



Projet STAROS-II (FX-03)

Rapport de fin de projet



31 août 2023

Remerciements

Ce projet n'aurait pas été possible sans de nombreuses personnes et de nombreux partenaires. Nos premiers remerciements vont pour toute l'équipe de STAROS-II pour son investissement et sa détermination tout au long du projet.

Nous remercions M. GARCONNET pour la réalisation de nos pièces en aluminium sur mesure ; Mme. RABILLER pour les cours de couture nécessaire à la réalisation des parachutes ; M. SIMONET pour le prêt du camion nécessaire pour emmener tous notre matériel jusqu'à Tarbes.

Nous remercions Planète Sciences et le CNES pour l'organisation de ce fabuleux évènement et surtout pour le suivi technique régulier tout au long du projet.

Nous remercions nos partenaires que sont le CROUS Orléans-Tours, l'université d'orléans et RS Component pour leurs aides financières sans lesquelles ce projet n'aurait jamais vu le jour.

Nous remercions l'école Polytech Orléans pour la mise à disposition de ses locaux pour réaliser nos projets.

Nous remercions Cigarillos_prod pour la réalisation d'une excellente vidéo instructive sur le C'Space d'où nous avons pu récupérer quelques images pour ce rapport.

Sommaire

1 Description mécanique.....	6
1.1 Aperçu général de la fusée.....	6
1.2 StabTraj et ailerons.....	7
1.3 Système de libération de la trappe parachute.....	10
1.4 Parachutes.....	10
1.5 Supports mécaniques des trappes électroniques.....	11
1.6 Système d'aérofreins.....	12
1.7 Système de séparation.....	14
2 Description électronique et informatique.....	15
2.1 I/O de la fusée.....	15
2.2 IHM.....	16
2.3 Circuit d'allumage du moteur.....	16
2.4 Schéma électronique des cartes.....	16
2.5 Informatique.....	18
3 Expérience.....	18
3.1 Calcul de trajectoire.....	18
3.2 Système de séparation.....	19
4 Déroulement du vol.....	19

Table des illustrations

Tableau 1 : Membre du projet, triés par années d'ancienneté	4
Figure 1 : Diagramme de GANTT initialement prévu pour l'organisation du projet	6
Figure 2 : CAO complète	7
Figure 3 : StabTraj initial	7
Figure 4 : StabTraj final	8
Figure 5 : Fusée finale, étages séparés	8
Figure 6 : Gabarit de formation pour les fixations	9
Figure 7 : Les ailerons fixés, haut à gauche et bas à droite	9
Figure 8 : CAO du système de libération de la trappe parachute	10
Figure 9 : Parachute de l'étage du haut	11
Figure 10 : Carte électronique fixée sur un rack + carte LEDs/IHM	11
Figure 11 : Agencement des batteries avec une des cartes dans une baie électronique	12
Figure 12 : CAO du système d'aérofreins	13
Figure 13 : Aérofreins déployés (image de droite par cigarillos_prod)	13
Figure 14 : Système de verrouillage de l'étage inférieur (verrouillé à gauche et ouvert à droite)	14
Figure 15 : Encoche de verrouillage de l'étage du haut.	14
Figure 16 : Alignement des deux étages	15
Figure 17 : Schéma électronique de la carte LED	16
Figure 18 : Schéma électronique du séquenceur de l'étage inférieur	17
Figure 19 : Schéma électronique du séquenceur de l'étage supérieur	17
Figure 20 : Extrémité de l'étage du haut. La forme du trou centrale permet le passage de l'objectif de la caméra	19
Figure 21 : L'équipe de STAROS-II sur le pas de tir installent la fusée en rampe	19
Figure 22 : STAROS-II sur sa rampe de lancement	20

Introduction

Ce projet, développé sur 3 années, est mené par l'association Space'Tech Orléans, l'association de l'air et de l'espace de l'université d'Orléans. Un total de 17 étudiants a participé à ce projet (cf. Tableau 1). Ils sont issus de l'école Polytech Orléans, toutes années confondues : de la première année de classe préparatoire à la 5e année de cycle ingénieur. Tout comme l'association, ce projet est totalement indépendant de leur cursus scolaire.

Tableau 1 : Membre du projet, triés par années d'ancienneté

Actifs sur le projet pendant les 3 années :	
Aymerick BATS	Expérience
Hugo KREMER	Mécanique
Baptiste PAVIE	Responsable mécanique
Etienne SIMONET	Chef de projet + Responsable code
Actifs sur STAROS-II pendant les 2 années :	
Béatriz CARDA	Responsable communication
Mathis CASO	Mécanique
Raynald DUMAS	Electronique + Assistant C'Space
Philippe PERREE	Mécanique
Noé QUERO	Responsable électronique
Marjorie REYJAUD	Mécanique
Lucas ZIMMER	Mécanique + Mécanique des fluides
Actifs sur STAROS-II depuis 1 an :	
Bavly ABDELMALEK	Mécanique
Alix ALLEMAND	Mécanique

Eugénie BLANC	Mécanique
Elise GARNIER	Mécanique
Gabriel GOBIN	Mécanique
Mathilde MOUTHAUD	Electronique
Ferdinand PRUDHOMME	Mécanique
Ezgi YIYIT	Mécanique

Ce projet fait suite au projet STAROS-I, une mini-fusée produite en 1 an qui avait pour but d'apprendre les bases du domaine. Cette mini-fusée embarquait plusieurs capteurs afin d'obtenir des données de vol dans le but de réaliser une fusée expérimentale de type double étage par la suite : STAROS-II.

Conçue en 2 ans, cette fusée expérimentale devait être une bi-étage avec séparation active. L'expérience embarquée devait être la détection des résonances de Schumann. Cette expérience avait déjà été mise en place dans la fusée expérimentale Tigresse-II, lancée par Space'Tech Orléans au C'Space 2022. L'objectif était d'améliorer et de réintégrer cette expérience pour obtenir des résultats de meilleure qualité.

Le projet devait se dérouler en deux phases, correspondant aux deux années du projet : la première année devait nous permettre de mener un travail de R&D sur la conception de la peau et de l'électronique de la fusée d'une part, et surtout de mettre au point un système de séparation fiable pour la fusée d'autre part. Le reste du projet devait ensuite prendre forme autour de cet élément pendant la seconde année à savoir la conception mécanique et l'assemblage de la fusée. Cette organisation est imagée par le diagramme de GANTT ci-dessous (figure. 1).

