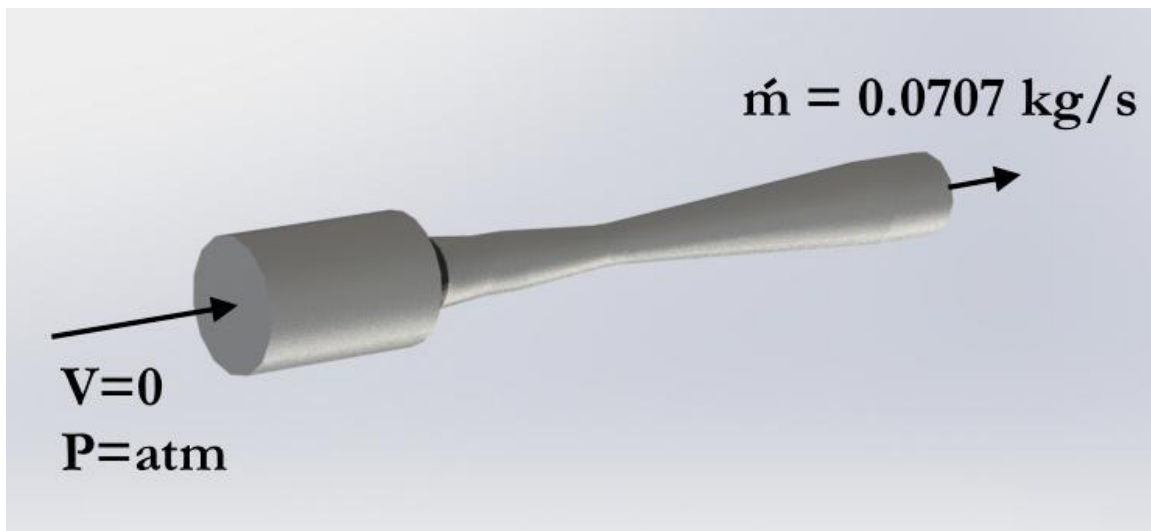
$$\gamma = 1.4$$

On obtient donc un débit massique de

$$\dot{m} = 0.0703 \text{ Kg/s}$$

Ce débit nous servira de condition à la sortie du modèle. À l'entrée, nous utiliserons la condition de stagnation ( vitesse nulle et pression statique nulle ). Une représentation du modèle est disponible à la Figure 46

