



SUPER

SUPersonic Experimental Rocket

Rapport de projet

—
Ipsa Space Systems



Remerciements

Merci tout d'abord à Planète Sciences, au CNES et à tous les bénévoles pour l'organisation de ce C'Space, pour leur grande disponibilité et leurs conseils tout au long de l'évènement.

Merci également à l'Ipsa pour sa confiance, qui nous permet de profiter de cette activité associative qui nous est précieuse.

Merci à l'équipe Mines Space qui a eu la gentillesse de nous prêter un parachute pour notre vol sans garantie de le revoir.

Enfin, merci à Cyril Tilhou-Triep et au CESI Space pour leur usinage rapide de la pointe en aluminium de l'ogive, sans laquelle SUPER ne serait pas tout à fait la même.

Table des matières

Remerciements.....	2
Introduction et objectifs.....	4
1. Stabilité et plan de vol.....	5
2. Sous-systèmes mécaniques.....	6
A. Etage propulsif.....	6
B. Etage aérofreins.....	8
C. Case électronique.....	10
D. Système de séparation et récupération.....	11
3. Systèmes électroniques embarqués.....	14
A. Architecture des systèmes.....	14
B. Timer.....	16
C. Flight controller.....	16
D. Navigation.....	17
E. Réalisation électronique.....	18
F. Interface extérieure.....	19
4. Résultat du vol et analyse.....	20
A. Déroulement du vol.....	20
B. Analyse.....	21
C. Données de vol.....	21
Conclusions et perspectives.....	23

Introduction et objectifs

SUPER (SUPersonic Experimental Rocket) est un projet de fusée expérimentale réalisé par l'association étudiante Ipsa Space Systems de l'école d'ingénieur Ipsa. Initié au début de l'année scolaire 2021 – 2022 et lancé au C'space 2023, ce projet de fusée d'abord dimensionné pour le supersonique embarque une expérience de contrôle de sa traînée par aérofreins.

Initialement prévue pour tenter de réguler l'altitude d'apogée en suivant une courbe de vitesses définie, l'expérience se limitera finalement à observer l'effet du déploiement complet des aérofreins au terme de la phase propulsive. L'objectif est d'obtenir un retour sur le fonctionnement de ce sous-système que nous pourrions potentiellement intégrer sur de futurs projets avec les améliorations nécessaires.



1. Stabilité et plan de vol

La fusée mesure au total 1620 mm pour un diamètre de 97.2 mm. Son centre de gravité se situe à 961 mm de l'extrémité de la coiffe et elle est équipée de trois ailerons fixés en bas du tube. La masse à vide de la fusée est de 7.57 kg, et de 11.08 kg une fois armée du propulseur Pro75-3G.

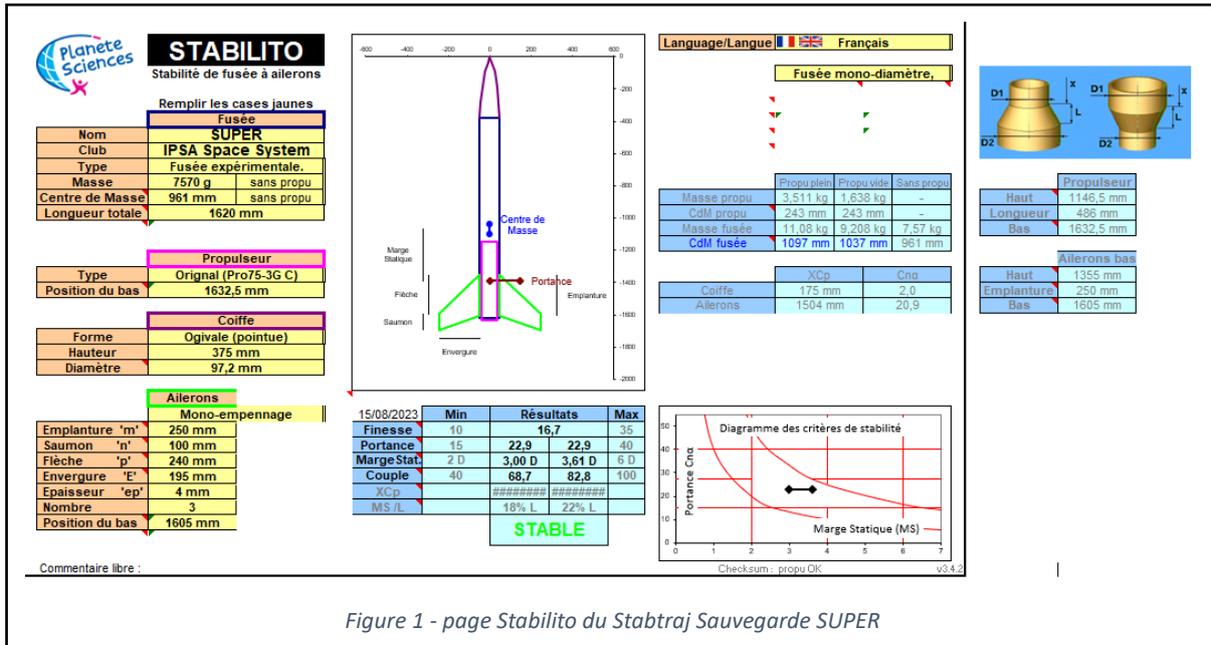


Figure 1 - page Stabilito du Stabtraj Sauvegarde SUPER

Selon les calculs de trajectoire du Stabtraj, la fusée, avec un angle de rampe de 80°, atteindra 2842 m à son apogée après 23 secondes d'ascension. Sa vitesse maximale est de 279 m/s et est atteinte à la fin de la phase propulsive.

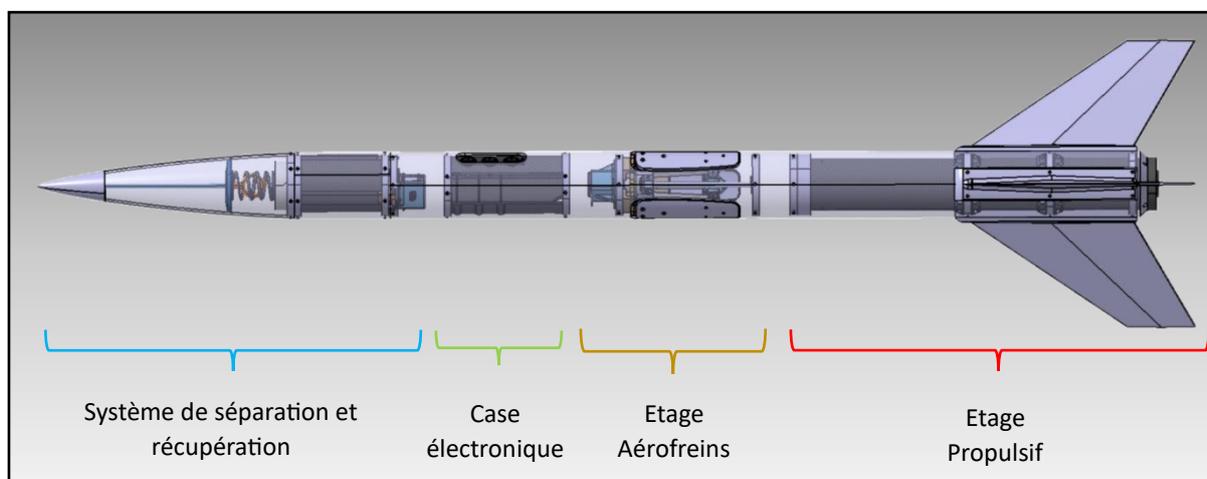
La fusée, pesant 9.2 kg avec le propulseur vide, effectuera sa redescente sous parachute à une vitesse de 12.3 km/h, pour une durée de 3 minutes et 51 secondes.