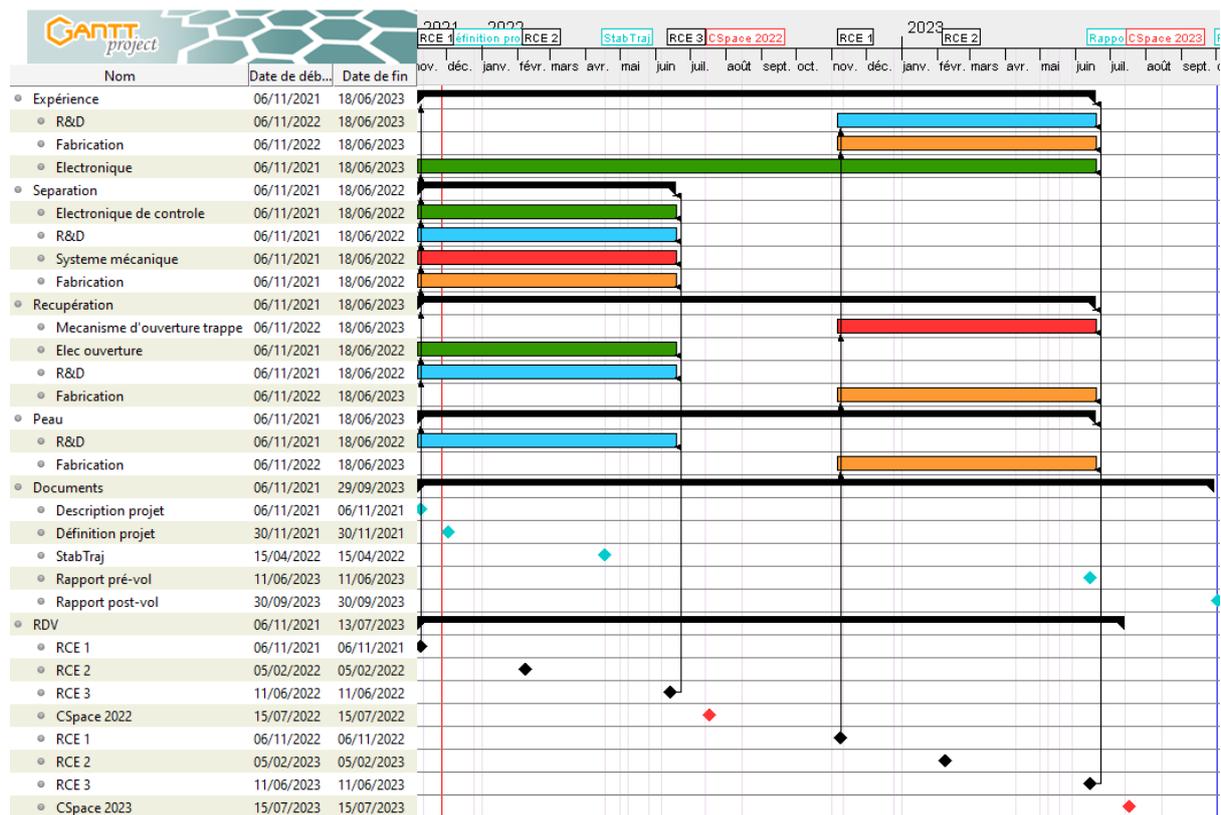


Figure 1 : Diagramme de GANTT initialement prévu pour l'organisation du projet

1 Description mécanique

1.1 Aperçu général de la fusée

La fusée a été réalisée sur une peau porteuse en aluminium de diamètre extérieur 10 cm d'une épaisseur de 2 mm. La coiffe, basée sur le principe de l'ogive de Von Karman, a été imprimée en 3D avec du PLA. Les ailerons de l'étage inférieur sont en aluminium tandis que ceux de l'étage supérieur sont en fibre de carbone. Nous avons fait usiner des bagues en aluminium pour maintenir les moteurs alignés, mais aussi pour transmettre parfaitement et sans risques la poussée.

Afin d'avoir un aperçu général de la fusée, nous en avons réalisé la CAO complète à l'aide du logiciel CATIA. Nous avons tout d'abord réalisé tous les systèmes de la fusée séparément afin d'imprimer en PLA des prototypes pour tester ces derniers. Ensuite, nous avons assemblé tous ces systèmes pour avoir une idée globale de ce à quoi ressemblerait la fusée entière. Cela nous a permis de détecter des problèmes mécaniques avant de passer à la construction de la fusée. Tout au long du processus de conception et de construction, la CAO a donc été un élément central.

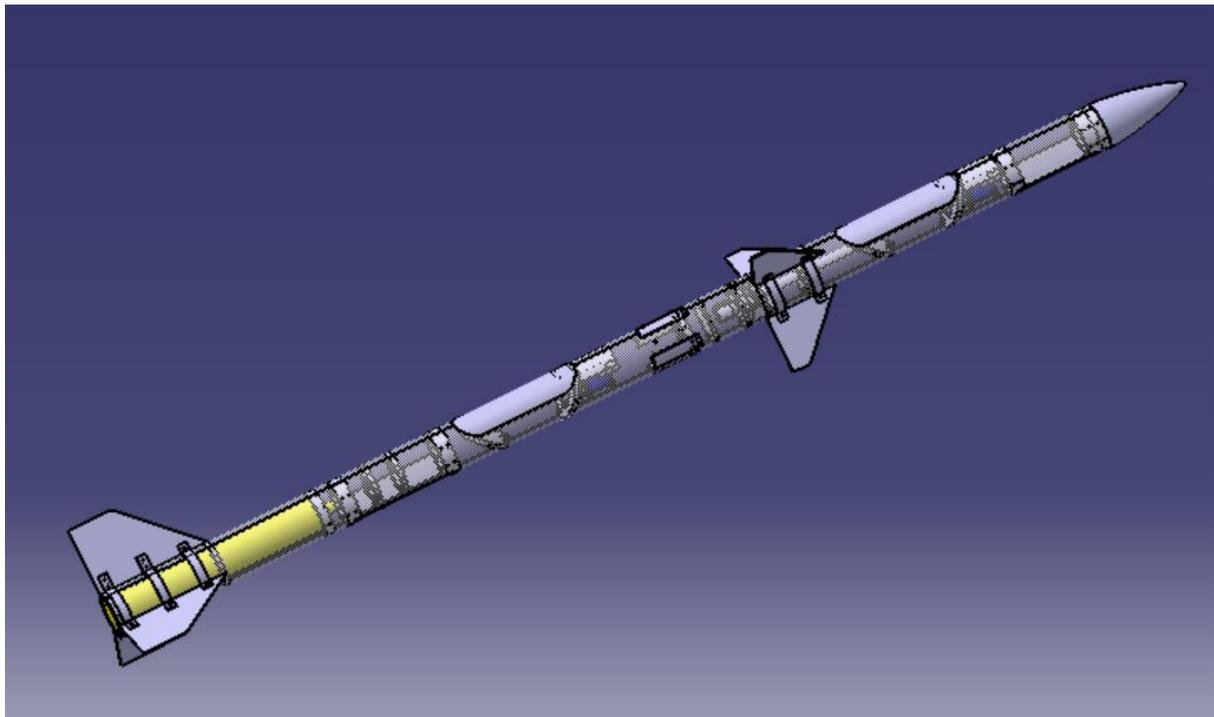


Figure 2 : CAO complète

1.2 StabTraj et ailerons

La réalisation d'un StabTraj stable a été la première étape de notre projet. Elle s'est révélée être très complexe, car la fusée devait être stable entière mais aussi l'étage du haut seul. Il était indispensable pour cela d'avoir une fusée bi-empennage. Après de nombreux essais, nous avons trouvé, avec l'accord de nos suiveurs, un compromis permettant la stabilité relative de notre fusée. Nous avons donc construit notre fusée sur cette base.