Figure 46 : Conditions limites pour le modèle de simulation

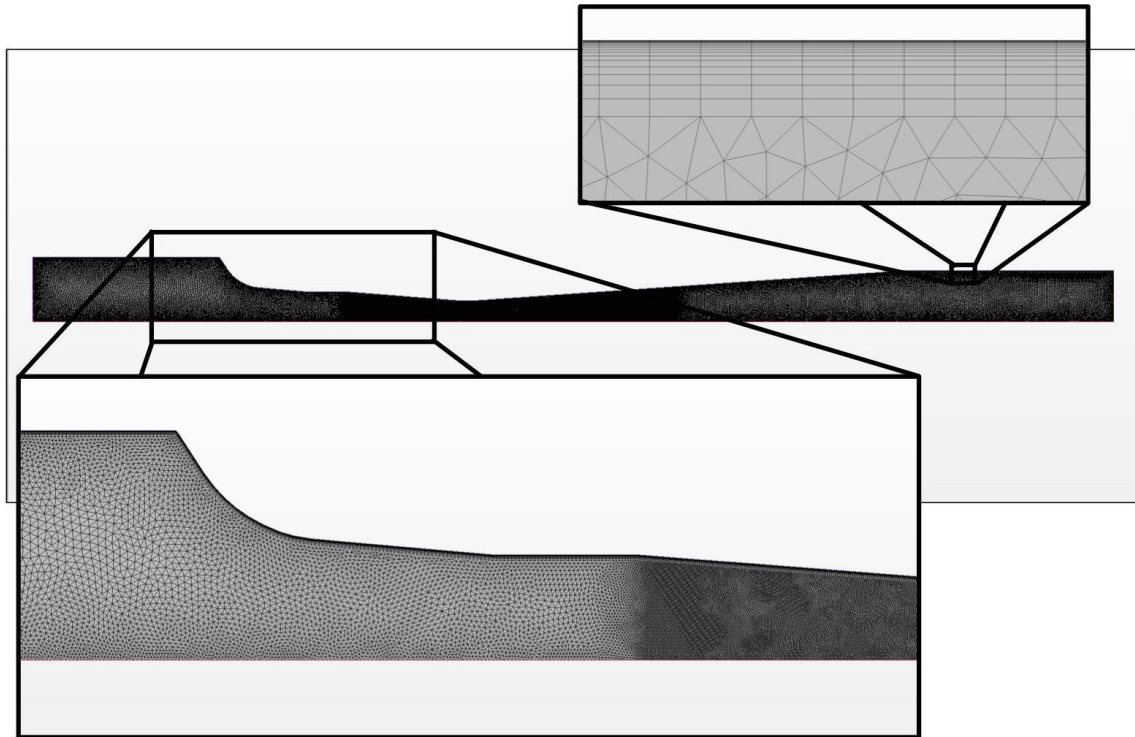


Nous résoudrons les équations de Navier-Stokes avec le modèle de turbulence  $k-\omega$ , où les équations de mouvements sont couplées avec l'équation de continuité. La pression est déterminée par la méthode de *prédiction-correction*.

### Le maillage

Vu la géométrie du modèle, il est possible d'effectuer une simulation axisymétrique. Ceci nous permettra de réduire considérablement le temps de calcul et de générer un maillage très fin. Ce maillage est présenté à la Figure 47. Il est formé de volumes triangulaires 2D et de prismes près des parois pour mieux capter la couche limite.

Figure 47 : Maillage de la simulation



### Les résultats

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et la Figure 49 présentent les distributions de vitesse et de pression respectivement. On voit que la vitesse atteint au maximum environ 272 m/s à la restriction pour le cas de 6°. Par la loi de Bernoulli, il s'agit aussi du point de pression minimal (environ 65 KPa). On remarque aussi que dans tous les cas la pression n'est pas la même en amont qu'en aval. En effet, c'est cette perte que nous évaluons dans le corps du rapport. Le cas qui reprend le moins le moins la pression est bien visiblement celui de 8,58°. Il est aussi important de noter que ce dernier génère une zone de recirculation tout juste en aval de la restriction. Ceci pourrait expliquer la faible performance du plénum à haut régime.



