

Rapport de fin de projet  
Minifusée MF40 : *Elobooster*  
Lancement nominal en juillet 2024



Membres :

- Marc BURDZELIAN
- Clément ARRONDEAU
- Bastian AUBOURG
- Nathan BELHUMEUR

de l'association Estaca Space Odyssey

## Remerciements

L'équipe d'Elobooster a été profondément marquée par le C'space 2024. C'est pourquoi nous aimerions faire savoir notre reconnaissance envers toutes les personnes nous ayant permis de lancer pour la plupart d'entre nous, notre première minifusée.

Merci au CNES et à Planète Sciences d'organiser ce genre d'évènements chaque année pour permettre aux jeunes partout en France de réaliser leurs rêves. Et ce en sécurité et avec un accompagnement de qualité par des passionnés.

Merci tout particulièrement à Hugo ALLAIRE, bénévole et pyrotechnicien à Planète Sciences pour ses conseils nombreux et son partage d'expérience. Son aide a été très précieuse particulièrement pour l'électronique d'Elobooster.

Merci au club ESO de l'ESTACA de nous avoir fourni matériel et ressources pour pouvoir fabriquer notre minifusée, sans quoi il aurait fallu trouver financement et usineurs nous-mêmes.

Merci à Frank FAUX, usineur au sein de l'ESTACA pour avoir travaillé d'arrache-pied dans les derniers moments du projet pour nous donner des pièces de qualité dans des délais moindres.

Merci à David PEREZ pour nous avoir aidé à maintes reprises à utiliser la soufflerie de l'ESTACA pour améliorer la conception de nos systèmes, et mieux comprendre les aspects aérodynamiques des problèmes auxquels nous faisons face.

Merci à Thomas BOIDE pour nous avoir emmené à Tarbes dans une ambiance exceptionnelle et d'avoir vissé une vis de la minifusée.

Merci à nos amis et proches pour leur soutien dans ce projet !

## Description du projet

Elobooster est un projet qui a duré trois ans à la suite de problèmes personnels des membres. Le projet tout d'abord nommé Stéllarios en 2021 fut abandonné de ses membres, puis récupéré et renommé par les membres actuels en 2023. Entre le début du projet et sa reprise seule la peau a été conçue et réalisée, les nouveaux membres ont totalement revu la direction du projet.

Elobooster est une minifusée avec une expérience à bord. Ses caractéristiques sont :

- Diamètre de 63mm, et diamètre de 253mm avec ailerons inclus.
- Hauteur de 855mm.
- Propulseur pro 24-6G Pandora.



Elobooster dans la tente club, juste avant son vol

## Peau

Elobooster est une minifusée à peau porteuse, cela signifie que les efforts aérodynamiques et ceux engendrés par le propulseur sont canalisés par la surface externe de la fusée. La peau a été faite en matériau composite, dans notre cas en fibre de carbone et résine époxyde.

La création de la peau remonte à la période 2021-2022 lorsque le projet portait le nom de Stéllarios. La peau fut créée par enroulement de trois couches de fibre de verre sur un tube PVC, puis en peignant les fibres de résine mélangée à un durcisseur. Le seul problème rencontré avec la peau est le manque d'homogénéité de la résine. Il est important pour les projets futurs de veiller au séchage de leur composite pour qu'il ne coule pas d'un côté du tube, laissant l'autre

en manque de matière. Une solution serait par exemple de faire pivoter le tube de temps en temps lors du séchage.



Création de la peau en fibre de verre. On peut souligner l'utilisation de papier de cuisson pour faciliter la séparation entre le tube de PVC servant de moule et les fibres déposés sur le papier cuisson. Plus tard le papier cuisson a été remplacé par de la fibre d'arrachage pour les minif suivantes, plus efficace dans cette mission.

**Un conseil très important est de vous protéger à tout prix lorsque vous utilisez des matériaux composites, gants masques et lunettes sont vraiment critiques** si vous ne voulez pas avoir des mains qui grattent pour un bon bout de temps ! Et ce n'est vraiment pas le pire qui peut arriver, prenez ces risques très au sérieux.

## Expérience

L'expérience d'Elobooster est de mesurer la vitesse de rotation d'une turbine remplaçant son ogive. La mesure de la vitesse de rotation se fait grâce à un capteur à effet de Hall placé près de l'arbre de rotation de la turbine. A la base cette turbine devait aussi produire du courant grâce à des aimants et bobines mais l'ambition du projet a été vu à la baisse au fur et à mesure que le temps venait à manquer.