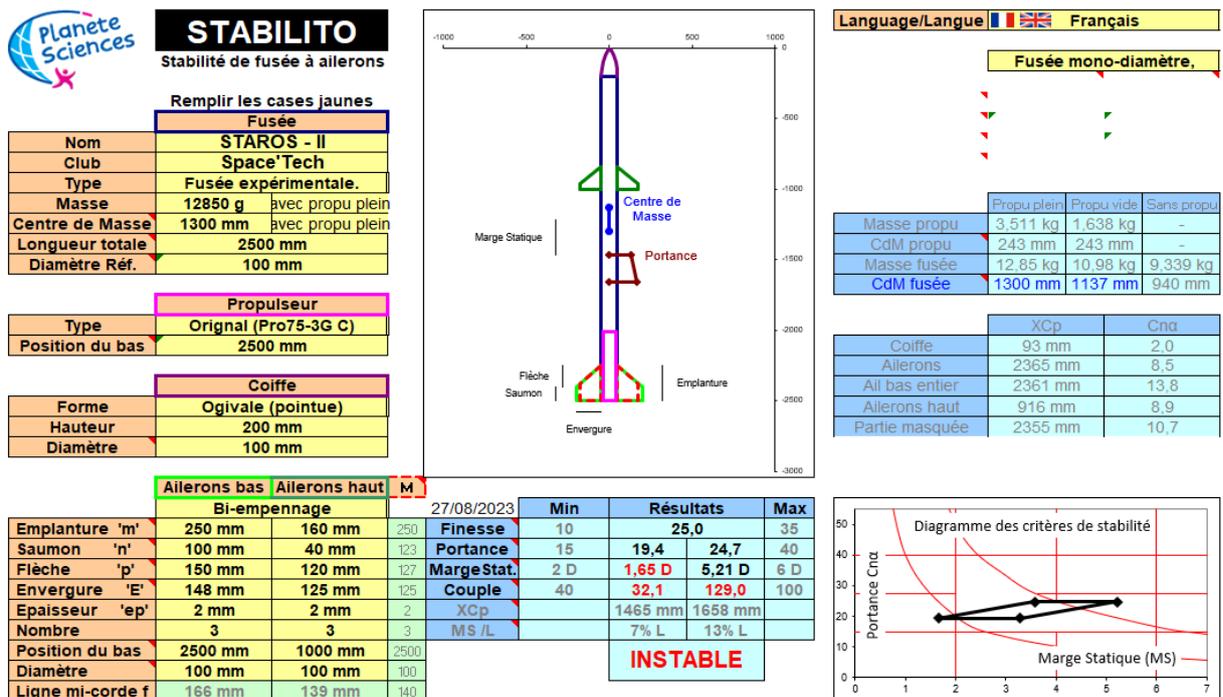


Figure 3 : StabTraj initial

Cependant, à notre arrivée au C'Space, il nous a été confié que le StabTraj devait être réalisé sans propulseur alors que nous l'avions fait avec le paramètre par défaut, soit avec propulseur plein. Le StabTraj était donc totalement instable. Pour pallier ce problème de dernière minute, nous avons décidé d'abaisser les ailerons de l'étage du haut de 80cm ce qui revenait à les placer sur l'étage du bas à seulement 15 cm de ceux du bas. Cela nous obligeait à abandonner l'idée d'une fusée bi-étage à proprement parler, car l'étage du haut ne possédait plus d'ailerons et n'était plus qu'une masse morte larguée à l'apogée.

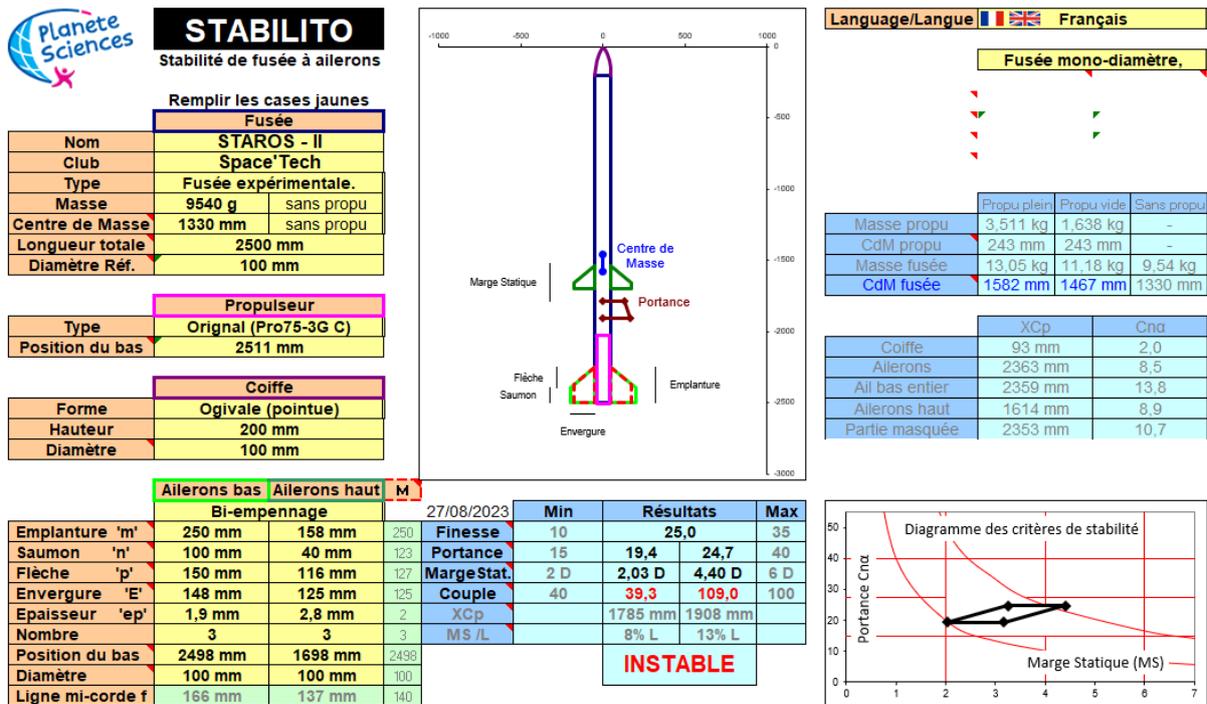


Figure 4 : StabTraj final



Figure 5 : Fusée finale, étages séparés

En ce qui concerne la fixation des ailerons, elle a été réalisée par serrage. Nous avons pris des bandes d'aluminium de 1 cm de largeur et de 2 mm d'épaisseur. Nous avons déformé ces bandes plates d'aluminium en les chauffant et en les plaquant contre un morceau de tube de même diamètre que notre fusée. Afin d'avoir la longueur et la courbure parfaite, nous avons imprimé un gabarit en 3D qui nous a également permis de vérifier les pliures réalisées aux deux extrémités et contre lesquelles les ailerons seront serrés. Nous avons volontairement réduit un peu la longueur de chaque bande de façon que l'assemblage soit sous contrainte et que les ailerons ne bougent pas lors de la poussée. Cette méthode nous permet de pouvoir démonter et remonter les ailerons facilement tout en ayant une fixation très solide.