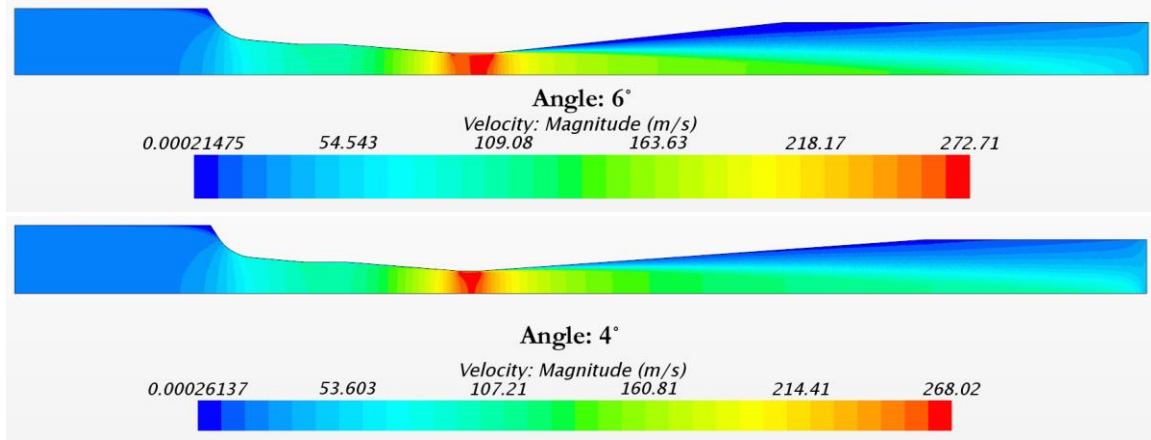


Figure 48 : Distribution de vitesse pour les trois angles

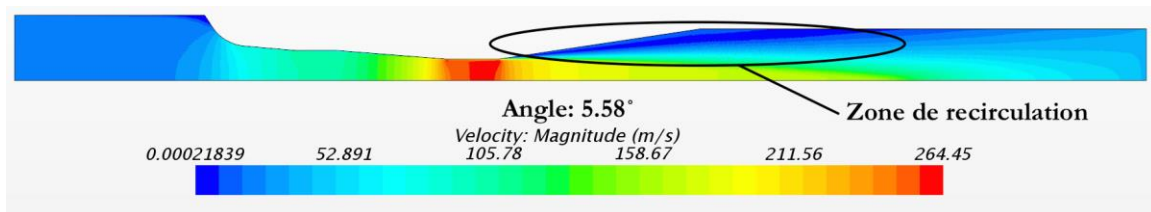


Figure 49 : Distribution de pression pour les trois angles

Annexe B : Simulation OptimumLap

Figure 50 : Configuration Pyramide

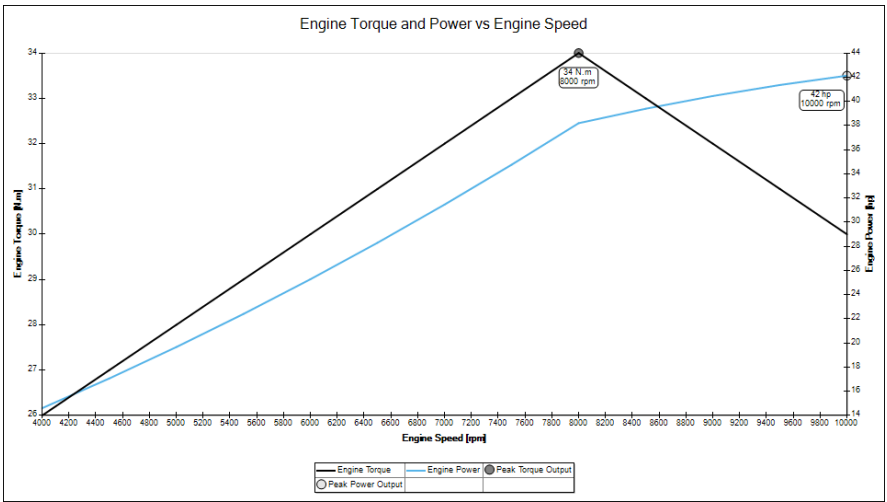


Figure 51 : Configuration plat

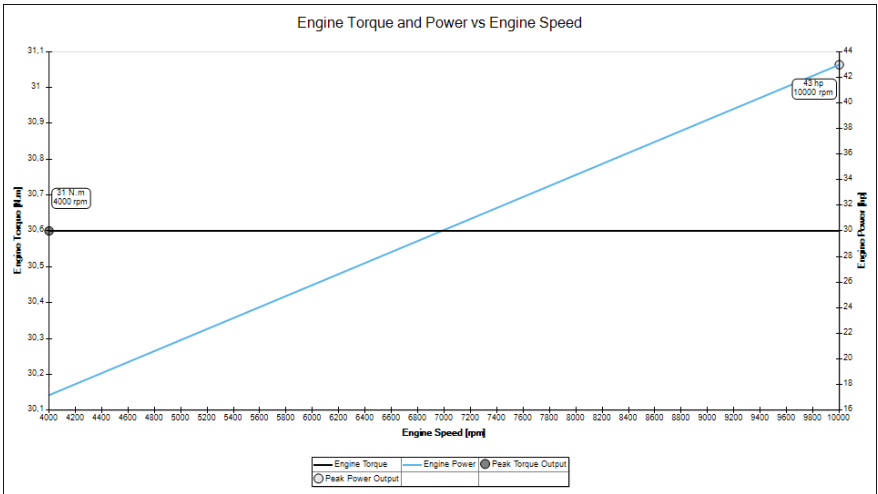


Figure 52 : Configuration Plateau à 7500-9500

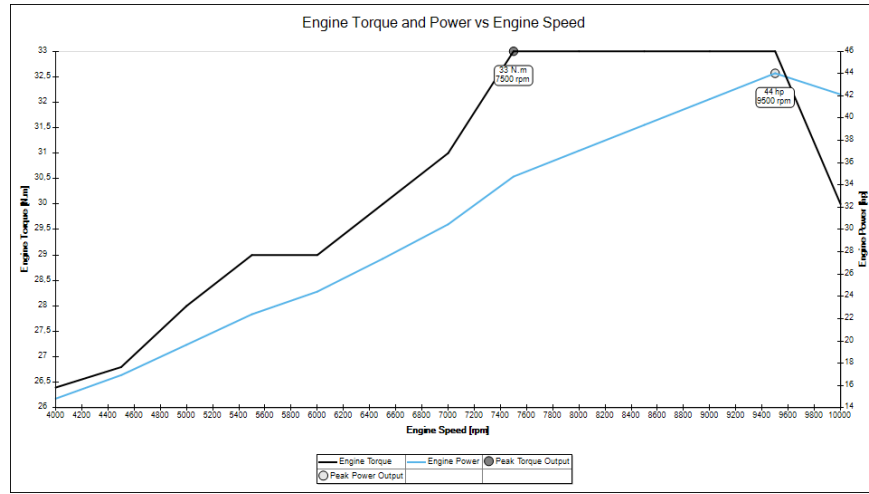


Figure 53 : Configuration Plateau à 7000-9000

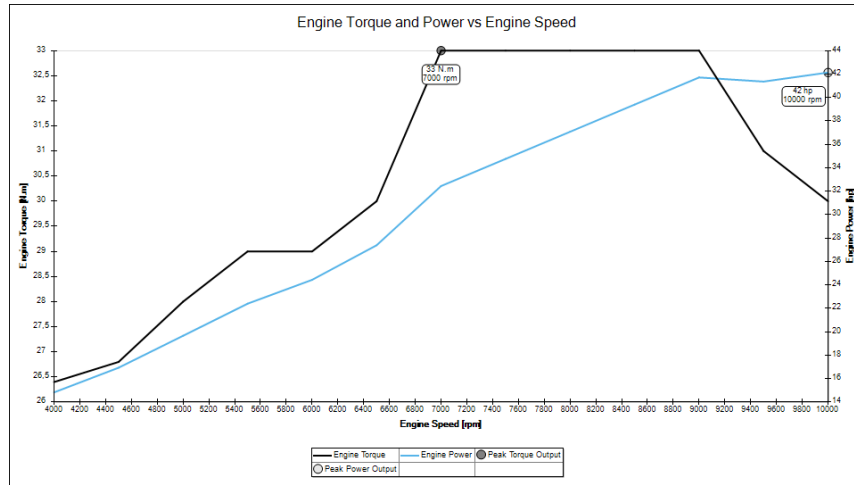


Figure 54 : Configuration à 8000-10000

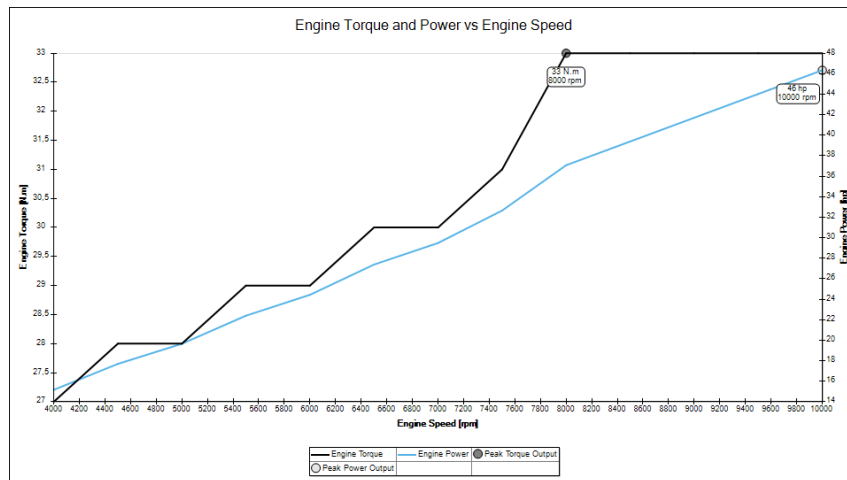


Figure 55 : Confugiration Plateau à 8000-9500

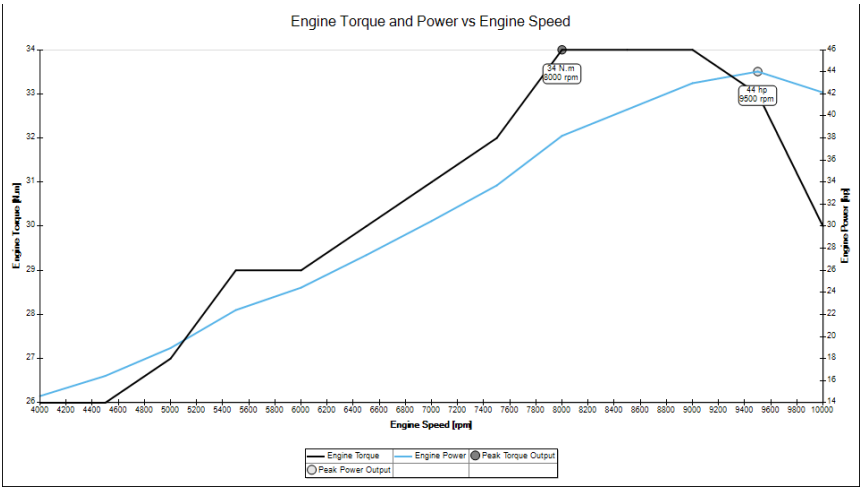
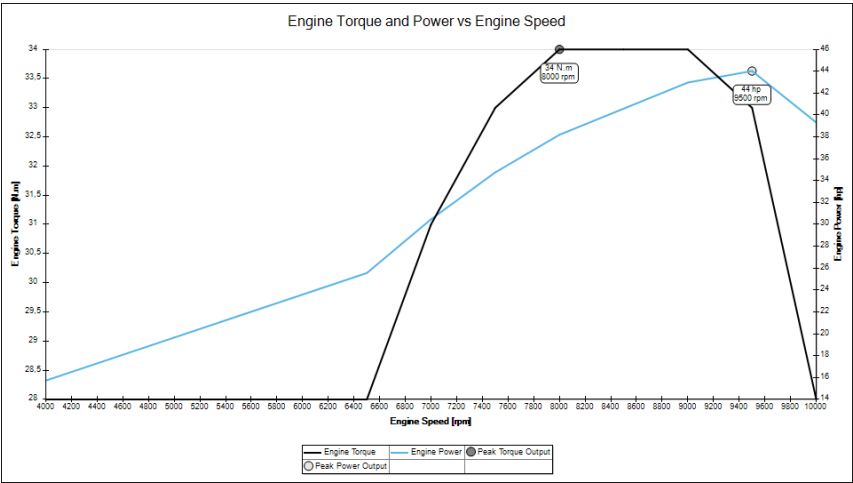


Figure 56 : Configuration minimum à 28



## Annexe C : Calculs confirmant le choix de la valve 90°

Pression disponible dans le réservoir d'air comprimé : 4500 psi.

On nous a informés qu'il se pouvait que le réservoir de la voiture 2017 soit de 3500 psi, il faut donc faire les calculs avec cette valeur.

