



Projet Pulsar

Rapport de vol

ESILV Pôle Léonard de Vinci



Figure 1: Rendu sur Blender de l'assemblage complet du lanceur

A la mémoire de nos pièces en PLA parties trop tôt deux jours avant le C'Space.
Ne faites pas comme nous, ne laissez pas vos pièces en PLA sans surveillance
dans un coffre de voiture en plein soleil.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Équipe	1
1.2	Acteurs du projet	2
2	Partie Mécanique	3
2.1	Architecture générale	3
2.2	Fabrication	5
3	Expérience	8
3.1	But de l'expérience	8
3.2	Réalisation du circuit pneumatique	8
4	Déroulement du vol	10
5	Analyse des résultats	11
6	Problématiques rencontrées et axes d'amélioration	12
6.1	Pièces en PLA	12
6.2	Performances système pneumatique	12

1 Introduction

Pour sa troisième année consécutive, notre association a participé à la campagne de lancement C'Space, un projet de construction et de lancement d'une fusée expérimentale proposé par le CNES (le Centre National d'Etude Spatiale). Ce projet consiste à construire intégralement une fusée (de type Fusex) respectant un cahier des charges préalablement défini. A son bord, la fusée doit abriter une expérience. Cette année, nous avons décidé de travailler sur le contrôle de roulis par jets d'air pulsés.

1.1 Équipe

Considérant la multitude de disciplines concernées par le projet, nous avons décidé d'organiser notre équipe selon deux principaux pôles : un pôle électronique et un pôle mécanique. Au total 15 étudiants ont travaillé sur ce projet, 9 d'entre eux sont en première année du cycle ingénieur et les 6 autres en deuxième année.



Chef de projet
Pierre DEBAISIEUX

	équipe mécanique		équipe électronique
Karim ABD EL AYEM	Alexandre DE BELLOY	Boris MOLTON	Jonathan SANDS
Alexandre BARAKAT	Léon Xavier ELONDOU	Evan SENERET	Hugo TENG
Antoine BRUN	Jean-Baptiste LACAZE	David XU	Tanguy WALRAVE
Jules COUTURIER	Philippe LE BRAS		

1.2 Acteurs du projet

- LéoFly

LéoFly est une jeune association d'aéronautique et d'aérospatiale fondée en Novembre 2015. Elle a pour objectif de rassembler les étudiants du Pôle Léonard de Vinci (à Paris La Défense) autour de leur passion commune. Pour se faire, les membres du bureau proposent de nombreux projets techniques (réalisation d'un cockpit de simulation à taille réelle, d'une aile volante autonome, etc..) dont certains sont en collaboration avec le CNES (Mini Apterros, ROAR et C'Space) ainsi que des conférences et des visites dans le domaine de l'aéronautique ou du spatial.



- Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)

Le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) est un établissement public à caractère industriel et commercial chargé d'élaborer et de proposer au gouvernement le programme spatial français et de le mettre en œuvre.



- Planètes Sciences

Planètes Sciences est une association à but non lucratif proposant aux jeunes passionnés des activités scientifiques et techniques expérimentales, grâce à différents projets durant leurs études. Cette année, Planète Sciences nous a encadré grâce à 3 réunions techniques et de contrôle, ce sont les «Rencontre Club Espace» dites «RCE». Les bénévoles sont également présents sur le Camp de Ger (lieu de la campagne C'Space pour l'édition 2019) pour nous apporter des conseils et pour effectuer les vérifications techniques imposées par le cahier des charges avant de procéder au décollage.