2. Sous-systèmes mécaniques

SUPER se décompose en plusieurs sous-systèmes mécaniques pour l'intégration des fonctions de sauvegarde, d'expérience et de propulsion.

Le tube et les ailerons sont de fabrication composite : il s'agit d'une structure sandwich en fibre de carbone UD et mousse Epoxy, réalisée selon les procédés de fabrication Perseus au laboratoire de l'Ipsa. La coiffe est en plusieurs couches de carbone taffetas enfilées les unes sur les autres autour d'un moule.

Les pièces en aluminium sont pour la grande majorité usinées sur une CNC 3 axes dans ce même laboratoire, à l'exception de la pointe de la coiffe qui exigeait un 4^{ème} axe d'usinage robuste, et que nous avons confiée à Cyril Tilhou-Triep, au fablab du CESI Space et à l'Electrolab. De nombreuses pièces sont également imprimées en 3D, en PETG carbone ou en PLA selon les contraintes qui s'y appliquent.



Le tube est une peau porteuse unie du bas de la fusée jusqu'au système de séparation, où il est prolongé d'un second tube plus court et de la coiffe.

A. Etage propulsif

L'étage propulsif est responsable de l'intégration du moteur et de la fixation des ailerons. Les ailerons sont chacun maintenus par six vis sur trois bagues en bas de l'étage.

Ces trois bagues sont fixées à la peau de la fusée et à un tube de guidage du propulseur en carbone destiné à faciliter l'intégration du propulseur. La troisième et la plus basse des bagues porte le système de maintien du propulseur, fait d'une plaque en aluminium ajustée à la bonne hauteur à verrouiller en le tournant après insertion du moteur.

Sous cette bague, un dernier anneau en aluminium est fixé en bout de tube pour des raisons primordiales d'esthétique.

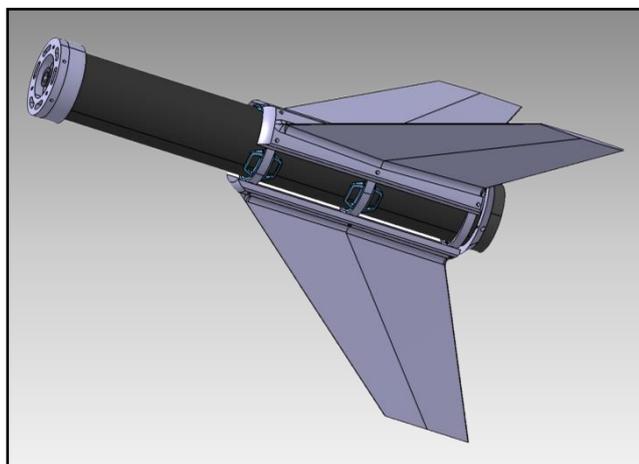
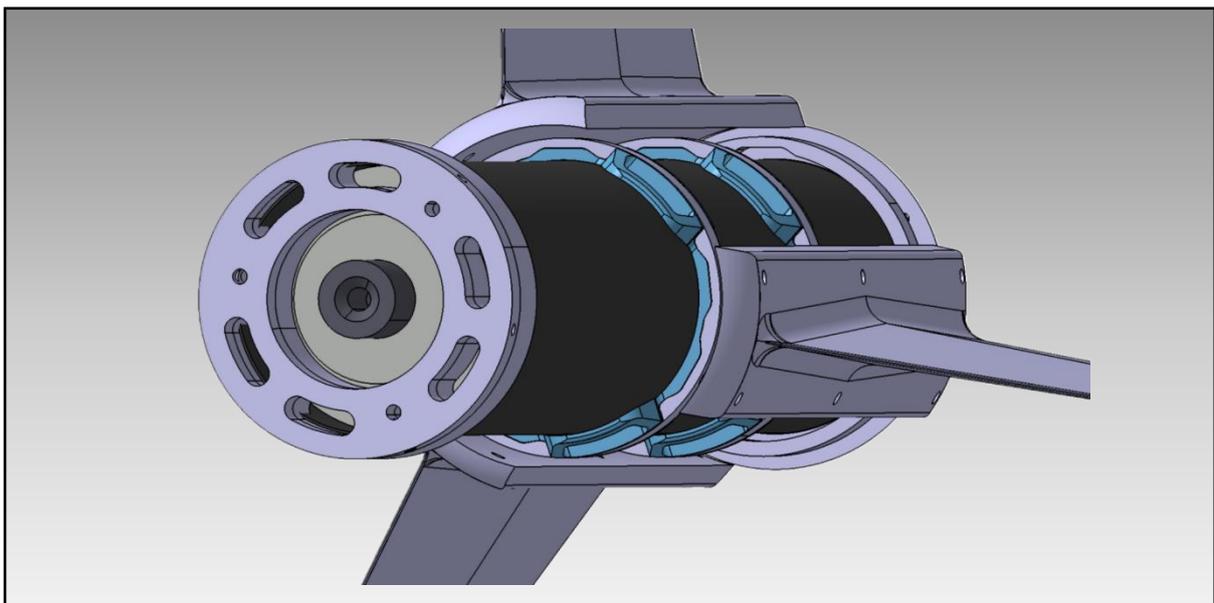




Figure 2 - Etage propulsif

La peau des ailerons est composée d'une face tribord et d'une face bâbord qui se rencontrent au bord d'attaque et au bord de fuite. Pour cette raison, si exposés à de fortes vibrations, les bords sont susceptibles de se délaminer et l'aileron de s'ouvrir en deux pendant le vol. Afin de renforcer le bord d'attaque contre ce danger, des feuilles d'aluminium découpées et pliées sont collées pour protéger la jonction des faces. Ce procédé est utilisé dans la méthode de fabrication d'ailerons destinées au supersonique de Perseus.