Durant une endurance, un maximum d'environ 2000 psi peut être utilisé par le système de changement de vitesse.

Il nous reste donc 1500 psi pour la valve pneumatique.

Le réservoir d'air est de 45 po<sup>3</sup> et nous utilisons 0.0915 po<sup>3</sup> à 100 psi par déplacement de valve (½ cycle).

En assumant l'air comme étant un gaz parfait :  $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$ .

Si n, R et T restent constant nous obtenons que si le volume est multiplié par X, la pression est divisée par X. Nous pouvons donc dire que 0.0915 po<sup>3</sup> à 100 psi = 0.0915/15 po<sup>3</sup> à 1500 psi = 0.0061 po<sup>3</sup> à 1500 psi.

La quantité de déplacement de la valve théoriquement possible est donc : 45 po<sup>3</sup> / 0.0061 po<sup>3</sup> = 7380 déplacements.

Si le système de changement de vitesse ne peut plus fonctionner parce qu'il manque d'air, énormément de points peuvent être perdus en compétition. Nous décidons d'être très conservateurs et imposons un facteur de sécurité de 5 sur cette valeur.

Nombre de déplacements maximal = 7380/5 = 1476 déplacements.

En se basant sur trois tours d'une endurance à Michigan, le régime moteur passait en moyenne 45 fois par 8000 RPM. Comme il y avait 10 tours dans l'endurance, nous estimons une quantité de déplacement égale à 45\*10 = 450 par endurance.

Cette quantité risque d'être plus faible en pratique, car une programmation de l'ordinateur empêchera que la valve change plusieurs fois d'orientation lorsque le régime moteur oscillera autour de du régime qui impose un changement.

La valve sélectionnée fait le travail, car 450 déplacements < 1476 déplacements maximum.

Le volume d'air maximal à consommer par déplacement mentionné dans le rapport a été obtenu comme suit : 45 po<sup>3</sup> \* 15 = équivalent de 675 po<sup>3</sup> à 100 psi. 450 déplacements => 675/450 = 1.5 po<sup>3</sup> maximum par déplacement. Avec un facteur de sécurité de 5 encore une fois : 0.3 po<sup>3</sup> maximum par déplacement.