2 Partie Mécanique

2.1 Architecture générale

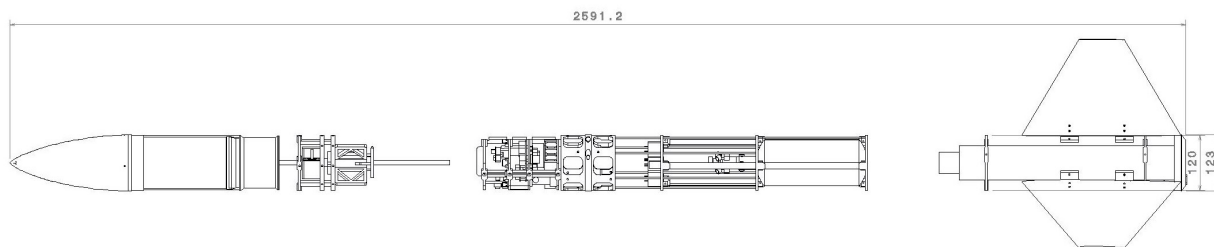


Figure 2: Mise en plan de la fusée

La structure de Pulsar est dite en peau porteuse, c'est-à-dire que tous les éléments sont fixés sur le corps principal. Le corps principal de la fusée, en fibre de carbone, est séparé en deux parties : un corps supérieur mesurant 1000mm et un corps inférieur de 1300mm. La jonction entre ces deux corps se fait par l'intermédiaire d'une bague de liaison qui permet notamment de faire sortir facilement le rack pneumatique du corps inférieur. L'épaisseur de la fibre de carbone est de 1,5mm et le diamètre intérieur de la fusée est de 120mm.

A la base de la fusée, nous retrouvons la bague de reprise de poussée qui, couplée avec une languette de fixation en aluminium, empêche tout mouvement vertical du propulseur, un Pro75 fourni par le CNES. Pour contrer tout mouvement sur son axe horizontal, nous avons usiné deux bagues de centrage en aluminium, fixées par des vis pression au niveau de la partie basse du corps inférieur. Nous trouvons ensuite le rack pneumatique occupant la place restante du corps inférieur. Ce rack pneumatique abrite la bouteille d'air comprimé nécessaire au contrôle de roulis, un régulateur, 2 électrovannes ainsi qu'un réseau de tuyaux pneumatiques permettant d'acheminer l'air jusqu'aux sorties, situées sur la bague de liaison.

Le corps supérieur héberge, lui, le rack électronique qui coordonne toutes les tâches que doit effectuer la fusée durant son vol. Nous avons imprimé ce rack en PLA et cherché à minimiser son encombrement. Afin d'avoir facilement accès à ce rack, nous avons intégré, à l'intérieur du corps, des glissières permettant au rack de coulisser et de sortir du corps facilement. Au-dessus du rack électronique se trouve le système d'éjection du parachute, qui s'articule autour d'une bague d'ancrage fixée dans le corps.

Enfin, au-dessus du corps supérieur, se trouve l'ogive (d'une hauteur de 260mm et d'un diamètre extérieur de 123mm) sous laquelle se trouve le parachute.

Notre fusée est dotée de 3 ailerons qui ont d'abord été imprimé en 3D, puis drapés de fibre de carbone et enfin poncés et fixés aux corps à l'aide de supports en aluminium.

Planète Sciences a développé une application permettant de vérifier si le dimensionnement des ailerons de notre fusée respectait bien les critères de stabilité instaurés par le cahier des charges. Cette application prédit par la même occasion la trajectoire de la fusée.