Electroniquement l'expérience et ses mesures étaient gérées par un calculateur RP2040 zéro. Le stockage des données se faisait directement dans la mémoire vive du microcontrôleur. La puce

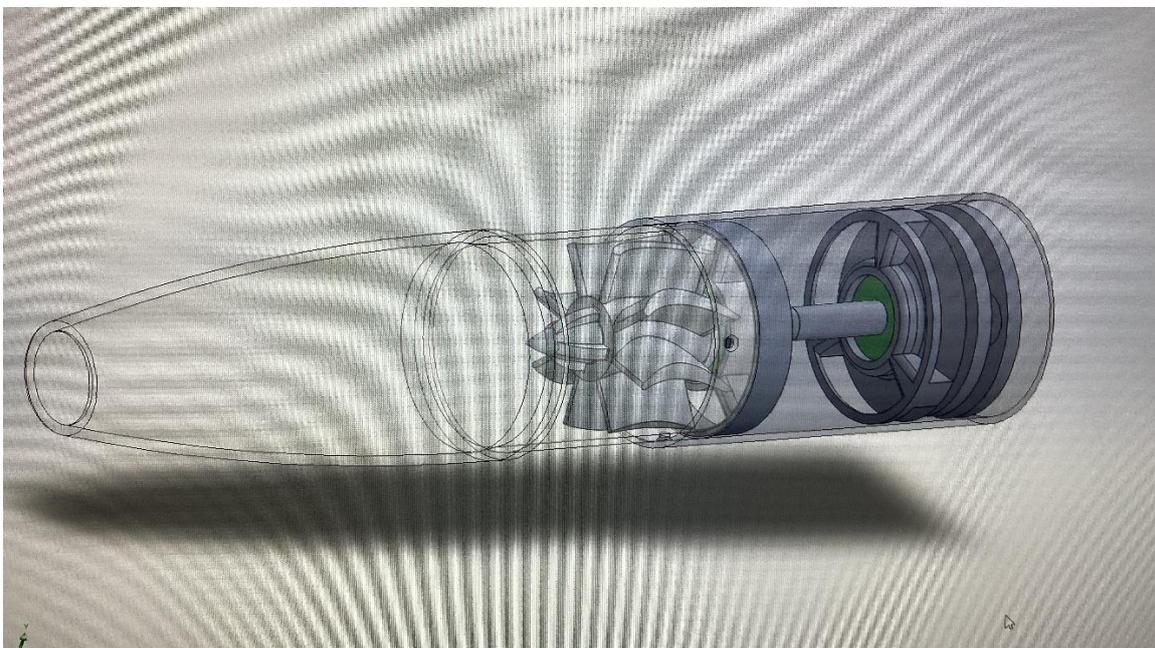
était alimentée en 5V par une batterie 9V standard, l'abaissement de tension a été géré par un 7805, un composant bon marché très fiable et simple d'utilisation. Le capteur à effet de Hall recevait un signal continu de la RP, et lors du passage d'un aimant devant le capteur, le calculateur ressentait un changement du signal sur la broche du capteur, ainsi un tour ou demi-tour d'arbre était détecté. Il suffit de mesurer le temps entre chaque détection pour avoir une vitesse de rotation.

Grâce à Hugo ALLAIRE le code a pu inclure des interruptions pour le programme de détection de l'aimant. Ceci a eu pour conséquence d'augmenter grandement la fiabilité du système. Sans elles il arrivait que lorsque le microcontrôleur était occupé à faire quelque chose il ne détectait pas l'aimant, faussant les résultats. Les interruptions forcent le microcontrôleur à ignorer les autres processus et se focaliser sur l'ordre qu'on lui donne.

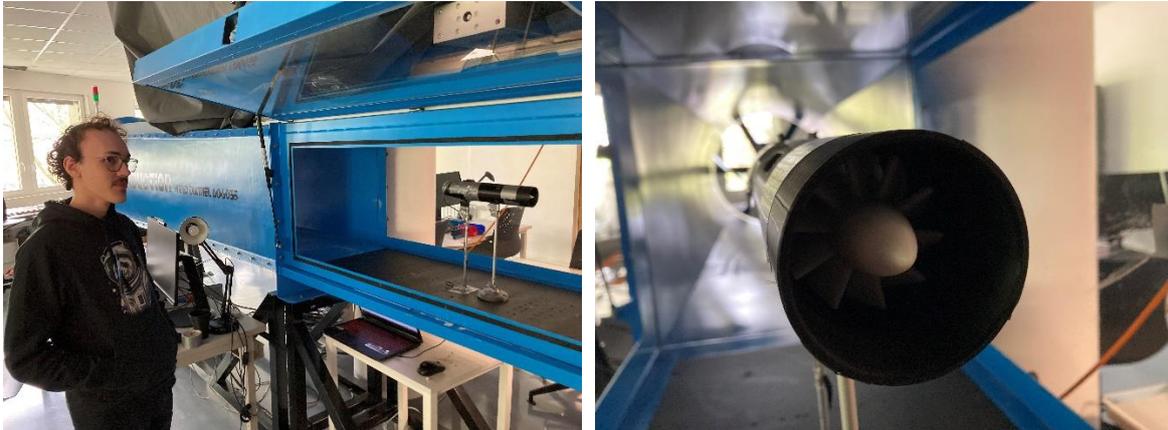
Il était prévu, à la fin du projet de coupler les données du vol avec des mesures en soufflerie pour obtenir une courbe de la vitesse de la fusée tout au long du vol. Pour des raisons évoquées plus loin, cela n'a pas pu être possible.