## Annexe D : Dessins techniques de pièces découpées au laser

Rappel : Toutes les cotes ne sont pas présentes, car il s'agit de PDF que l'on envoie pour découpe laser. Le fabricant a besoin d'un dessin au format "dxf" afin d'effectuer la programmation et un PDF qui donne uniquement les dimensions hors tout de la pièce et autres informations pertinentes.

Notes : Pour les membres de la formule SAE, tous ces dessins sont sur le VPN, dans l'onglet "fabrication", "2017".

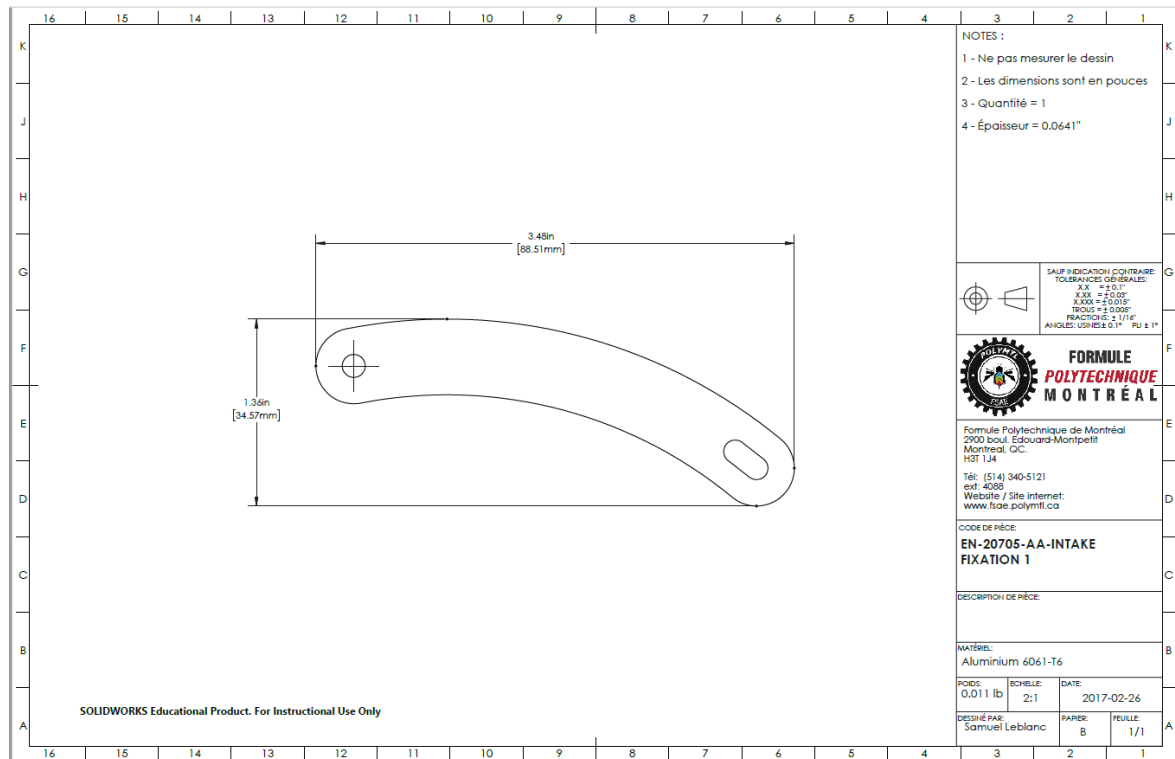


Figure 57 : Dessin technique « Intake fixation 1 »