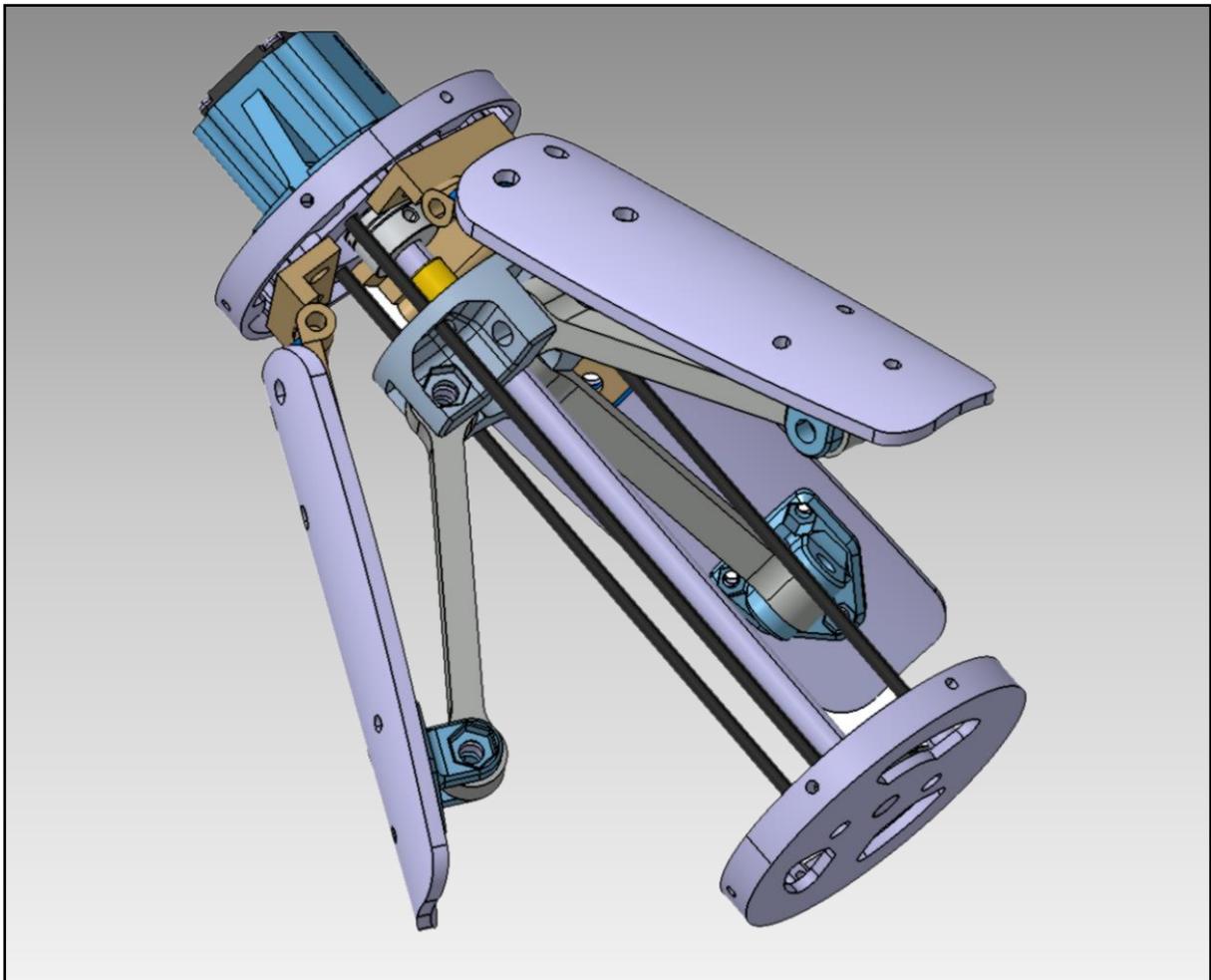
La poussée du moteur est transmise par le haut à deux bagues en aluminium vissées ensemble, dont l'une est également vissée au tube pour lui transmettre les efforts en 6 points de fixation.

B. Etage aérofreins

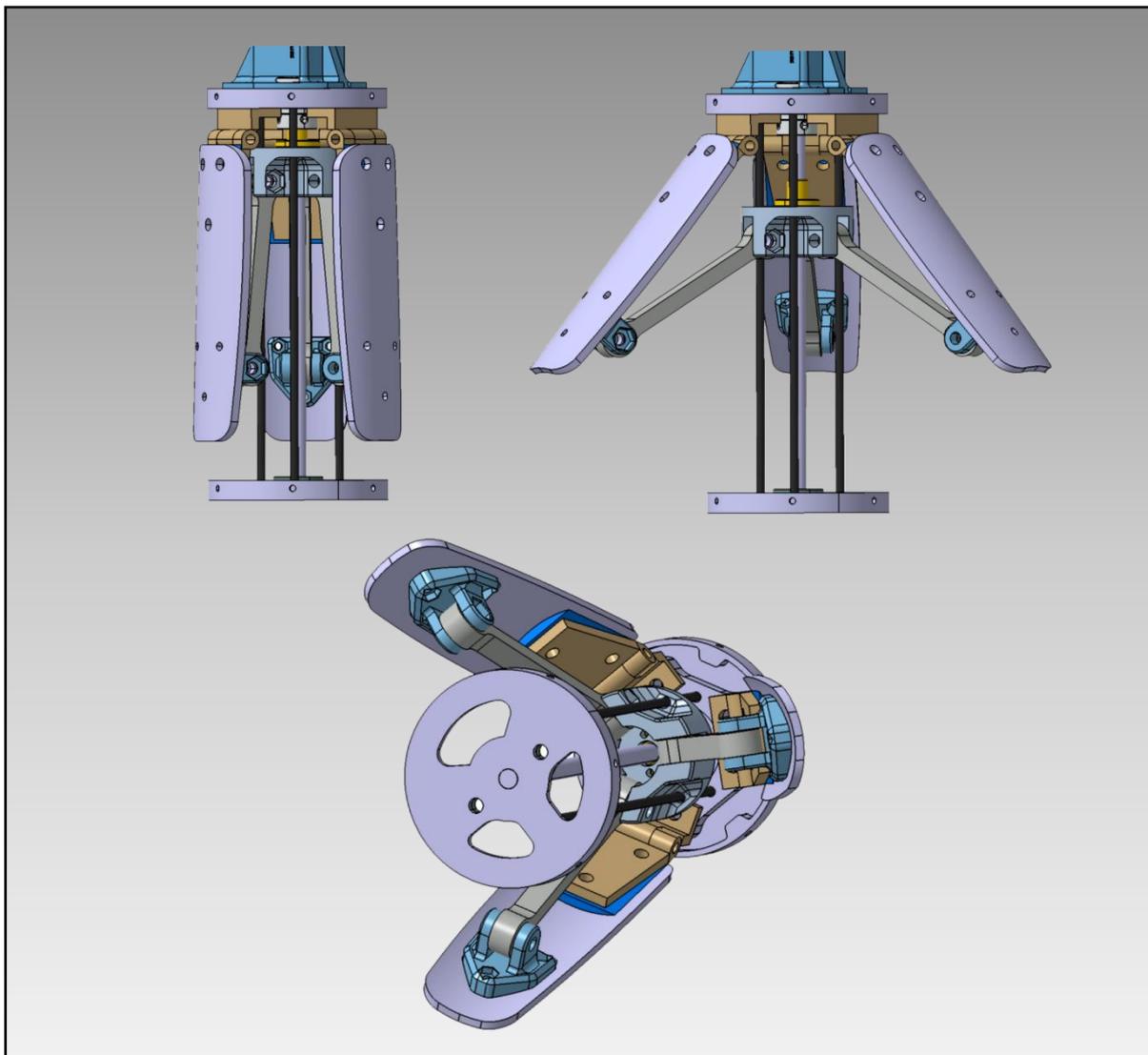
Les aérofreins constituent l'expérience de SUPER. La problématique principale dans le développement de ce système était qu'il ne puisse, même en cas de dysfonctionnement, affecter la trajectoire de la fusée en créant une traînée non uniforme autour de la fusée. Pour cela, le déploiement des trois surfaces de freinage devait être synchrone.

Au centre du système, une vis sans fin est mise en rotation par un moteur pas à pas sur la bague haute. Le choix de ce moteur a été fait pour sa capacité à appliquer un contrôle précis dans une optique de commander les aérofreins en boucle fermée. La contrepartie est un couple légèrement trop faible pour actionner le système en présence d'efforts importants sur les aérofreins.

Montés sur cette vis, un écrou (en jaune sur la CAO) et une pièce imprimée en PETG carbone couissent de haut en bas ou inversement selon le sens de rotation de la vis. Le mouvement linéaire de la pièce ces pièces induit le mouvement d'ouverture des aérofreins via trois bielles usinées en aluminium et équipées de roulements à billes.



Le haut des aérofreins est maintenu à la bague par trois charnières. Pour minimiser le jeu dans le système, trois tiges de guidage en carbone sont fixées entre les bagues haute et basse en passant par la pièce en translation au centre.



L'angle maximal de déploiement des aérofreins permis par les contraintes de l'assemblage mécanique est de 35°. Une ouverture plus large pourrait être rendue possible en laissant plus d'espace entre le haut des aérofreins et le tube découpé au-dessus.

Les surfaces de freinage sont directement coupées dans le tube pendant sa fabrication sur la CNC. Il est donc à l'origine de même composition que ce dernier. En revanche, pour pallier la fragilité du tube causée par cette découpe, cette partie du tube a été renforcée pour un rendu plus rigide et moins fragile que la mousse Epoxy. Toute la mousse entre les deux bagues a été enlevée et remplacée par un mixfill. Ce mixfill est ensuite usiné pour y insérer deux couches de ruban de carbone HR UD 350 g/m² afin d'encore solidifier et rigidifier le tube fragilisé. Les aérofreins sont découpés entre ces renforts.