Figure 6 : Gabarit de formation pour les fixations



Figure 7 : Les ailerons fixés, haut à gauche et bas à droite

1.3 Système de libération de la trappe parachute

La fusée est censée se séparer en plein vol, il faut donc prévoir deux parachutes ainsi que deux systèmes d'ouverture de trappe pour ces parachutes. Ce système doit être le plus fiable et compact possible.

L'idée était de retenir la trappe à l'aide d'une tige reliant cette dernière au système d'ouverture. Cette tige serait retirée de la trappe à l'aide d'une crémaillère entraînée par une roue dentée liée à un motoréducteur.

Plus tard, nous avons dû remplacer le motoréducteur par un servomoteur, car il était plus facile à piloter et l'ouverture ne nécessitait pas beaucoup de force.

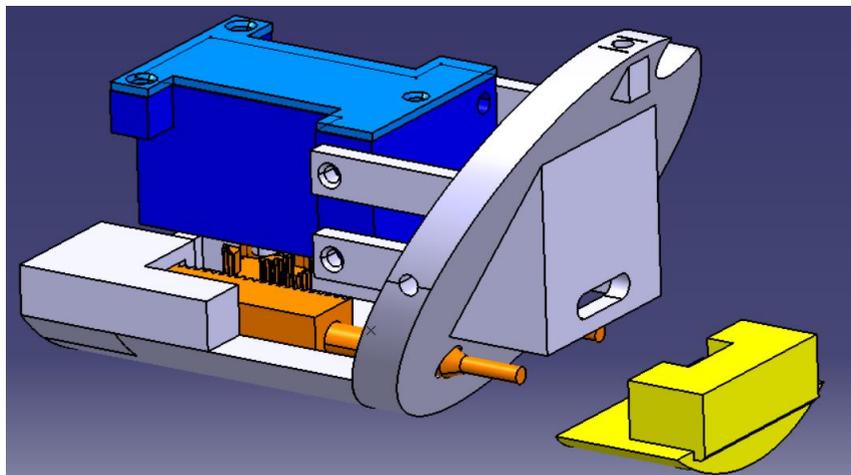


Figure 8 : CAO du système de libération de la trappe parachute

Enfin, pour assurer une éjection rapide et sûre de la trappe, nous avons donc placé un ressort entre le système d'ouverture et la trappe.

Ce système a été imprimé en 3D avec du PLA à l'exception de la tige qui a été imprimée en PETG tungstène 75 % afin de garantir l'intégrité de la pièce ainsi que la fermeture de la trappe parachute tout au long de la poussée.

1.4 Parachutes

Chaque étage est muni d'un parachute. Nous avons utilisé de la toile de cerf-volant professionnel comme matériau. Les contours sont cousus au biais du couturier. Les fixations des suspentes sont des œillets fixés sur des morceaux de sangles cousus sur la toile pour renforcer la fixation. De la corde élastique est utilisée pour les suspentes. On y retrouve un anneau anti-torche, un émerillon et un mousqueton à vis.



Figure 9 : Parachute de l'étage du haut

1.5 Supports mécaniques des trappes électroniques

Pour soutenir l'électronique de la fusée, nous avons imaginé un système de racks démontable pour sortir facilement les cartes et batteries sans devoir démonter toute la fusée. Pour cela, les cartes électroniques étaient de forme arrondie, mais avec des méplats sur 2 bords afin de pouvoir les glisser hors du tube en gardant une trappe de taille raisonnable.

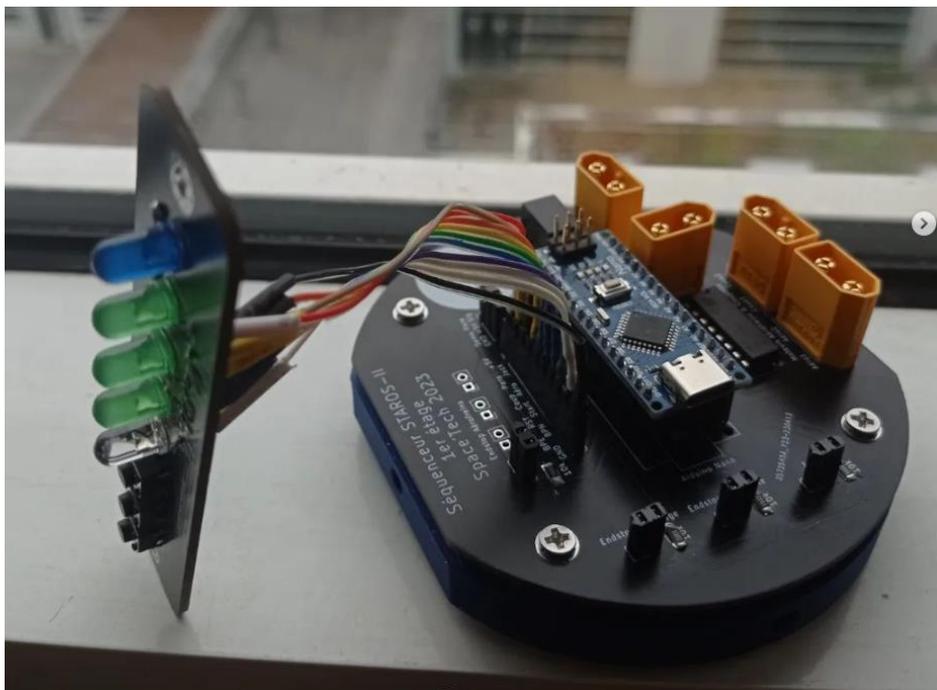


Figure 10 : Carte électronique fixée sur un rack + carte LEDs/IHM

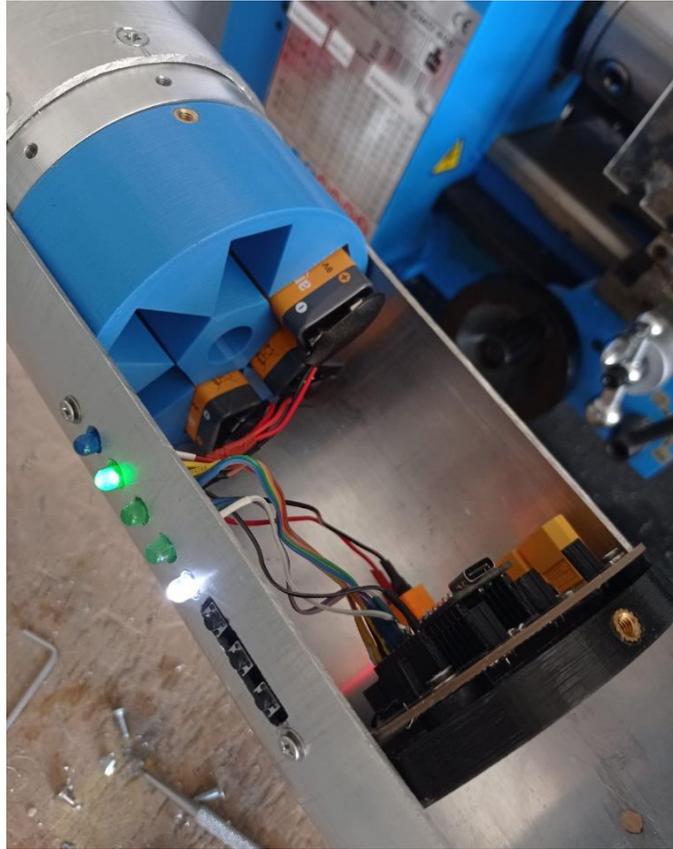


Figure 11 : Agencement des batteries avec une des cartes dans une baie électronique

Notre projet ayant subi beaucoup de changement pendant la semaine du C'Space, cette stratégie s'est révélée très utile pour ajuster et modifier nos systèmes rapidement et sans retarder la mécanique.