La partie mécanique de l'expérience est donc une turbine interne au corps de la fusée sur un arbre porté par deux roulements à billes à une rangée de billes. La turbine est faite par itérations et passages en soufflerie, pour voir quelle parmi plusieurs propositions sont les plus efficaces. Cependant les profils porteurs de la turbine sont étudiés pour avoir une portance maximale selon leur angle d'attaque et la vitesse de pointe de la fusée, estimé équivalent à celle de l'air autour des pales de la turbine.

Nous avons utilisé le site internet <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit> pour obtenir les courbes de performance des profils d'aile que nous utilisons. Il nous a donc permis de trouver le profil final qui nous paraissait le plus efficace.



Premier jet de concept du bloc turbine d'Elobooster



Essai en soufflerie d'un des premiers prototypes du bloc turbine

Les aimants de l'arbre sont contenus dans une sorte de nacelle solidaire de l'arbre dans laquelle on vient glisser les aimants par-dessus, la gravité et l'accélération les empêchant de sortir. Or lors du vol la vitesse de rotation couplé au manque de séparation entre les aimants a causé leur sortie de nacelle. La dernière mesure de rotation qui est en sortie de rampe de la fusée était d'environ 2400 tours par minute. Quatre aimants en néodyme de 10g chacun lâchés à cette allure n'ont pas fait long feu, l'un d'eux s'est littéralement sectionné en deux par son centre après avoir impacté un obstacle dans son chemin. Fort heureusement il semblerait que cet aimant se soit brisé en rentrant en collision avec le support de pile pour l'expérience, qui a servi de bouclier pare-aimants à la pile. Lorsque des éléments bougent rapidement dans la fusée il est important de s'assurer de leur bon maintien en position. Pour nos aimants un simple maintien par gravité avec des guides sur les côtés n'a pas suffi.



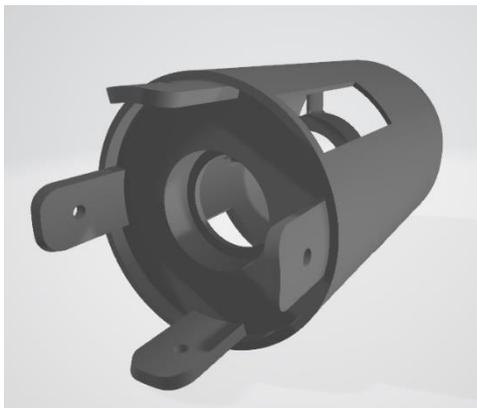
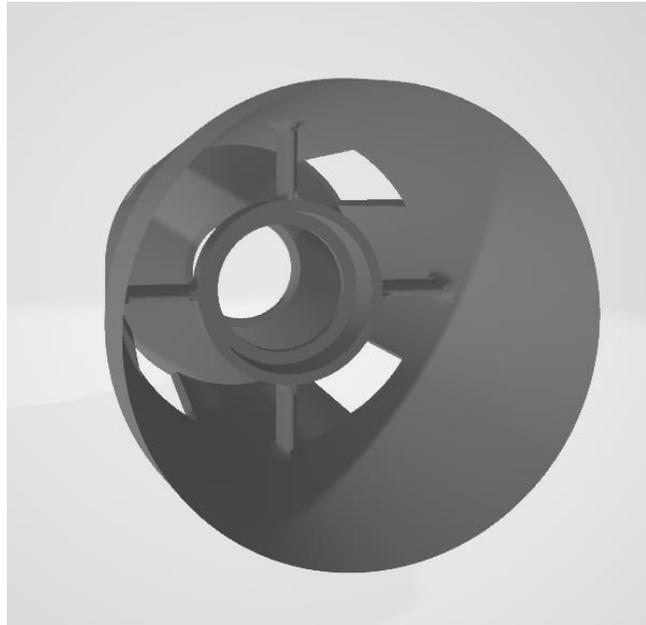
Voici la forme de la nacelle, les aimants étant circulaires la surface les maintenant en place est très faible.



Arbre de turbine, les profils sont à un angle d'attaque qui varie de 30 à 60 degrés plus on s'éloigne de l'axe de rotation. Les deux parties de l'arbre de plus grand diamètre sont les endroits où se placent les roulements à billes.

Le bloc turbine est une pièce unique imprimée en 3D. elle comporte un premier support de roulements maintenu

par quatre profils, suivi du second maintien de roulement derrière un dôme déflecteur d'air. L'air s'échappe par quatre ouvertures latérales conçues pour que le débit sortant soit bien suffisant.



Les roulements sont maintenus en « X » pour qu'il y ait toujours un qui retienne le système.

## Minuterie

La minuterie d'Elobooster a été créée en compagnie d'un autre groupe de minifusée de l'ESO, la minifusée Barbenheimer. Ces deux minifusées partagent la même structure électronique de minuterie.