Figure 3 - Renforcement du tube au niveau des aérofreins

Malgré un faible jeu causé par les charnières fixant les aérofreins à la bague haute, la version de vol du système est fonctionnelle et est capable de déployer les aérofreins de manière parfaitement synchronisée.

Comme évoqué plus tôt, l'ouverture est limitée mécaniquement à un certain angle. Pour s'assurer que les aérofreins ne se ferment pas plus que nécessaire et que leur position initiale est bien dans la continuité du tube, une pièce imprimée en PLA est ajoutée et fixée à la bague basse, les empêchant de se replier à l'intérieur du tube.

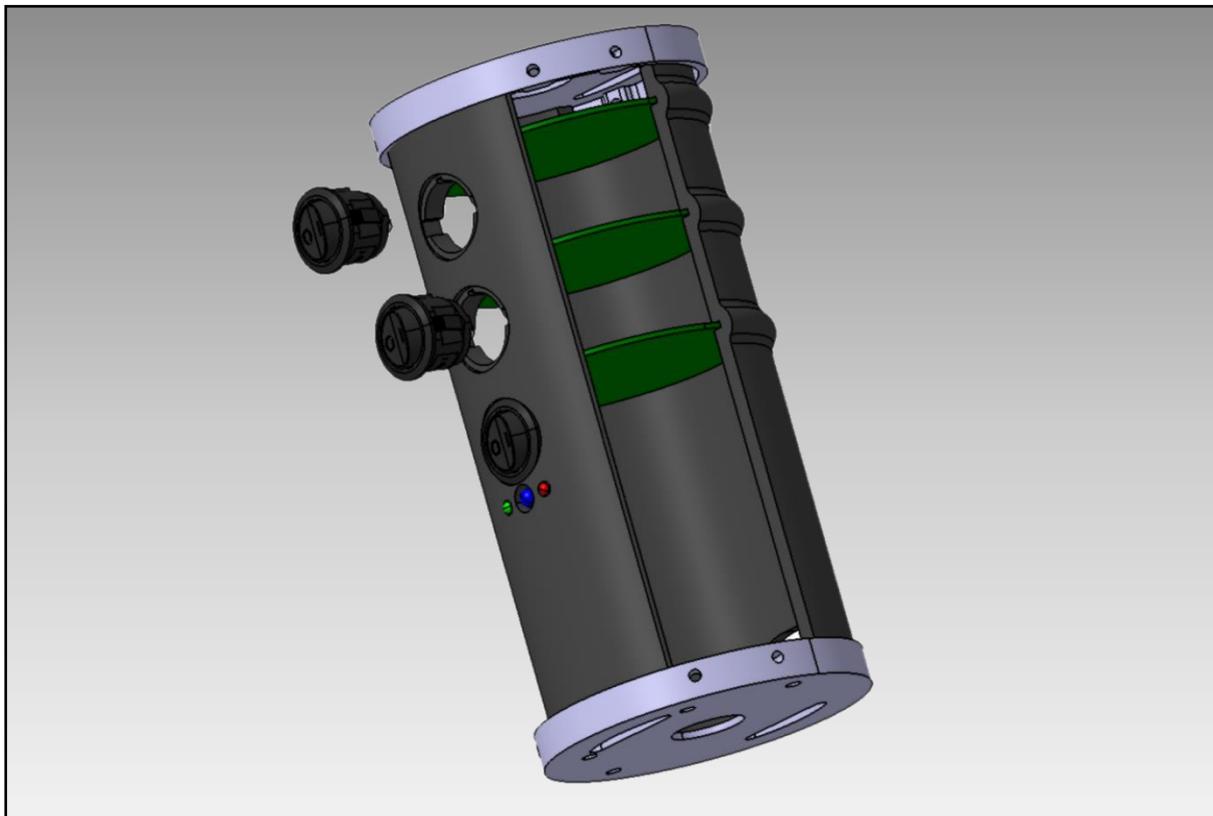
Lors de la fermeture des aérofreins, ces derniers arriveront si nécessaire en butée sur cette pièce et le moteur sautera des pas plutôt que de forcer le passage.



Figure 4 - Aérofreins ouverts

C. Case électronique

La case électronique doit intégrer trois cartes dont les fonctions seront détaillées plus tard, deux batteries, et l'interface permettant l'alimentation et l'allumage de la fusée depuis l'extérieur. Ces cartes sont toutes les trois intégrées à l'horizontale pour s'assurer que les soudures tiendront le choc de l'accélération au décollage.

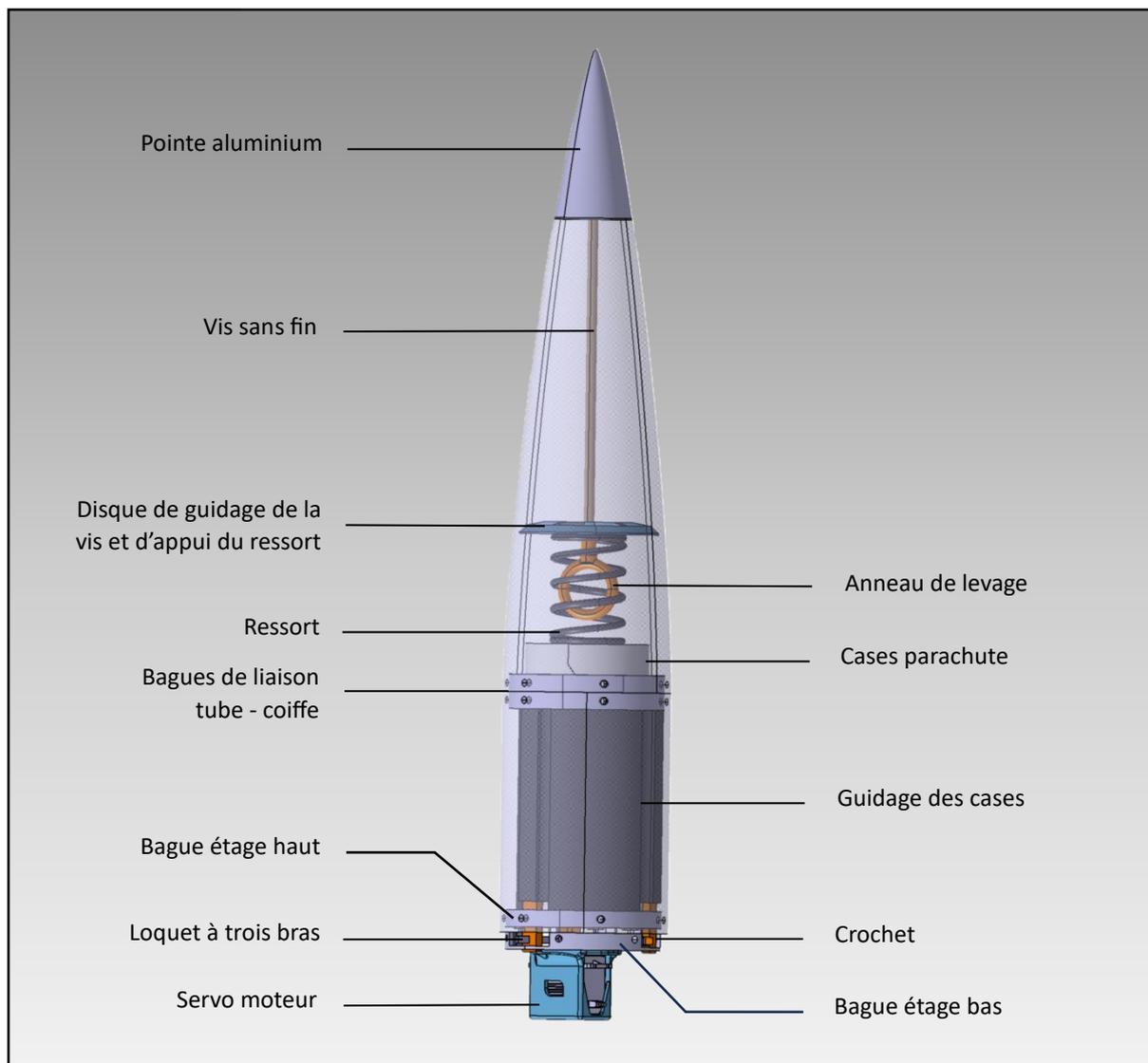


Les deux pièces intégrant les cartes, les switches et les LED sont imprimées en PLA et conçues pour laisser autant de place que possible à l'électronique. Les bagues sont percées en plusieurs endroits pour permettre de connecter le jack et les effecteurs au moment de l'intégration dans le tube. Les