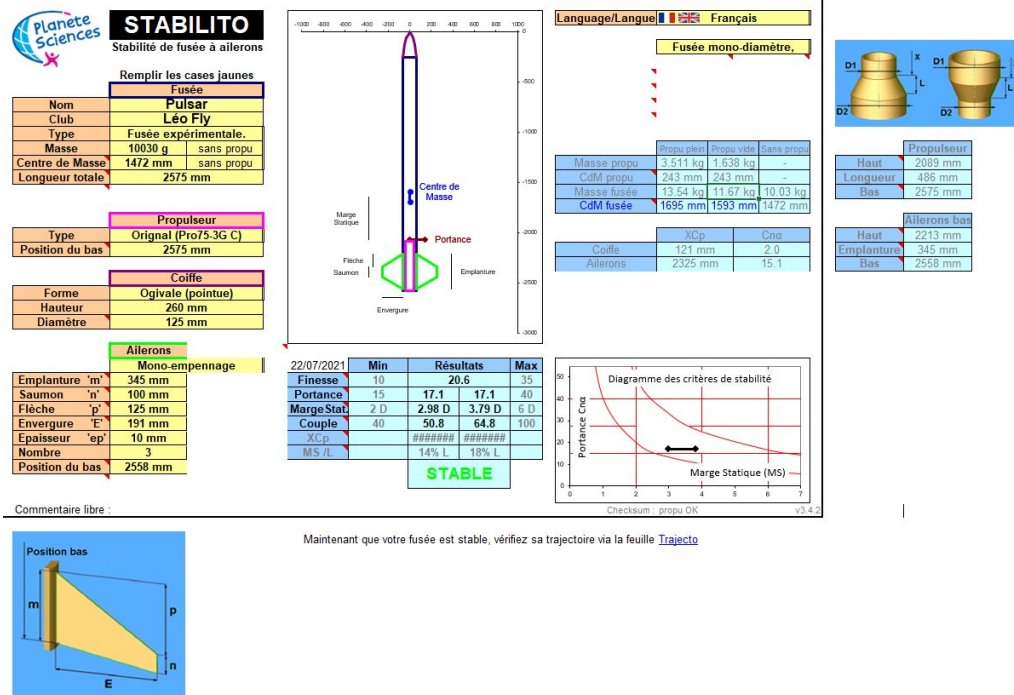


Figure 3: Dimensions des ailerons de la fusée

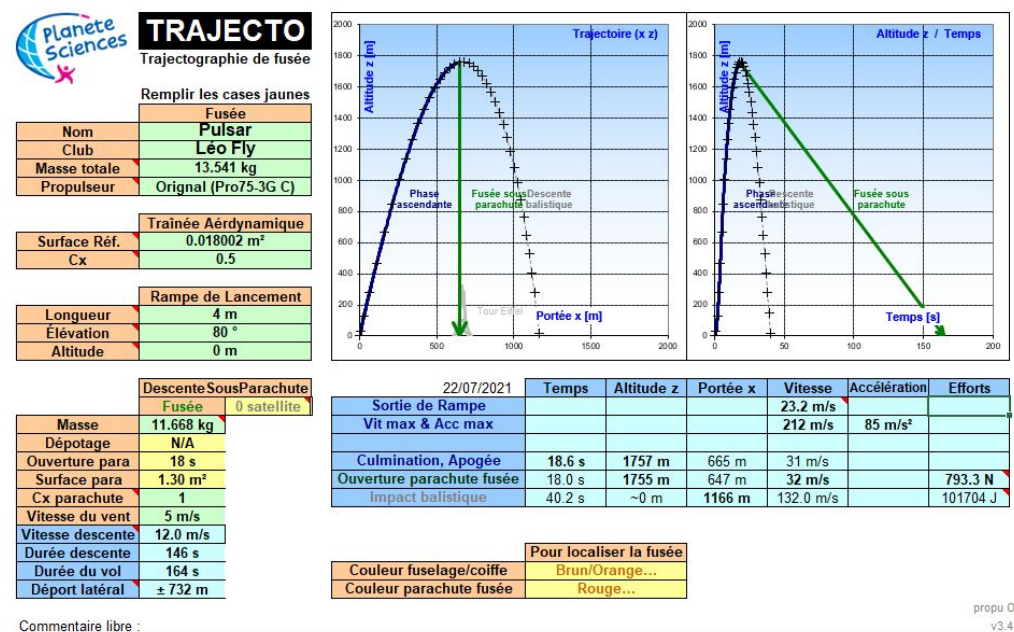


Figure 4: Trajectoire théorique de la fusée

2.2 Fabrication

- Processus de Fabrication

Nous avons réalisé l'ensemble de nos pièces grâce au centre d'usinage de notre école. A partir d'un brut cylindrique en aluminium de 130mm de diamètre et d'un pavé d'aluminium, nous avons usiné les différentes bagues de la fusée ainsi que les supports des ailerons. Nous avons à disposition une scie à ruban pour sectionner, un tour manuel pour différentes opérations : surfaçages, alésages, contournages, gorges (etc..) ainsi qu'une fraiseuse 3 axes manuelle, une machine-outil 3 axes à commande numérique par ordinateur. Cette dernière permet d'usiner des formes complexes sans démontage de la pièce à partir d'un G-Code généré par les opérations d'usinage que nous définissons dans la FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) des pièces sur CATIA V5.