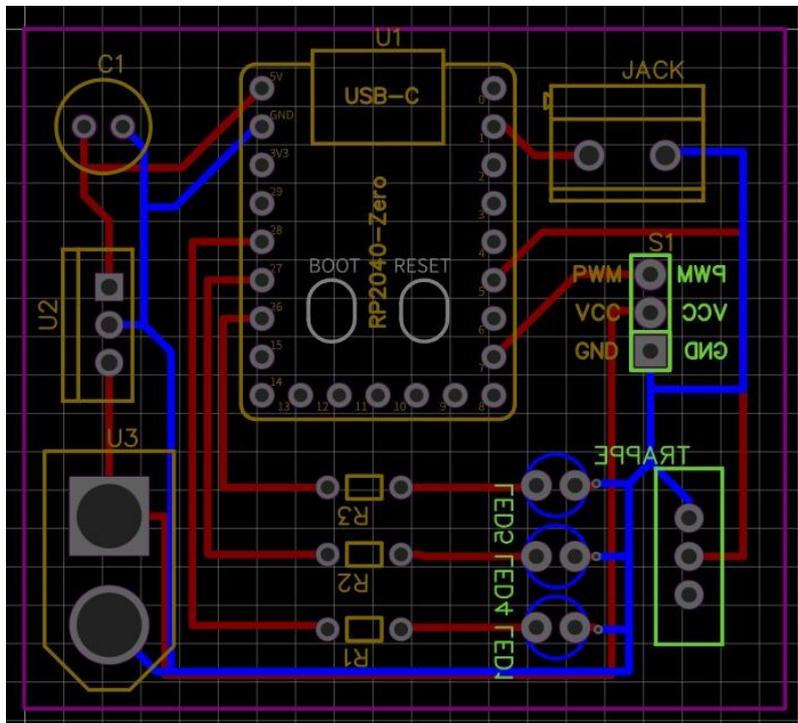


Schéma final de la minuterie d'Elobooster. Ce plan comporte une faute, en effet le branchement pour servomoteur (S1) a son pin VCC relié à l'alimentation (U3) sur laquelle venait la batterie. Or 9v n'étaient pas supportables pour le servomoteur et nous avons dû bricoler au dernier moment un fil faisant un pont entre le VCC S1 et une source de 5v. Nous avons choisi le pin 5v de la RP2040 zéro.

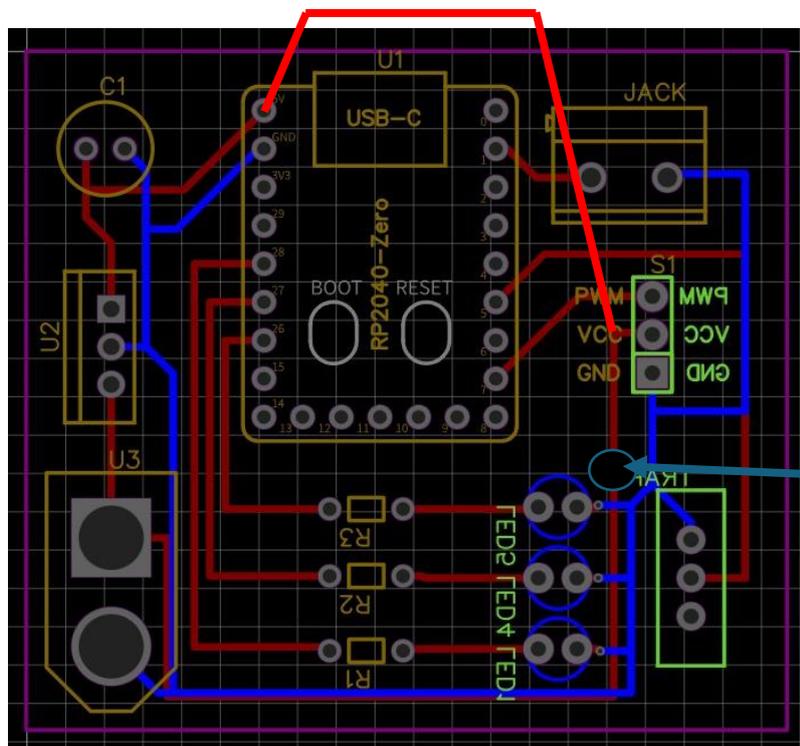
C1 -> condensateur pour gérer les variations de courant dues au servomoteur.

U2 -> 7805 qui prend une tension de 8 à 18v et qui renvoie une tension de 5v, le surplus est dissipé en chaleur.

JACK -> emplacement de soudure des deux fils reliés à la prise jack.

TRAPPE -> interrupteur ON 1/OFF/ON 2 avec un seul côté utilisé

LED + R (1-3) -> circuits de LEDs nous permettant de connaître l'état du circuit.



Version avec corrections de dernière minute. Fil ajouté en rouge clair.

Trou pour couper le courant, fait à la perceuse et foret de 2mm. Le risque était de couper la piste bleu juste à droite.

La minuterie est une PCB sur laquelle nous sommes venus souder les composants nécessaires à son fonctionnement. Nous avons choisi à nouveau un microcontrôleur RP2040 zéro pour leurs rapport qualité prix intéressant et pour standardiser notre électronique au sein de l'ESO.