batteries sont intégrées sous les trois cartes sur la bague basse de la case. La place centrale de la case électronique dans la fusée permet de connecter en haut le servo moteur pour la séparation, et en bas le moteur pas à pas pour l'expérience.

D. Système de séparation et récupération

Le système de séparation et de récupération (SSR) se situe entre les deux tubes sous la coiffe. Il est déverrouillé à l'apogée après 23 secondes de vol pour extraire le parachute sous lequel la fusée doit descendre à 12.3 m/s. Le système de verrouillage est composé d'un loquet à trois bras dans la partie basse guidé par un servo moteur dans trois crochets fixés à la partie haute de la fusée.



La pointe en une pièce différente du reste de la coiffe était une contrainte que nous impose notre procédé de fabrication, puisqu'elle a été réalisée sur un mandrin sur une CNC 4 axes. Le mandrin traversant la coiffe, il était nécessaire de découper le bout. Un trou fileté au centre permet de guider et visser la pièce sur la vis sans fin. Six autres trous sont percés pour alléger la pièce autant que possible.

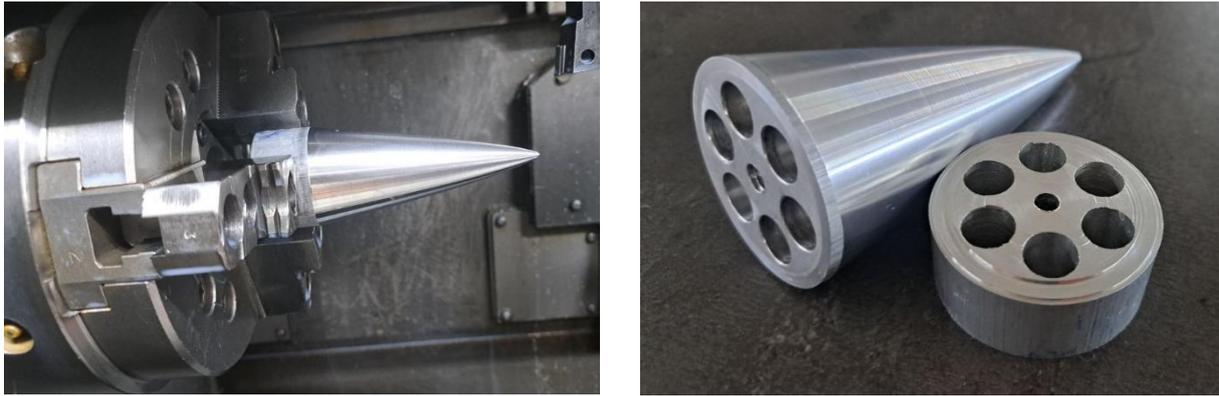
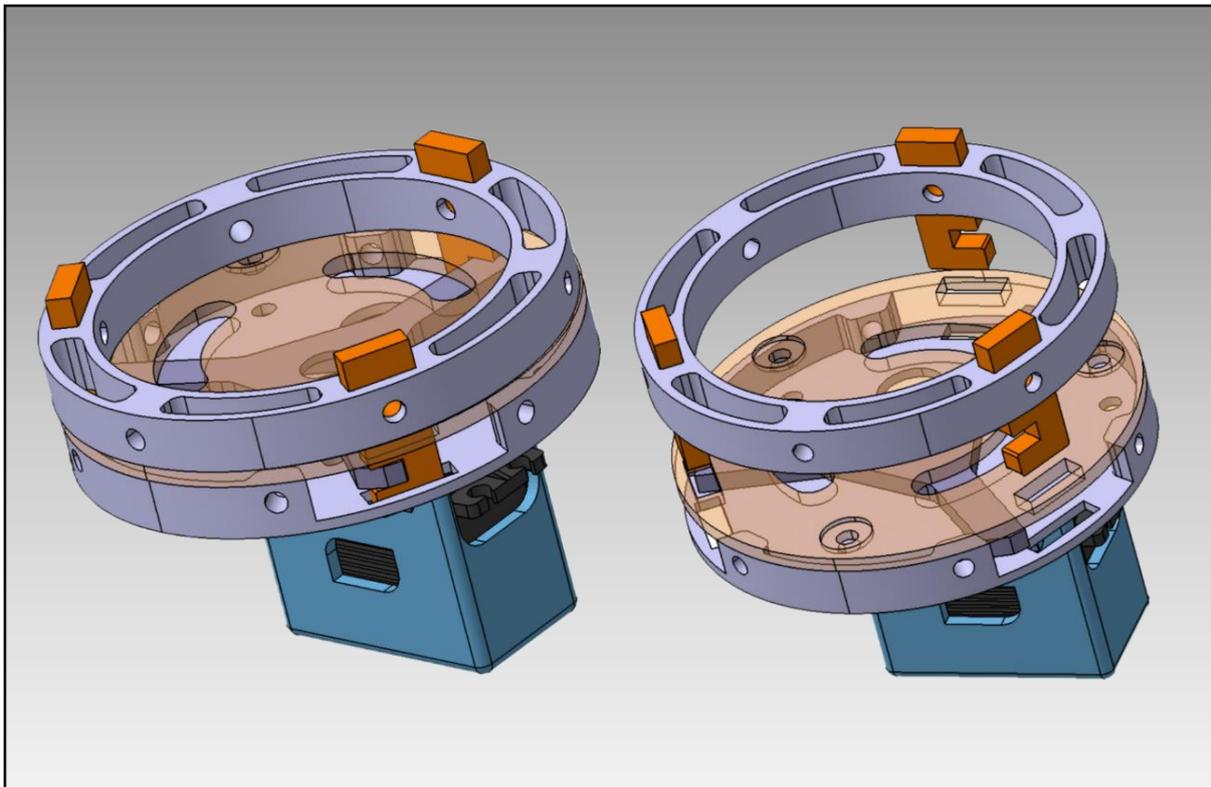


Figure 5 - Fabrication de la pointe au fablab du CESI Space

Les trois crochets du système de séparation sont fixés sur la bague de la partie haute. Dans la partie basse, le loquet actionné par le servo moteur est protégé par un couvercle en aluminium (pièce orange transparente). Ce couvercle permet l'intégration de la case parachute sans que la toile et les suspentes, qui viennent à son contact, ne s'emmêlent dans le loquet.



La case parachute est pressée contre le couvercle par un ressort fabriqué en carbone, qui s'appuie de l'autre côté sur le disque de guidage dans la coiffe. Afin de diriger la sortie de la case parapente, une pièce imprimée en PETG carbone est placée entre la bague haute du système de séparation et la bague basse de liaison tube-coiffe.