Figure 5: Centre d'usinage du Pôle Léonard de Vinci



Figure 6: Fixation à aileron en train d'être usinée

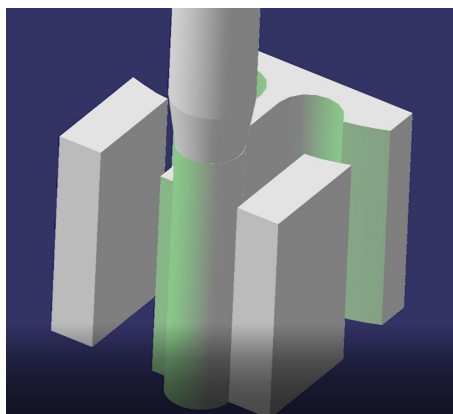


Figure 7: FAO d'une fixation des ailerons

- Tube en carbone

Du fait des fortes contraintes mécaniques que va subir le corps de la fusée durant le vol et des dimensions importantes des tubes, nous avons décidé de sous traiter les tubes en carbone à l'entreprise Mateduc Composites. Les tubes sont réalisés à partir de fibre T700 avec une couche en orientation transversale et deux allés retour à $\pm 20^\circ$ sur un diamètre intérieur de 120 mm et une épaisseur de 1.5 mm, les longueurs de nos deux tubes sont respectivement 1000 mm et 1300 mm.

Note pour LéoFly : Mateduc nous a facturé dans leur premier devis un forfait de programmation de trajectoire fibre, forfait non facturé sur Skyception et Atomic. Envoyez nos anciennes factures pour essayer d'avoir une réduction.

Note : Mateduc est capable de réaliser uniquement des tubes à diamètre interne multiple de 5mm.

- Ailerons

Les ailerons jouent un rôle clef au cours du vol, car ce sont eux qui garantissent la bonne stabilité de la fusée durant son ascension. Après plusieurs simulations sur Stabtraj, nous avons choisi de donner à nos ailerons une forme trapézoïdale avec un profil de type NACA 0.010 à la base et de type NACA 0.012 au saumon (à l'extrémité de l'aile).

La première étape consiste à imprimer en 3D les ailerons (impressions en PLA).

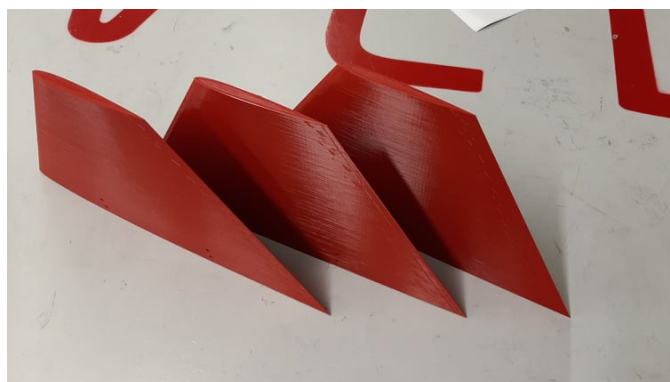


Figure 8: ailerons

Ensuite nous superposons deux couches de carbone sur le moule en plastique à l'aide de résine époxy pour consolider la structure.

Vient ensuite le séchage qui est réalisé sous vide : nous laissons pendant 24h l'aileron drapé dans une poche en plastique hermétiquement fermée avec du mastic et nous faisons le vide en aspirant l'air présent dans la poche à l'aide d'une pompe à vide.

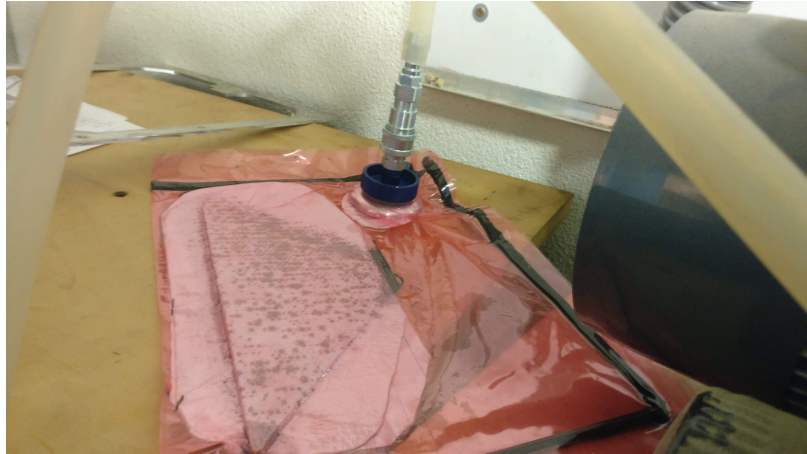


Figure 9: Séchage sous vide

Enfin, nous éliminons le surplus de carbone aux bords à l'aide d'une Dremel et nous finissons par les poncer pour qu'ils soient les plus lisses et donc les plus aérodynamiques possible.