Cette carte pilote un servomoteur qui agit sur le verrouillage ou non de la trappe du parachute. Le code est structuré en deux modes, un mode de test ou de mise en place, et un mode vol. Lorsqu'on démarre le microcontrôleur, il nous donne 5 secondes pour choisir notre mode de fonctionnement selon la position d'un interrupteur au bout du temps accordé. En mode préparation un bouton alterne la position du servomoteur entre fermé et ouvert. En mode vol la carte attend une déconnexion d'un jack signifiant le décollage de la fusée, lance un décompte équivalent au temps nécessaire pour rejoindre l'apogée, et met le servomoteur en position ouverte à la fin du décompte.

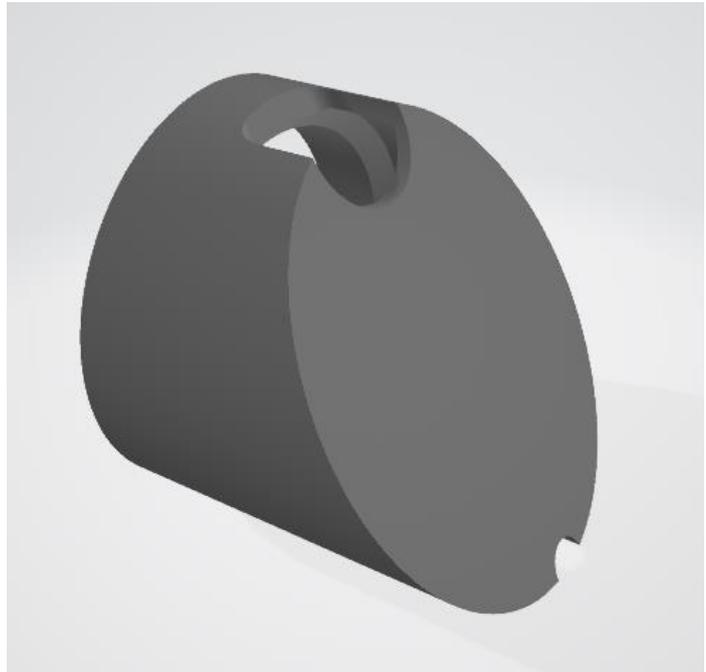
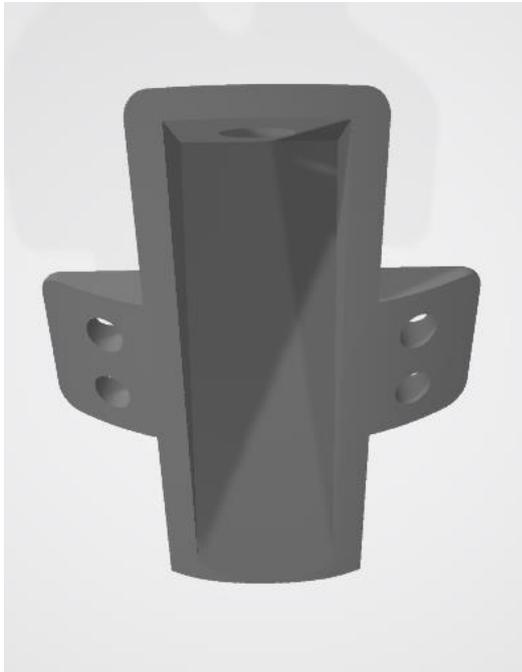
## Structure interne

Les composants électroniques ont été supportées à l'intérieur de la fusée par des pièces imprimées en 3D à base de PLA. Les pièces ont été conçues dans le but d'avoir des systèmes aussi compacts que possible, étant donné que la peau de la fusée était déjà faite et que nous ne souhaitons pas rallonger la fusée.

Un problème que nous avons rencontré est lié au lestage de la fusée, nous avons remarqué au C'space que la masse théorique et réelle de la fusée avaient une grande différence, nous avons donc dû ajouter de la masse à l'arrière. Cependant il nous a fallu créer un contenant sur place pour le lest que nous n'avions pas préparé, nous avons imprimé un réservoir à cailloux, mais ce

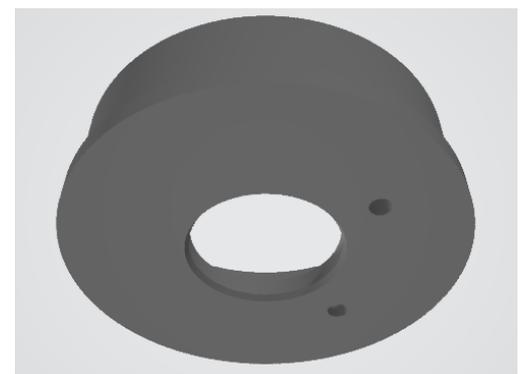
genre de chose aurait pu être imprimé avant de venir. Tous les clubs n'ayant pas d'imprimantes, nous avons eu de la chance d'en avoir une avec nous. Le lestage est une étape qui peut facilement être oubliée lors de la conception, et de la préparation de la fusée avant de partir au C'space.