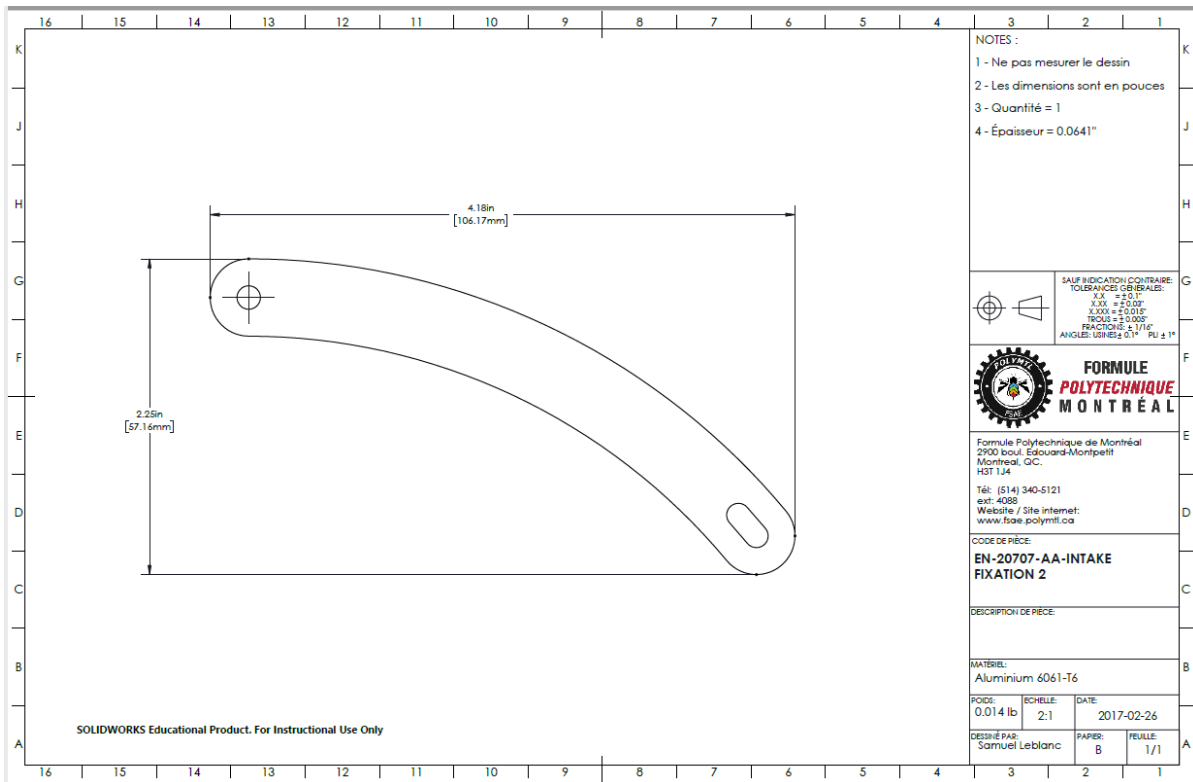


Figure 58 : Dessin technique « Intake fixation 2 »