Les deux parties de la fusée effectuent leur redescente sous le même parachute, avec des longueurs de corde suffisantes pour espérer empêcher des chocs entre la coiffe et le reste de la fusée. La partie haute séparée est accrochée à un émerillon sur la voile par une corde fixée sur l'anneau de levage dans la coiffe. Sur ce même émerillon, une seconde corde doublée lie le corps de la fusée au parachute. Cette corde traverse le système de séparation en évitant le loquet et est fixée sur un pontet vissé à la

bague haute de la case électronique. Amener le point de fixation plus bas permettait de ne pas placer le pontet sur le couvercle, où il aurait gêné les suspentes du parachute au-dessus et la rotation du loquet en-dessous qui n'avait que peu d'espace en hauteur.

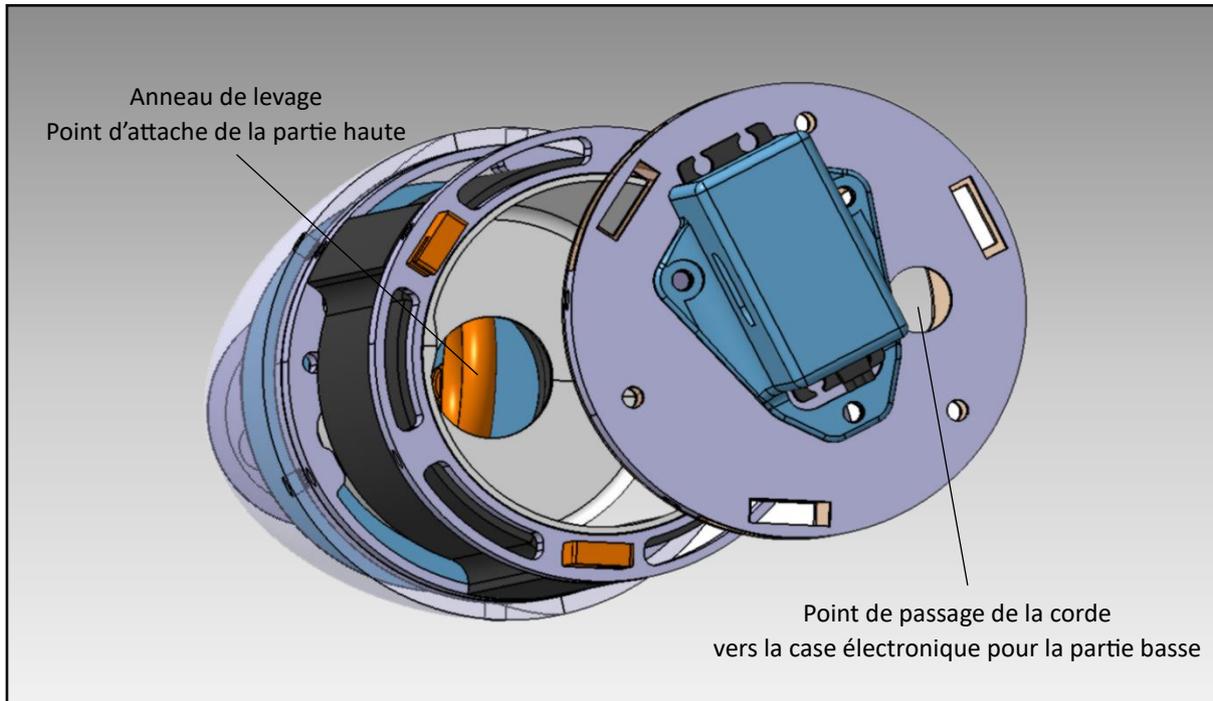


Figure 6 – Séparation verrouillée

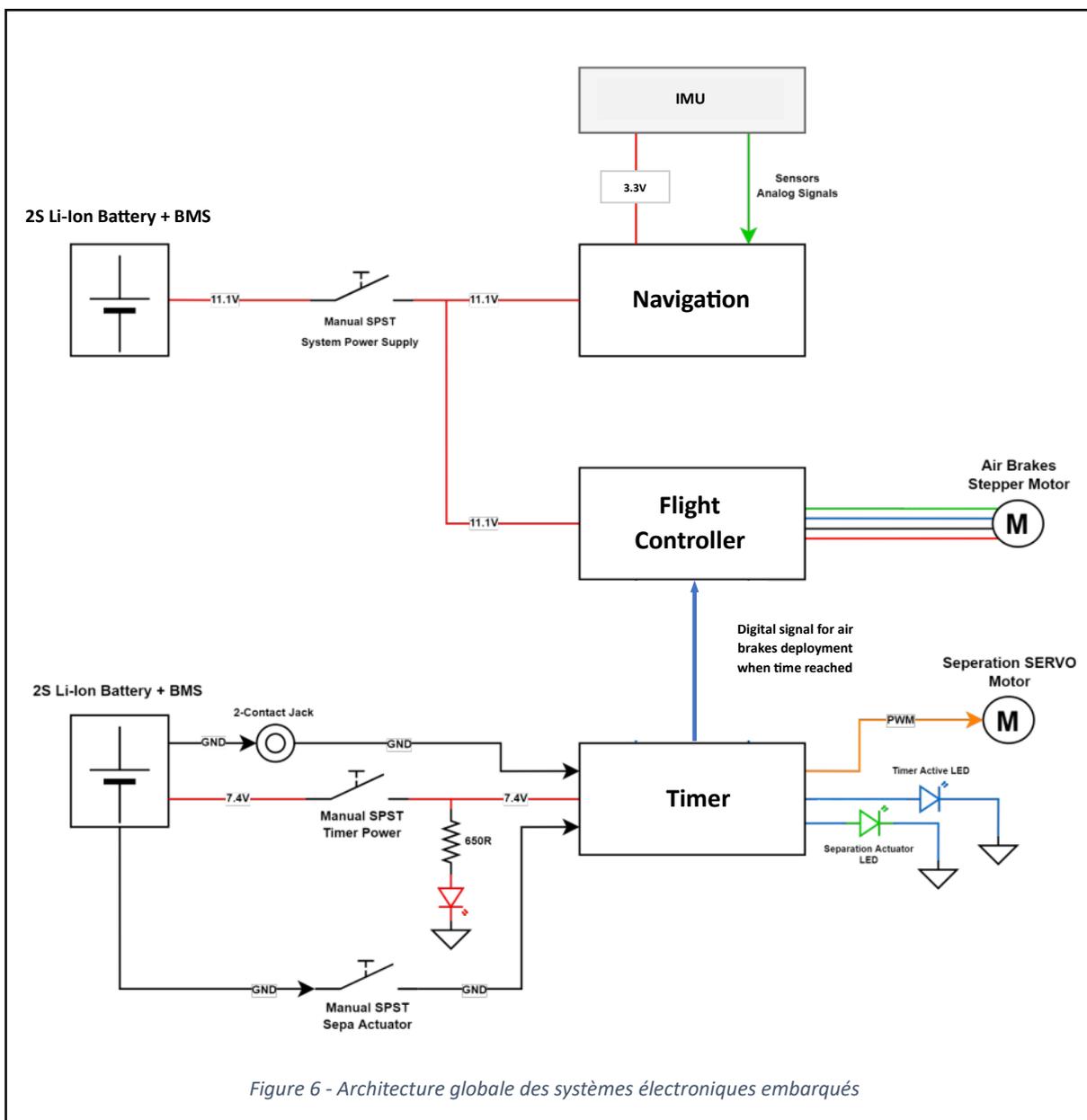
3. Systèmes électroniques embarqués

Les systèmes embarqués sur SUPER ont pour objectif de contrôler les opérations au sol et au cours du vol. Pour ce faire, ils doivent remplir les missions suivantes :

- Présenter une interface de contrôle et de communication pour les effecteurs et les capteurs
- Orchestrer le plan de vol à partir de la détection du décollage et au moyen d'un timer
- Sauvegarder les données de vol à bord de la fusée

A. Architecture des systèmes

Ces tâches sont réparties entre trois modules qui agissent de manière complémentaire et coordonnée pour assurer le bon déroulement du vol : timer, flight controller et navigation. Ils interagissent selon l'architecture globale illustrée ci-dessous.