1.6 Système d'aérofreins

Le système des aérofreins est le second système important de l'expérience de séparation de deux étages d'une fusée. En effet, il est primordial d'éloigner les deux étages l'un de l'autre pour éventuellement effectuer un second allumage moteur ou sans cette option éviter que les deux étages restent collés malgré l'activation du système de séparation.

Pour créer un aérofrein, nous sommes restés sur l'option la plus logique, pousser une plaque de métal reliée à une charnière afin qu'elle sorte du tube de la fusée et crée une résistance. Pour cela, la première étape était de créer un système pouvant pousser simultanément les quatre aérofreins.

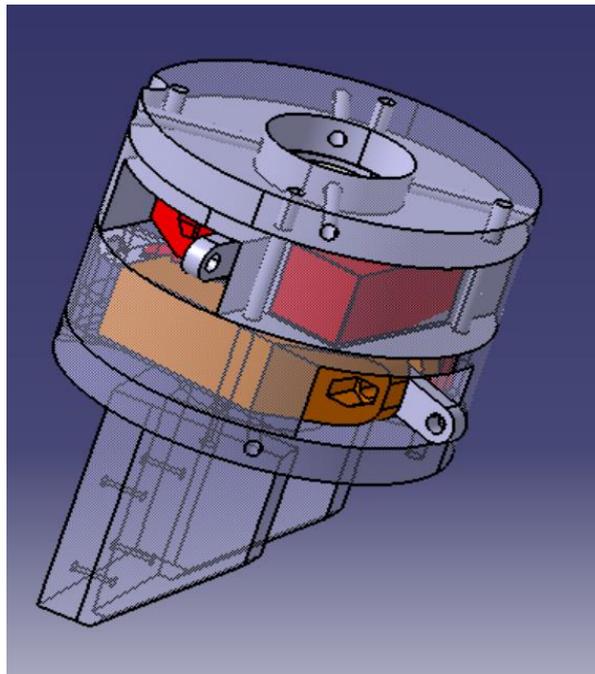


Figure 12 : CAO du système d'aérofreins

L'option retenue a été motivée par la contrainte suivante : maximiser la fiabilité quitte à faire un système moins compact.

Le système est donc composé de quatre crémaillères actionnées par un engrenage central actionné par un moteur à courant continu. Les aérofreins sont fixés aux crémaillères avec des bielles permettant ainsi la rotation de chaque aérofrein ainsi qu'un léger décalage nécessaire au bon fonctionnement du système.



Figure 13 : Aérofreins déployés (image de droite par cigarillos_prod)

1.7 Système de séparation

Au cours de ces deux années, plusieurs prototypes de systèmes de séparation ont été imaginés et testés notamment avec des ressorts et des tiges filetées. Finalement, pour plusieurs raisons, il a été décidé d'utiliser notre système à "hélice" permettant le maintien entre les deux étages. Pour cela, les 2 étages sont munis d'encoches. L'étage inférieur contient le système composé d'une « hélice » relié à un moteur à courant continu. En pivotant, cette hélice vient verrouiller les deux étages ensemble. Ce système ne permettant pas une séparation dynamique des deux étages, des aérofreins ont donc dû être ajoutés sur l'étage inférieur. Ils permettaient alors de freiner la partie inférieure provoquant la séparation franche des deux étages. Des tiges d'acier assurent la stabilité et empêchent l'arc-boutement de l'opération de séparation.



Figure 14 : Système de verrouillage de l'étage inférieur (verrouillé à gauche et ouvert à droite)

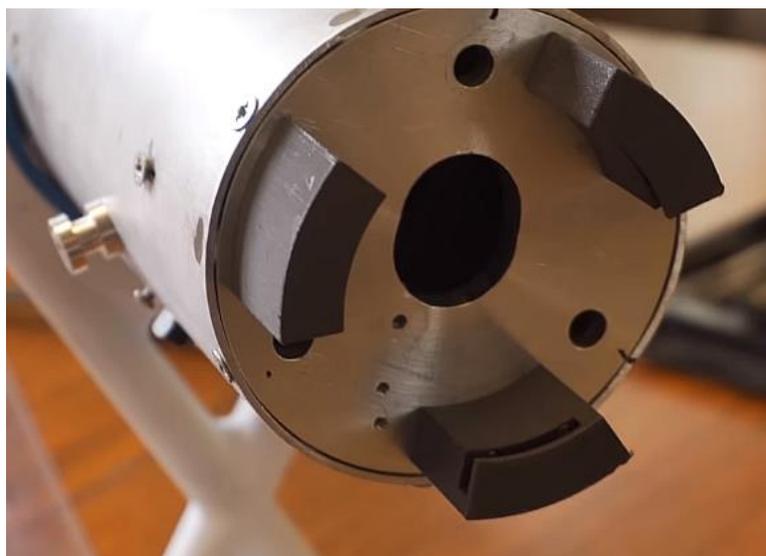


Figure 15 : Encoche de verrouillage de l'étage du haut.

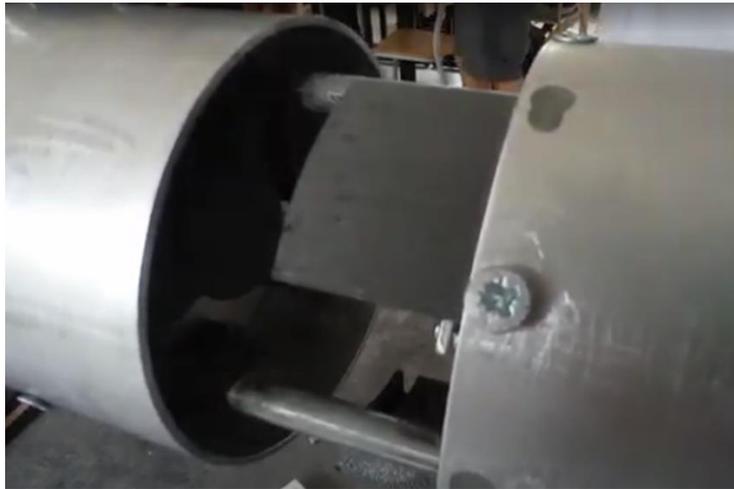


Figure 16 : Alignement des deux étages

Les pièces imaginées pour ce système de séparation allaient devoir être très résistantes face aux différentes forces. L'impression 3D au PLA a donc été exclue. Les pièces étaient aussi trop complexes pour être usinées. Nous avons donc utilisé un filament PETG composé à 75 % de tungstène.

Les pièces étaient très résistantes, mais il y avait beaucoup de frottements entre ces pièces ce qui a nécessité l'utilisation de graisse. Constatant cela, si le système venait à être reproduit, l'utilisation d'un filament nylon serait plus approprié. Il est tout aussi résistant, mais générerait moins de frottements.