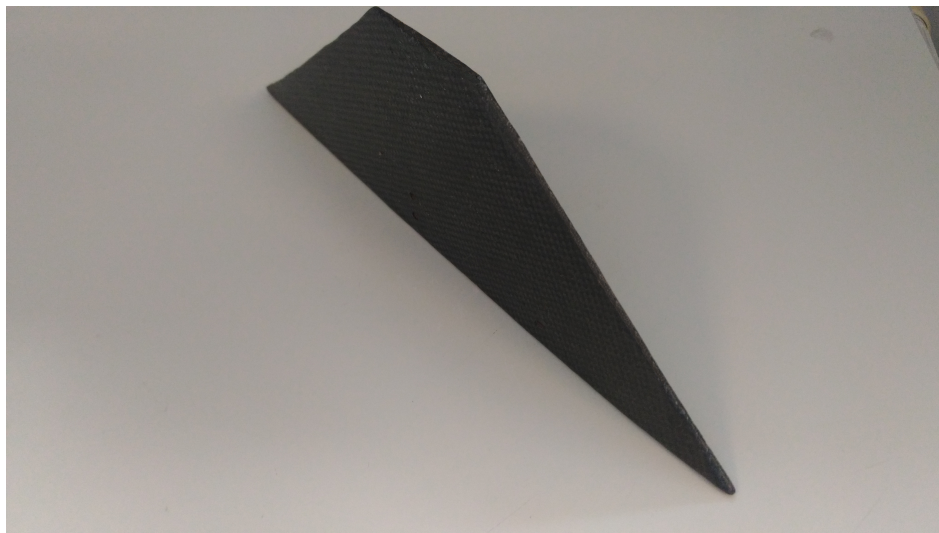


Figure 10: Aileron final

- Supports ailerons

Pour fixer les ailerons au corps, nous avons conçu et usiné des supports en aluminium que nous avons introduits dans les fentes des ailerons. Ces supports en « T » épousent la forme intérieure du corps de la fusée et viennent se fixer à l'intérieur des ailerons. Ainsi, lorsque les ailerons sont fixés au corps, les supports ne gênent pas l'écoulement de l'air comme pourraient le faire des équerrés.

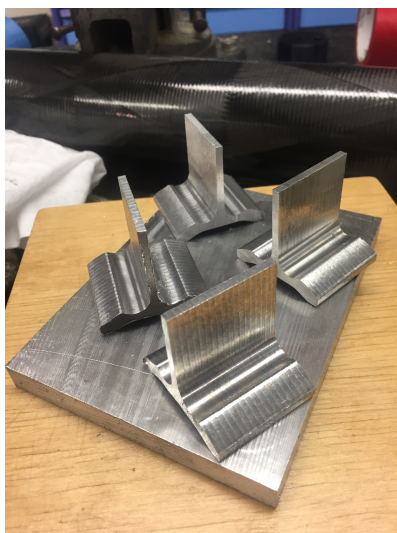


Figure 11: Supports ailerons

3 Expérience

3.1 But de l'expérience

L'objectif du vol est d'annuler le roulis de la fusée en phase balistique. Pour cela, nous avons mis en place un circuit pneumatique permettant d'éjecter du gaz dans le sens horaire et anti horaire, par rapport à l'axe de roulis de la fusée. Après la phase de propulsion, le circuit est mis en marche. L'ouverture des électrovannes est gérée selon les valeurs reçues par un accéléromètre embarqué. Le mode de fonctionnement des électrovannes étant tout ou rien, la fusée contre son roulis tant qu'elle n'est pas dans une fourchette de vitesse angulaire acceptable. Nous avons fixé cette plage de vitesses entre $-\pi/8$ rad/s et $+\pi/8$ rad/s. Cette fourchette est arbitraire et permet au système de ne pas entrer dans un mode de fonctionnement sinusoïdal.

3.2 Réalisation du circuit pneumatique

La réalisation du circuit pneumatique fut grandement facilitée par l'expérience de notre association sur la Fusex Skyception. Nous sommes partis sur une architecture similaire en éliminant le régulateur de pression en sortie de bouteille et en doublant le nombre d'électrovannes (deux couples de deux pour le sens horaire et anti-horaire).