L'intégration des trois cartes dans la case électronique impose quelques contraintes de conception. Leur diamètre total est de 78.3 mm, mais toute la surface n'est pas exploitable puisque les deux glissières qui les encadrent nécessitent d'avoir une certaine emprise sur elles. De plus, l'espace disponible en hauteur entre les cartes est de 15 mm. Cette hauteur n'est pas exploitable à l'emplacement de l'intégration des switches qui se situent entre les cartes. Aussi, lors du design des PCB, ces contraintes sont prises en considération en définissant les spécifications suivantes :

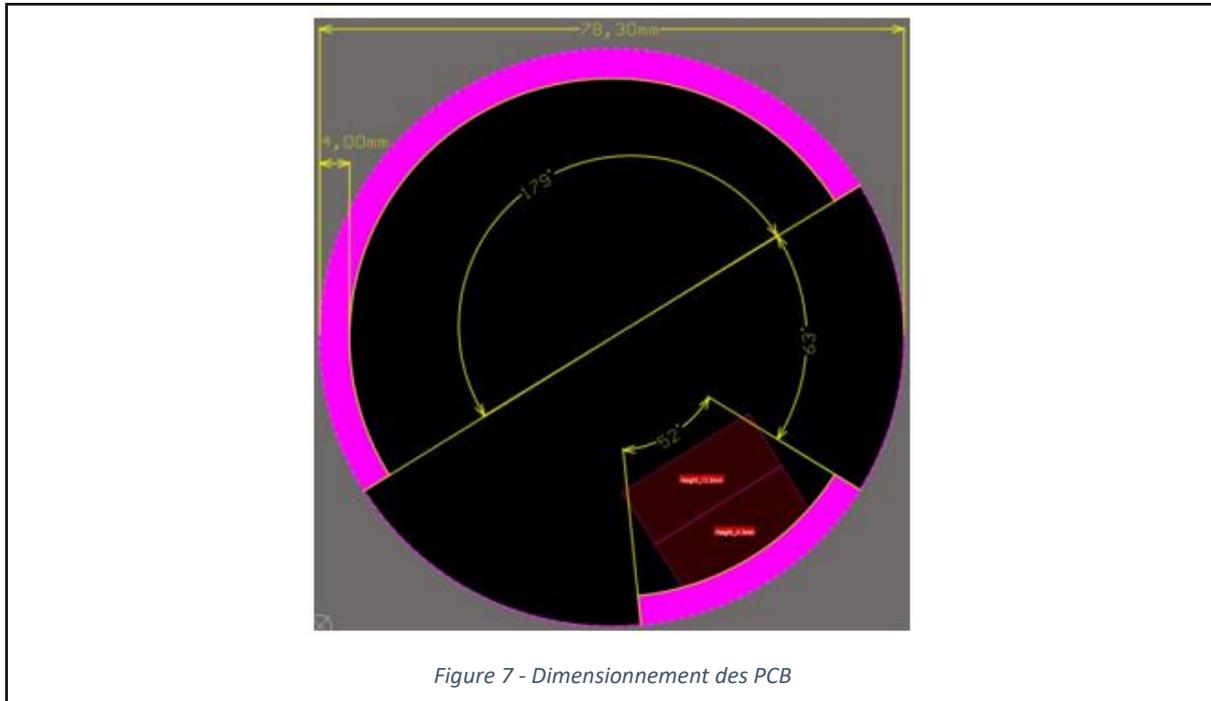


Figure 7 - Dimensionnement des PCB

Les deux batteries sont chacune composées de deux cellules Li-Ion soudées ensemble. Chaque cellule délivre une tension nominale de 3.6V et une capacité typique de 5000 mAh. Elles sont protégées par un BMS intégré. L'une des batteries 2S est chargée de l'alimentation des cartes Navigation et Flight controller, et la seconde alimente la carte timer de son côté.



Chaque carte utilise un port de programmation pour USB ASP, qui permet de communiquer avec chaque microcontrôleur via le protocole SPI.

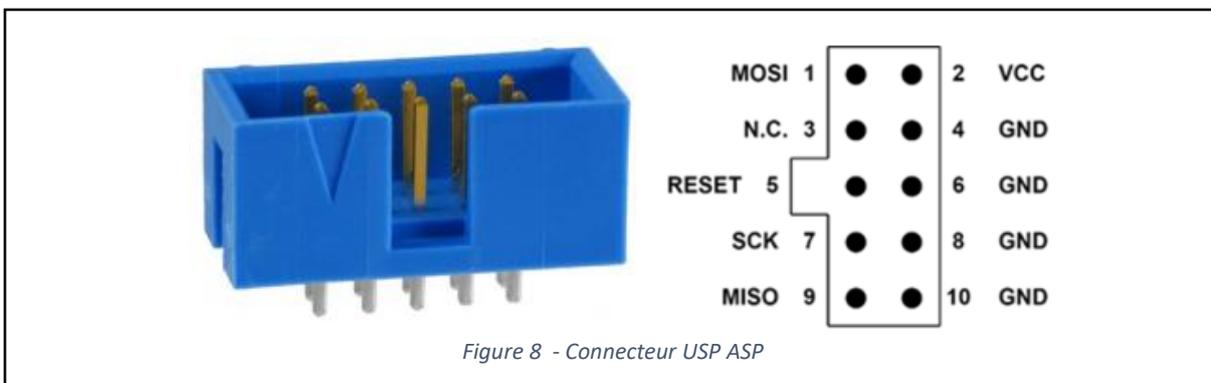


Figure 8 - Connecteur USP ASP

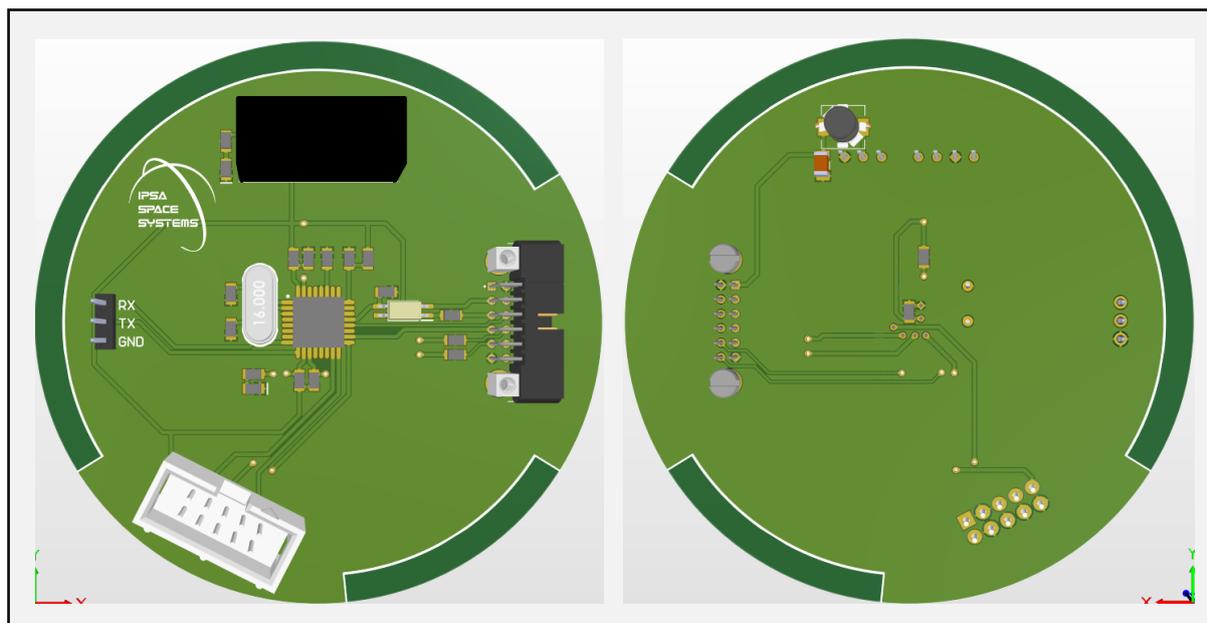
Les trois microcontrôleurs sont des AVR 8-bit de la série ATmega. La raison de ce choix est notre familiarité avec leur architecture grâce à laquelle il n'est pas nécessaire de recréer toutes les bibliothèques bas niveau pour les différentes opérations à implémenter. Leur puissance de calcul est suffisante pour nos applications, et il existe une documentation fournie et libre d'accès.