2 Description électronique et informatique

L'électronique de la fusée s'est faite en plusieurs étapes. Premièrement, il fallait se mettre en accord avec l'équipe méca afin de savoir quels I/O seraient nécessaires (capteurs, moteurs, IC, etc.) et comment les interfacier entre eux. Ensuite, de ces I/O, en découlait l'IHM, appelée carte LED dont l'objectif était qu'elle soit générique pour les 2 étages. Finalement, la partie la plus complexe a été de concevoir le circuit d'allumage du moteur de l'étage supérieur.

2.1 I/O de la fusée

Initialement, il était prévu d'avoir des capteurs fin-de-course sur chaque partie de la fusée (trappes parachute, découplage et aérofreins). Mais par soucis de place, seul un capteur fin de course pour le découplage a été gardé afin que l'étage supérieur sache quand il est totalement libéré de l'étage inférieur. Ensuite, pour les moteurs, 2 moteurs à courant continu ont été utilisés dans l'étage inférieur pour piloter les aérofreins et le système de découplage, tous deux interfacés avec le microcontrôleur via un pont en H. Les trappes parachutes, quant à elles, ont utilisé des servomoteurs, permettant de contrôler assurément la course des moteurs via des sorties PWM. Afin que chaque étage détecte la mise à feu de la fusée, ils

étaient équipés de câbles Jack. Également, chaque étage était équipé d'un module de carte SD afin d'enregistrer chaque étape de la fusée pendant son vol. Finalement, l'étage supérieur était équipé d'un gyroscope lui permettant de déclencher son moteur si l'angle était correct.

2.2 IHM

La carte LED permettait de se rendre compte lors de la séquence d'initialisation les étapes à effectuer, également si l'étape réalisée était dans sa position désirée ou non. Ainsi, 5 LED et 3 boutons-poussoirs ont été interfacés. Les LED permettent respectivement de connaître pour les deux étages indépendants les états du câble Jack, de la trappe parachute, des aérofreins pour l'étage inférieur ou de l'initialisation du gyroscope pour l'étage supérieur, le couplage des 2 étages et finalement une dernière LED témoignant que la fusée est prête à décoller. Les boutons quant à eux, permettaient de passer d'un état à un autre, de passer à l'étape suivante et de réinitialiser l'état de la fusée.

2.3 Circuit d'allumage du moteur

Cette partie a nécessité plusieurs versions. Initialement, nous voulions éviter d'utiliser des relais afin d'éviter un éventuel allumage non voulu du moteur. Ainsi, la première version utilisait des MOSFET permettant de couper les deux lignes du système d'allumage. Malheureusement, ce système s'est avéré non concluant, ainsi, nous avons dû nous restreindre à utiliser des relais, en prenant soin de les positionner dans un axe perpendiculaire aux vibrations les plus fortes de la fusée, également tête-bêche afin qu'aucun des 2 relais ne puisse s'activer en même temps.