La reprise de poussée de la fusée est faite par le bas. Cela par le biais d'une plaque en PLA sur laquelle le bas du moteur fusé vient buter. A posteriori pour des minifusées cette solution est simple et viable, mais à l'avenir sur des projets plus importants tels que des fusées expérimentales, il est structurellement **beaucoup** plus intéressant de faire une reprise de poussée par le haut du moteur. En effet le point de reprise de poussée matérialise l'endroit où toutes les forces s'appliquent sur votre fusée, ainsi si ce point est à mi-hauteur de la fusée, seule la partie au-dessus devra subir des tests mécaniques. Lors des tests de flexion par exemple, cela peut fournir un réel avantage.



Support de jack et rampe séparant le bloc moteur du parachute

Bague de reprise de poussée, située tout en bas de la fusée. Les deux trous servent au système antichute du moteur fusée. Deux vis et une languette en aluminium qui les relie vient pincer le moteur et l'empêche de ressortir.



## Parachute

Le parachute d'Elobooster est semblable à de la toile de coton. Il est de forme circulaire avec une cheminée au centre. Un problème que nous avons rencontré a été une erreur de mesure du diamètre de la cheminée, et avons obtenu un parachute avec une cheminée immense. Nous avons recousu par-dessus un second bout de tissus pour obtenir le diamètre voulu initialement. Malgré nos inquiétudes sur la fragilité que pouvait présenter cette couture, elle a bien tenu lors du vol.

Le parachute est attaché à la peau de la fusée par un mousqueton attaché autour d'une tige d'aluminium pliée et vissée à la peau. Le parachute possède 8 suspentes de corde en kevlar, chacune pouvant soutenir 70Kg de force. Un système anti-torche est également présent.

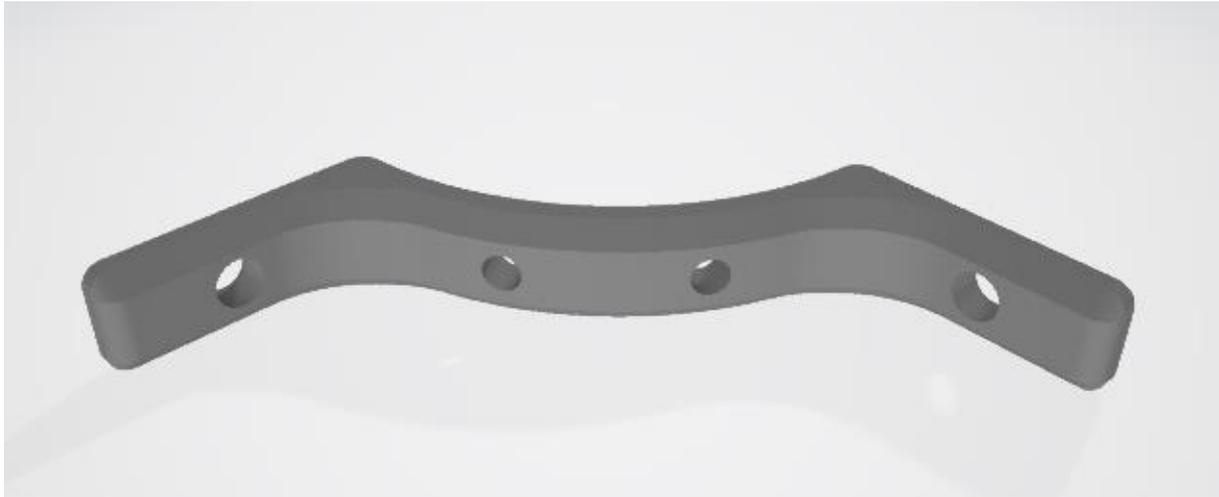
## Ailerons

Les ailerons d'Elobooster sont quatre rectangles de 3mm d'épaisseur en aluminium. A posteriori le choix de matériau est discutable, en effet la résistance d'une plaque de 2mm semble suffisante. D'autres matériaux comme le PVC, le plexiglass voire un dérivé de PLA auraient pu marcher. L'aluminium est plus cher comparé à ces options, une des raisons de son adoption est l'expérience qu'a notre club avec son utilisation. De plus cela nous instruit sur les procédés d'usinage des pièces et aux tolérances sur les plans.

Les ailerons sont vissés entre eux dans une sorte de cage d'équerres qui forme deux cercles concentriques au diamètre externe de la fusée. Ainsi le bloc ailerons peut simplement être glissé sur la fusée, et une fois la position finale atteinte, il suffit de visser les supports des ailerons à la peau. Ce système est très pratique pour monter et démonter rapidement les ailerons, les équerres les supportant sont plus dures à retirer dans notre cas mais cela dépend fortement de comment elles sont attachées à la peau. Ce système a un impact aérodynamique sur la trainée de la fusée, un système qui serait contenu dans la peau n'en engendre pas. Mais ces systèmes doivent laisser passer les ailerons par la peau, ce qui peut engendrer des fragilités.



Elobooster pendant sa qualification, on peut voir les deux rangées d'équerres (en noir) soutant les ailerons



Equerres utilisée, ces dernières sont en PETG-CF un plastique renforcé en fibres de carbone

Voici pour comparaison un système interne très similaire, celui-ci appartient à la fusée expérimentale Triplex de l'ESO.