La bouteille embarquée dans la fusée est un réservoir à haute pression 124/4500 de la marque First Strike de 2.0L, pouvant atteindre une pression d'utilisation de 310 bar, 124 correspondant à son volume en pouce carré et 4500 à sa pression d'utilisation en psi. Cette bouteille possède son propre régulateur de pression qui permet d'avoir une pression de sortie de 50 bar. Cette pression de sortie peut être changée via des kits vendus par le constructeur. Nous avons pris le kit faible pression pour avoir une sortie à 20 bar. Pour ouvrir la bouteille, nous avons acheté un adaptateur universel pour bouteille de paintball normalement vendu avec une seule sortie fileté en 1/8. Nous en avons ajouté 3 pour avoir 4 sorties directes. Pour le reste du circuit, nous nous sommes tournés vers le site RS pro, c'est-à-dire pour toute la partie connectique, câblage et pour le choix des électrovannes. Le type de tuyaux acheté sur RS est l'élément limitant la pression interne du circuit du fait qu'il ne résiste pas à plus de 22 bar. Les électrovannes, quant à elles, ont une pression de travail maximale de 50 bar.



Figure 12: Adaptateur de sortie de bouteille



Figure 13: First Strike 124/4500 HPA Tank



Figure 14: Électrovanne FestoVZWD-L-M22C-M-G18-10-V-1P4-50

4 Déroulement du vol

La fusée a décollé le 23 juillet à 11h45, le ciel était suffisamment dégagé pour l'utilisation d'un pro75. La fusée a emprunté la trajectoire parabolique attendue avec une importante oscillation en début de vol. Le parachute a été déployé légèrement avant l'apogée. La fusée a atterri sans dégâts dans un champ voisin. La bouteille de paintball était vide lors de la récupération, nous pouvions entendre la purge automatique lors de la phase de redescente de la fusée grâce à la caméra embarquée.



Figure 15: Pulsar en rampe

5 Analyse des résultats

La carte SD présente à bord a permis de récupérer la vitesse de rotation de la fusée pendant la phase de vol.

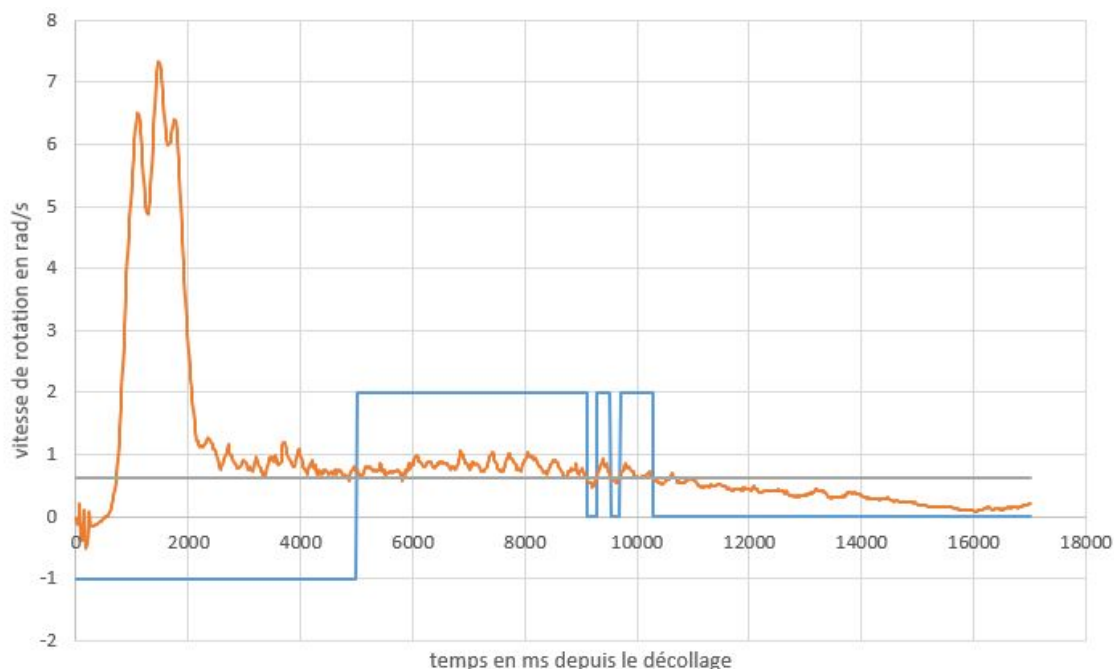


Figure 16: Vitesse de rotation de la fusée durant le vol

En orange sur le graphique, nous retrouvons la vitesse de rotation en radians par seconde de la fusée, en gris le seuil d'enclenchement du système et en bleu l'état de l'électrovanne en charge de la correction (-1 indique un état d'attente de fin de propulsion, 0 = fermée, 2 = ouverte).