2.4 Schéma électronique des cartes

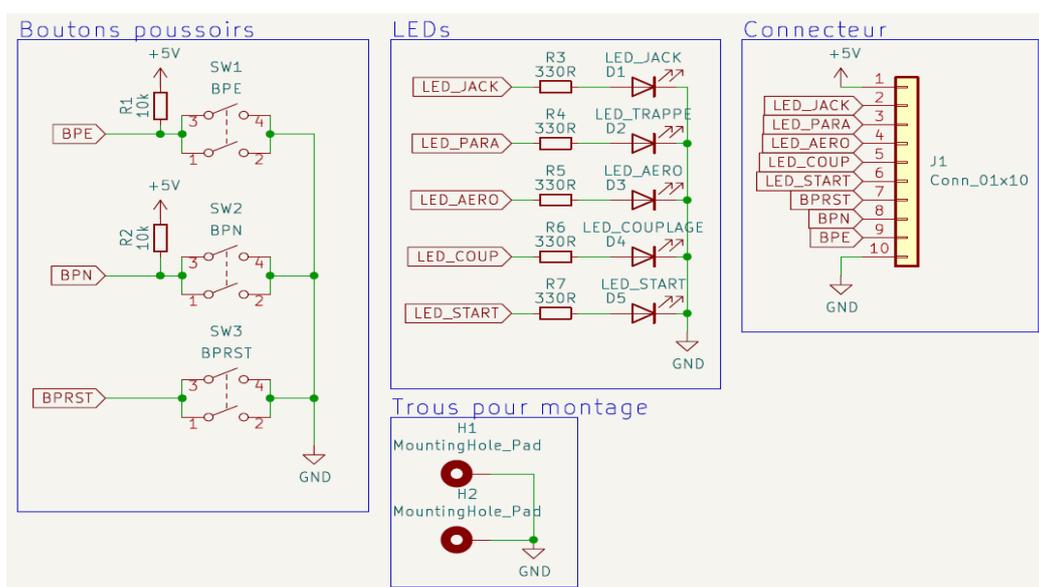


Figure 17 : Schéma électronique de la carte LED

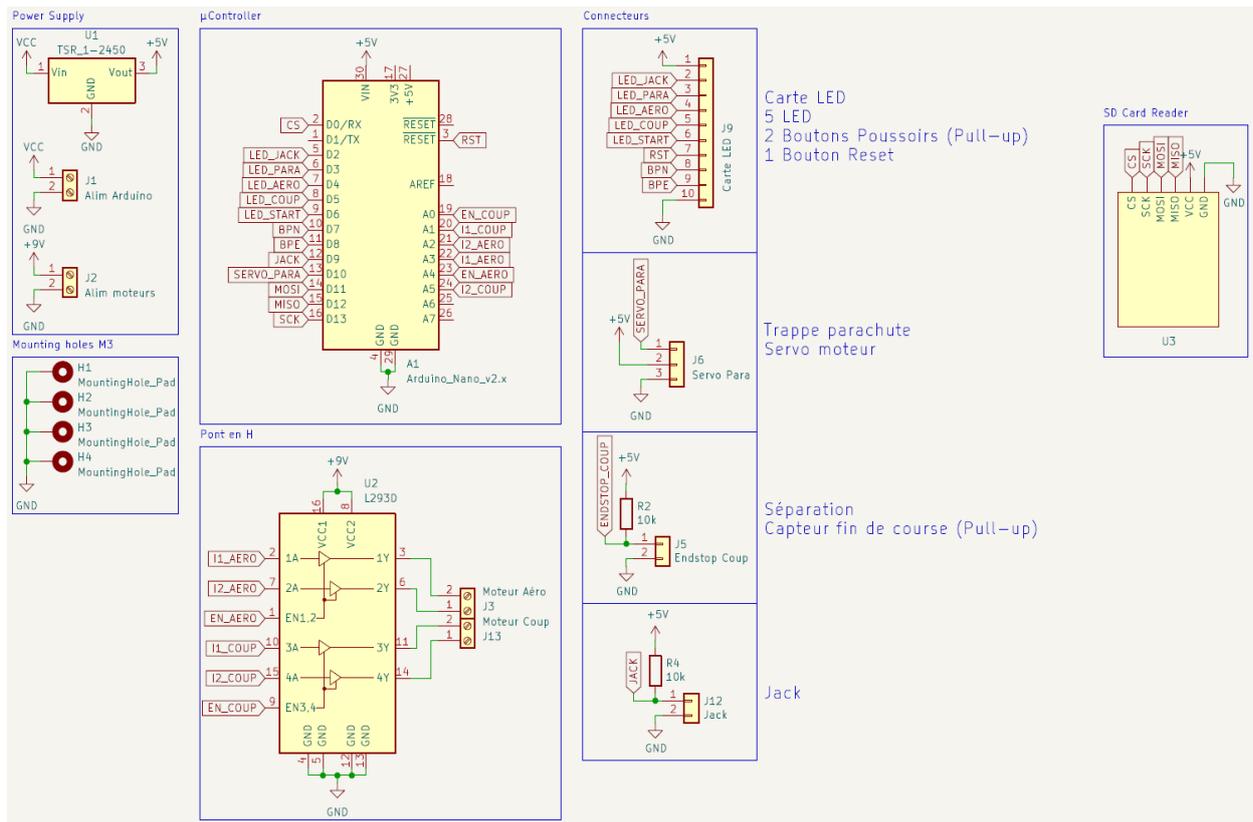


Figure 18 : Schéma électronique du séquenceur de l'étage inférieur

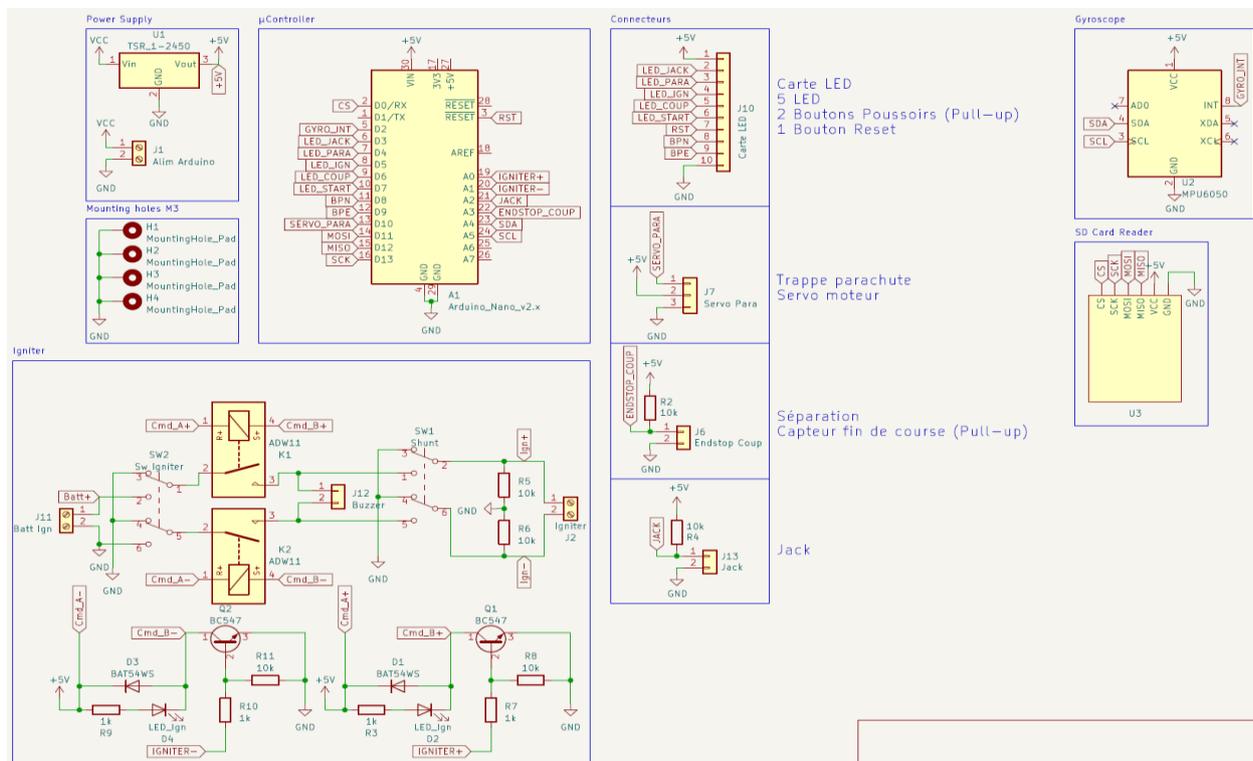


Figure 19 : Schéma électronique du séquenceur de l'étage supérieur

2.5 Informatique

Toute la programmation de la fusée s'est faite sur Arduino. Il y avait un programme différent dans chaque étage. La carte du bas contrôlait la séparation, les aérofreins et le déploiement du parachute du bas. La carte du haut contrôlait l'ouverture du parachute du haut et l'enregistrement des données du gyroscope sur carte SD.

Les deux cartes faisaient office de séquenceur indépendamment l'une de l'autre. Chacune avait donc son câble jack pour démarrer la séquence au décollage. Pour gérer les étapes de vol, nous avons utilisé des machines d'état. Chaque état fonctionne en boucle tant qu'une condition n'est pas remplie comme l'activation d'un capteur ou l'activation d'un bouton sur l'IHM ou le débranchement des jacks.

La carte de l'étage du haut devait gérer l'expérience en vol en plus des systèmes mécaniques liés au fonctionnement de la fusée. Nous ne pouvions donc pas utiliser la fonction `delay()` pour séquencer nos actions. En effet, `delay()` interrompt tous les processus de la carte pendant un temps donné, ce qui est incompatible avec l'enregistrement fréquent de données. Nous avons donc utilisé la fonction `millis()` pour synchroniser toutes les actions sur l'horloge interne de l'Arduino.

3 Expérience

A l'origine, l'expérience embarquée était le déploiement d'antennes sphériques permettant de détecter les résonances de Schumann. Ce sont des ondes électroniques de basse fréquence générées par des orages. Malheureusement, le système de séparations des deux étages s'est révélé plus complexe que prévu à développer et nous avons décidé de laisser cette expérience de côté pour cette année.

Autre problème, nous devions tester la stabilité de notre fusée en vol pour évaluer sa capacité à emporter sans risque un moteur dans l'étage supérieur. Ce n'est qu'au contrôle que la stabilité de notre fusée a été totalement remise en cause. Pour obtenir un StabTraj fiable, nous avons été contraints de déplacer les ailerons de l'étage supérieur sur l'étage inférieur. L'étage supérieur se retrouvant sans ailerons, la séparation devait se faire obligatoirement à l'apogée pour éviter un trop grand risque d'instabilité. Un second allumage étant impossible dans ces conditions, la fusée ne recevra donc jamais de second moteur dans cette configuration.

3.1 Calcul de trajectoire

Pour s'assurer des conditions de sécurité avant l'allumage du second moteur, un gyroscope était utilisé pour s'assurer de la stabilité de la fusée en vol. Le moteur n'étant plus d'actualité,

ce gyroscope n'a donc plus d'utilité. Nous avons tout de même pu réutiliser les valeurs de rotation et d'accélération qu'il pouvait mesurer.