## STABILITO

Stabilité de fusée à ailerons

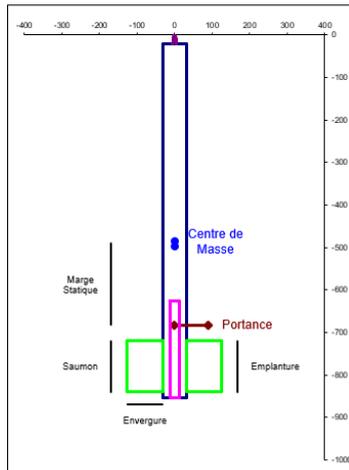
Remplir les cases jaunes

Fusée	
Nom	Elobooster
Club	ESO
Type	Minifusée
Masse	1410 g sans propu
Centre de Masse	470 mm sans propu
Longueur totale	855 mm
Diamètre Réf.	63 mm

Propulseur	
Type	Pandora (Pro24-6G BS)
Position du bas	855 mm

Coiffe	
Forme	Ogivale (pointue)
Hauteur	20 mm
Diamètre	10 mm

Ailerons	
Mono-empennage	
Emplature 'm'	120 mm
Saumon 'n'	120 mm
Flèche 'p'	0 mm
Envergure 'E'	94 mm
Epaisseur 'ep'	3 mm
Nombre	4
Position du bas	840 mm
Diamètre	63 mm



27/08/2024	Min	Résultats	Max
Finesse	10	13,6	20
Portance	15	21,6	21,6
Marge Stat.	1,5 D	2,93 D	3,13 D
Couple	30	63,5	67,7
XCp		682 mm	682 mm
MS /L		22% L	23% L

STABLE

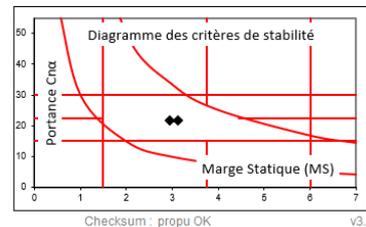
Language/Langue  Français

	Plusieurs diamètres.	
	Transition A	Transition B
Longueur 'L'	0 mm	0 mm
Diamètre 'D1'	10 mm	63 mm
Diamètre 'D2'	63 mm	63 mm
Implantation 'x'	20 mm	855 mm

	Propu plein	Propu vide	Sans propu
Masse propu	0,16 kg	0,084 kg	-
CdM propu	114 mm	114 mm	-
Masse fusée	1,57 kg	1,494 kg	1,41 kg
CdM fusée	498 mm	485 mm	470 mm

	XCp	Cna
Coiffe	9 mm	0,1
Ailerons	750 mm	19,6

	Transition A	Transition B
	20 mm	1,9
	855 mm	0,0

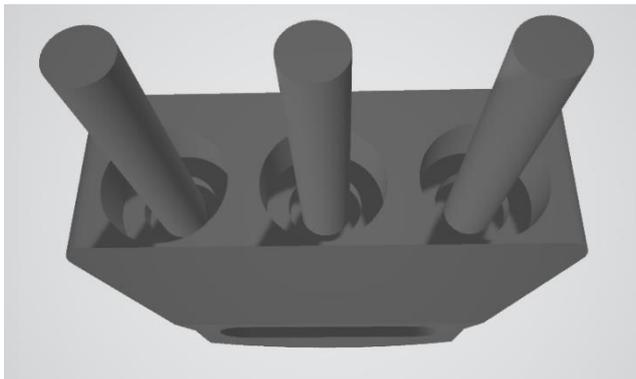


Commentaire libre :

Stabtraj final

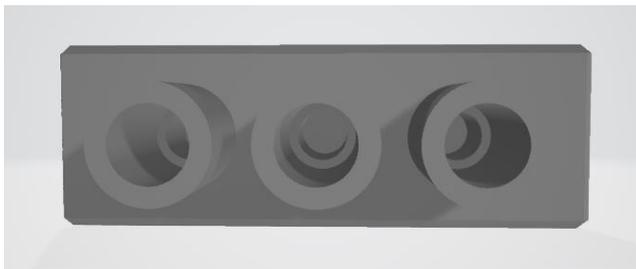
## Système d'éjection de trappe

Le principe dont nous nous sommes servis pour éjecter la trappe est très simple, il utilise des ressorts comprimés entre deux supports. Une languette empêche le support appartenant à la trappe de bouger, la languette étant actionnée par un servomoteur. Les supports ont aussi pour but de guider les ressorts pour que ces derniers ne se plient pas sous la contrainte. Ils ont également pour but de protéger les ressorts du tissu du parachute ou des suspentes qui pourraient venir enrayer les ressorts. Ainsi les supports ont une forme de prise male-femelle autour de chaque ressort, permettant guidage et protection à la fois. Les ressorts ne sont pas attachés à la fusée car cela gênerait leur fonctionnement, les collages et vissages ont échoués. Pour qu'ils ne se perdent pas lors de leur éjection, un fil relie les deux ressorts pour les attacher entre eux, leur empêchant de s'échapper. Cela n'entrave pas leur compression, ce qui est l'effet recherché.