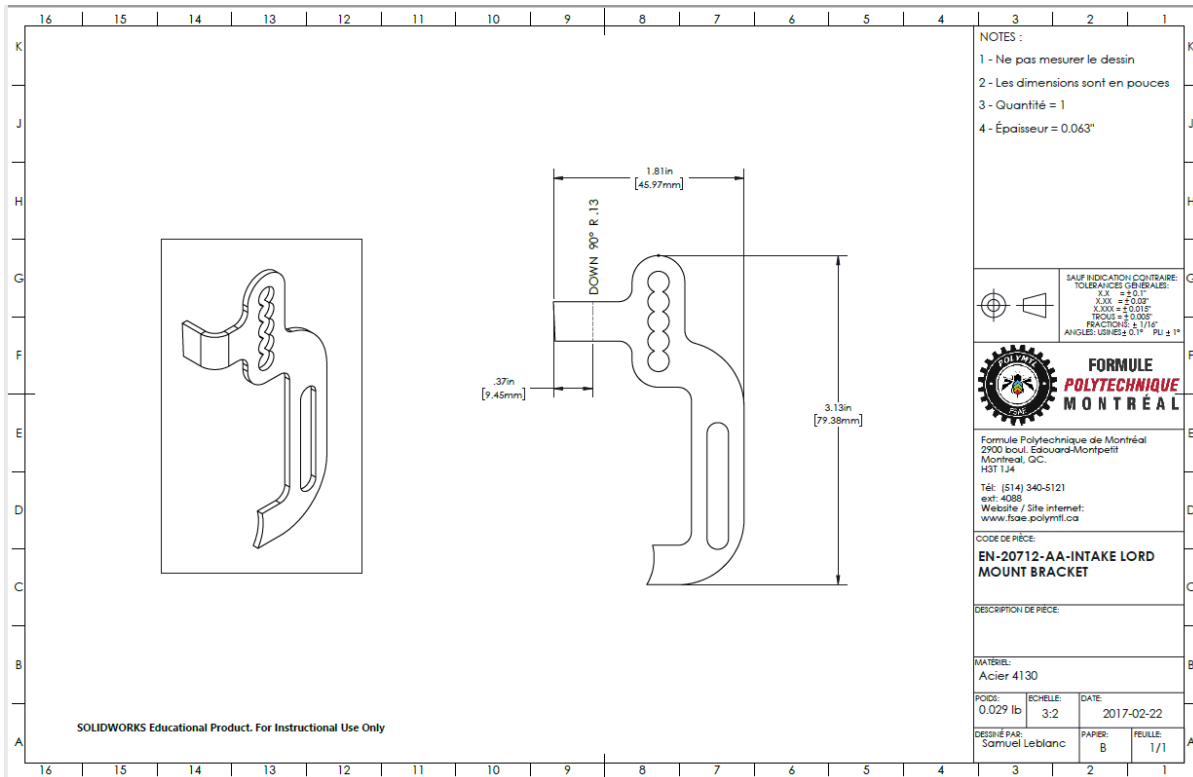


Figure 59 : Dessin technique « Intake lord mount bracket »

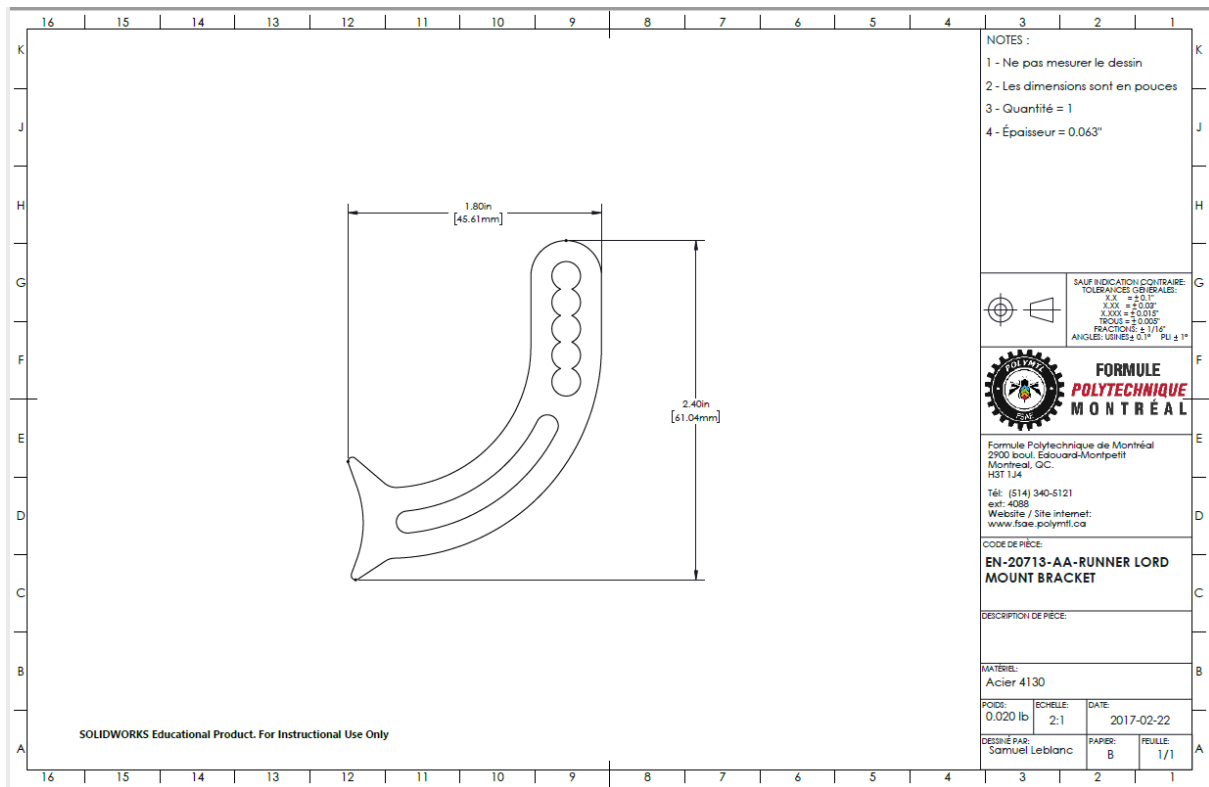


Figure 60 : Dessin technique « Runner lord mount bracket »