Pour cela, nous avons ajouté un module carte SD pour enregistrer les données mesurées à intervalle régulier. Nous comptons traiter les données du vol a posteriori sur Matlab pour retracer la trajectoire de la fusée.

3.2 Système de séparation

Nous avons pu garder notre seconde expérience qui est la mise à l'épreuve de notre système de séparation en vol. Pour cela, nous avons installé une caméra embarquée à la place du moteur de l'étage supérieur. L'objectif étant de voir la séparation de l'intérieur et de mesurer le temps d'éjection nécessaire pour obtenir la séparation complète des deux étages.

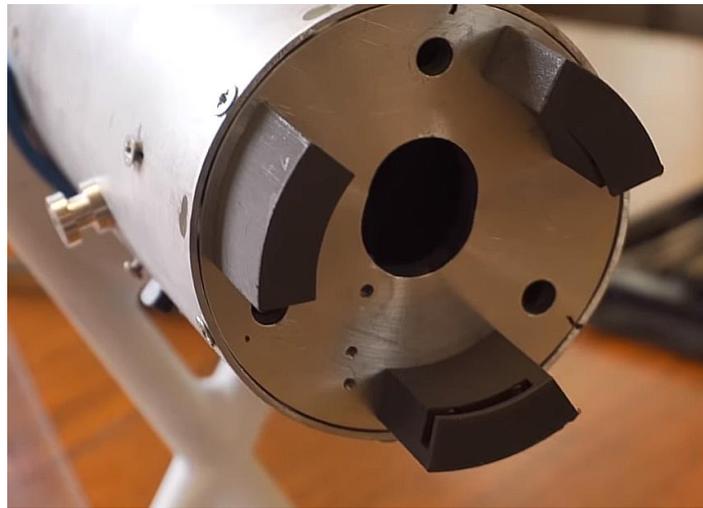


Figure 20 : Extrémité de l'étage du haut. La forme du trou centrale permet le passage de l'objectif de la caméra

4 Déroulement du vol



Figure 21 : L'équipe de STAROS-II sur le pas de tir installent la fusée en rampe

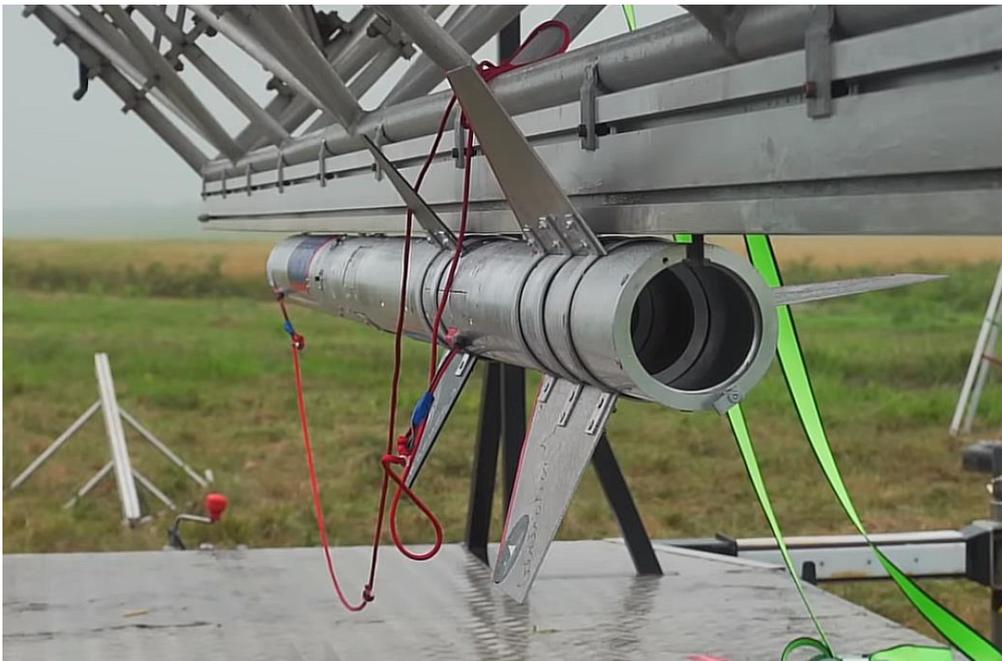


Figure 22 : STAROS-II sur sa rampe de lancement

STAROS-II a décollé le vendredi 21 juillet entre 10 et 11 h. La météo était pluvieuse avec un plafond nuageux à moins de 500 m. La fusée a suivi une trajectoire stable et sans oscillations jusqu'à sa disparition dans les nuages.

Les deux étages ont été vus à la redescente ce qui confirme la séparation en vol. Un des étages est retombé en zone rouge après un vol nominal torche. Cet étage produisait un sifflement caractéristique à la redescente, laissant présager la présence d'ailerons sur celui-ci. Nous pouvons alors émettre l'hypothèse qu'il s'agissait de l'étage inférieur. L'autre étage a bien déployé son parachute, confirmant un vol nominal, et est retombé dans un champ de maïs en bordure du terrain. Cet étage-là, que nous supposons être l'étage supérieur, n'a pas encore été retrouvé à ce jour. Nous avons contacté l'agriculteur exploitant cette parcelle, il faudra attendre les moissons du maïs au début de l'automne pour espérer la retrouver.

Concernant les résultats d'expérience, ils sont pour l'instant compromis tant que l'étage supérieur n'a pas été retrouvé.

Conclusion

Le projet STAROS-II a subi de nombreuses modifications dues à sa complexité. Nos points faibles ont été la stabilité de la fusée et la complexité des expériences. Malgré cela, les systèmes embarqués ont fonctionné comme prévu et la fusée a réalisé un vol nominal pour un des étages et nominal torche pour l'autre avec une séparation réussie. Nous espérons maintenant récupérer l'étage supérieur pour récupérer et traiter nos données d'expérience.

Ce projet nous a permis d'apprendre, mais surtout de se transmettre beaucoup de compétences techniques entre les membres de l'équipe. La formation des membres par les plus compétents est fondamentale pour assurer la faisabilité de projets d'envergure au fil des années. Pour les années à venir, une rigueur plus stricte sur les deadlines est à adopter. C'est souvent ce qui nous a posé des problèmes, générant beaucoup d'erreurs techniques sur le projet et de stress sur les membres du projet. Enfin, nous avons découvert que les tests réalisés aux contrôles sont très exigeants, il est important de ne pas les sous-estimer et de s'y préparer bien avant le C'Space.

La cohésion de l'équipe a été notre force principale. Malgré la longue durée du projet, nous avons gardé un groupe soudé prêt à tout pour voir voler cette fusée. C'est ce qui nous a permis de nous adapter rapidement à de nombreux changements de plan à la suite des difficultés rencontrés. De plus, notre projet comportait de très bons éléments en technique. La CAO programmable, l'impression 3D et les PCB sur mesure ont nécessité des connaissances techniques pointues.

Nous avons déjà beaucoup d'idées pour la suite du projet l'année prochaine. Pour une fusée bi-étage active stable et fiable. Par exemple, l'utilisation d'un diamètre plus large nous permettra d'améliorer la stabilité. Ou bien l'intégration d'une télémétrie déjà existante dans le commerce nous permettra de récupérer nos données directement en vol de manière fiable.