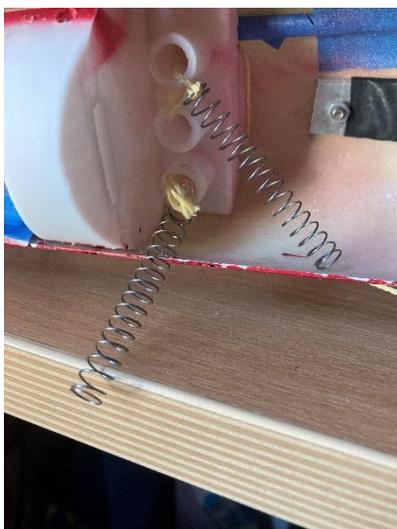
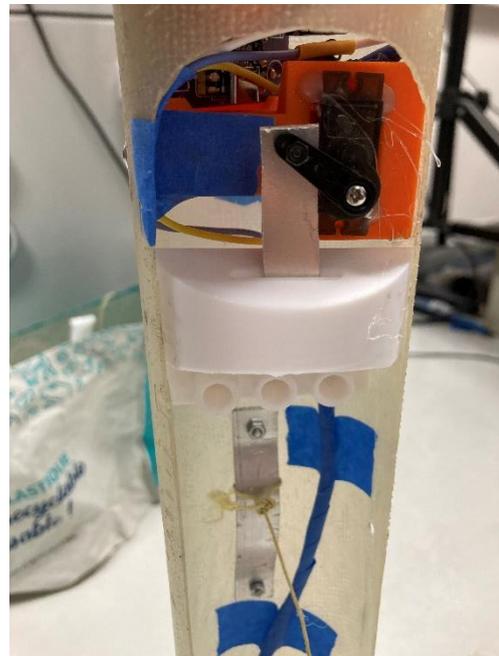
Partie male du système d'éjection, les ressorts se plaçaient autour de ces tiges.

Cette partie était liée à la trappe, on peut voir en bas la fente dans laquelle venait se placer la languette d'aluminium.



Partie femelle restant dans la fusée.

Vue de face du système d'éjection sans la trappe.



Façon dont les ressorts sont attachés, un seul fil passe derrière la pièce blanche et relie les deux ressorts, les empêchant de se perdre.

## Vol, remarques et conclusion

Elobooster a réalisé un vol nominal au C'space 2024. Voici quelques observations sur son déroulé :

- Lors du décollage, probablement à cause de l'effet gyroscopique, la fusée a oscillé sur la première demi-seconde de vol. Nous avons estimé qu'en sortie de rampe les aimants du système de mesure de vitesse de rotation sont sortis de leur nacelle. Un déséquilibre dans la nacelle en rotation a pu être la cause de ces oscillations. La fusée s'est ensuite stabilisée, possiblement en prenant de la vitesse. D'autres raisons sont soit par rééquilibrage de la nacelle car à l'atterrissage il n'y avait plus les aimants à bord, soit par blocage de la rotation de l'arbre. Etant donné que c'est en sortie de rampe que nos mesures ont cessé de fonctionner il est possible que la turbine se soit arrêtée à ce moment précis. Nous avons retrouvé la turbine bloquée après l'atterrissage. Un dysfonctionnement électronique du système de mesure est à écarter dû à sa fiabilité satisfaisante.
- L'ouverture du parachute était programmée pour avant l'apogée, mais le parachute a été libéré plus d'une seconde après l'apogée, ce qui a fait plus de peur que de mal. Si la trappe aurait mis plus de temps à s'ouvrir il est possible que le parachute ne puisse plus physiquement sortir. Ce à cause des efforts aérodynamique causés par la reprise de vitesse. Plusieurs hypothèses viennent en tête, la première étant une mauvaise estimation de l'apogée de la fusée par StabTraj. En effet l'aérodynamique d'Elobooster doit vraiment se situer sur les limites de validité de cette simulation, voir pire, en dehors du domaine. Tout d'abord avec la trainée supplémentaire de la turbine qui a dû réduire l'altitude d'apogée, mais aussi à cause des vibrations au décollage citées plus haut. Une autre hypothèse viendrait de la longueur du câble des prises jack détectant le décollage, leur longueur aurait pu être jugée excessive, ce qui aurait pu causer un démarrage tardif du décompte de largage de la trappe, le temps que la fusée sorte de rampe.

Pour conclure Elobooster a été une réussite partielle à la suite de son vol nominal, mais à l'échec de son expérience. Nous avons tous grandement apprécié notre participation au C'space 2024 et avons pu parler à de nombreux autres clubs et membres. L'expérience que nous avons pu obtenir et les retours et remarques des autres sont vraiment inestimables. Juste par son ambiance cet évènement nous a marqués, et nous nous aimerions y participer à nouveau à l'avenir, pour reconduire Elobooster ou pour d'autres projets.

Nous recommandons chaudement à toutes les personnes souhaitant faire une minifusée de participer au C'space, et de s'efforcer de se qualifier !