Nous pouvons constater une forte vitesse de rotation de la fusée durant la phase de propulsion, ces valeurs peuvent être confirmées par la caméra embarquée à bord. La fusée a subi une perturbation dès le moment de la sortie en rampe, elle est donc rentrée dans une phase d'oscillation pour maintenir sa stabilité. Nous supposons que durant ces oscillations, les trois ailerons ont dû engendrer un roulis important dans un sens, puis ce roulis a été compensé à l'oscillation suivante. Nous pensons donc que ce pic est dû à nos trois ailerons, il aurait pu être évité si nous en avions mis quatre.

À la fin de la propulsion, c'est à dire à 5000ms après le décollage, nous observons une vitesse de rotation proche de notre vitesse de rotation limite pour l'enclenchement de notre système. La vitesse limite de $\pi/4$ rad/s a été fixée arbitrairement. Nous avons fixée cette vitesse de rotation en pensant que si notre fusée avait un roulis d'un tour toute les huit secondes, alors nous serions satisfait du roulis. Nous nous attendions à avoir un roulis important à la fin de la phase de propulsion et ce sans pour autant forcer le roulis. Cependant, nous sommes tombés dans la situation où le roulis est très proche de notre seuil limite. Cette faible vitesse couplée aux oscillations de la fusée complique la phase d'analyse des performances réelles du système.

Nous pouvons quand même nous satisfaire de notre vitesse de roulis quasiment nulle après 10 secondes.

6 Problématiques rencontrées et axes d'amélioration

6.1 Pièces en PLA

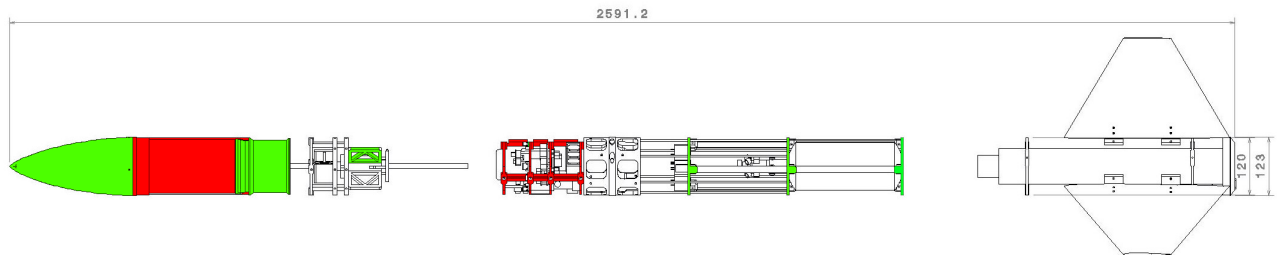


Figure 17: Pièces en PLA impactées par la chaleur

Nous avons entreposé notre fusée dans un coffre de voiture le week-end avant de partir au C'Space. La chaleur a malheureusement déformé toutes nos pièces en PLA. Sur le schéma, vous avez en vert les pièces suffisamment intactes pour pouvoir être réutilisée et en rouge les pièces que nous avons dû refaire au C'Space. Nous avons eu ainsi une vingtaine d'heures d'impression durant la campagne (les imprimantes sont interdites la nuit dans les chambres, les pompiers de la bases nous l'ont bien rappelé après avoir débarqué dans notre chambre). Nous avons finalement pu réassembler la fusée et la qualifier rapidement afin de la lancer avant la fin de la campagne.

6.2 Performances système pneumatique

Le facteur limitant de notre circuit pneumatique (en éliminant les contraintes du cahier des charges) est la pression maximale que peuvent supporter nos tuyaux, soit 20 bar. Cependant, le faible débit de sortie de la bouteille n'offre pas des performances remarquable, revenir à une pression de sortie de 50 bar pourrait significativement augmenter la puissance.

Le volume de la bouteille était surdimensionné pour nos besoins, une bouteille de 3000 psi de la marque First Strike aurait pu largement suffire pour un diamètre de bouteille inférieur.