Chaque carte est équipée d'un header mâle 3-pin pour permettre la transmission de données en UART pour le débogage, et d'un connecteur Harwin 12-pin pour le contrôle des effecteurs, l'alimentation des cartes et la communication entre elles.

B. Timer

Le module timer est chargé de détecter le décollage par l'arrachage d'un câble jack accroché sur la rampe et branché sur la fusée. À partir de la détection, il démarre un compteur qui lui permet de donner l'ordre au module flight controller de déployer les aérofreins après 5 secondes, à la fin de la phase propulsive, et de déclencher la séparation de la fusée au bout de 23 secondes d'ascension.

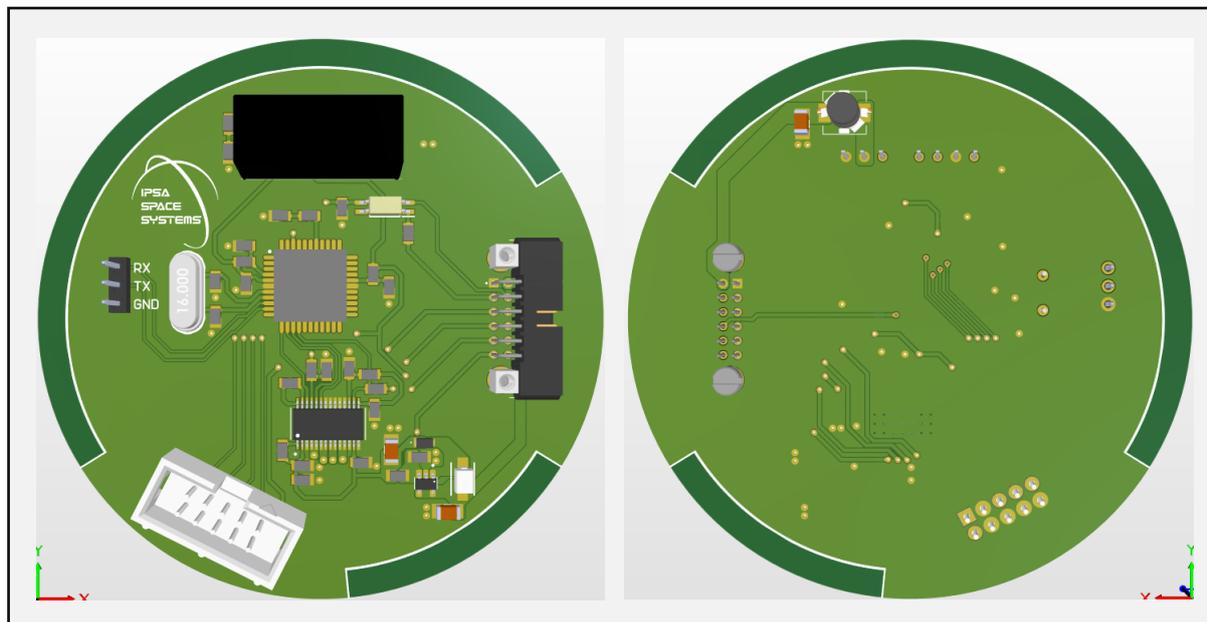
La batterie 2S délivre au module timer une tension déjà adéquate pour le servomoteur de la séparation. Un convertisseur DC/DC est tout de même requis pour alimenter la carte à une tension de 5V. Le microcontrôleur embarqué sur le timer est un ATmega8U2-AU.



C. Flight controller

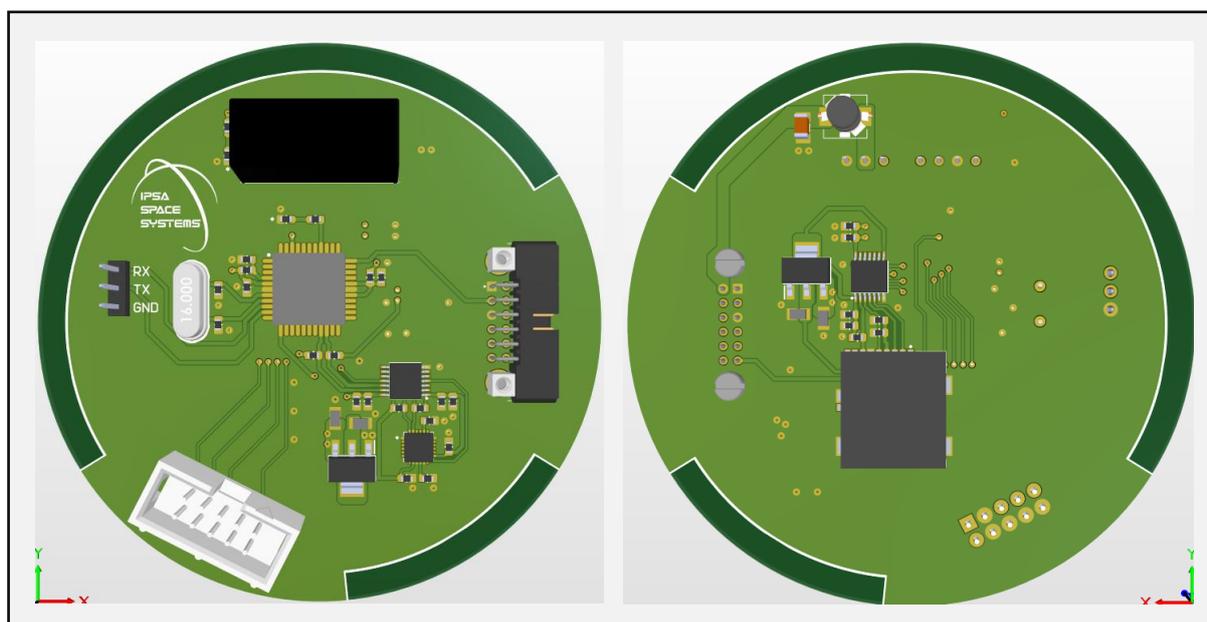
Le flight controller est responsable du contrôle du moteur pas à pas des aérofreins. Il active sa rotation sur ordre du timer. La communication avec le moteur passe par un driver recevant deux signaux en plus de l'alimentation et de la masse : le signal STEP, une tension carrée à impulsions courtes, où chaque impulsion déclenche un pas du stepper, et le signal DIR qui indique la direction de rotation selon son état (haut ou bas).

Un convertisseur Boost est utilisé pour transformer l'alimentation continue des batteries de 7.4V en une alimentation continue 24V pour le moteur pas à pas. Le microcontrôleur utilisé sur cette carte est un ATmega324PB-AU.



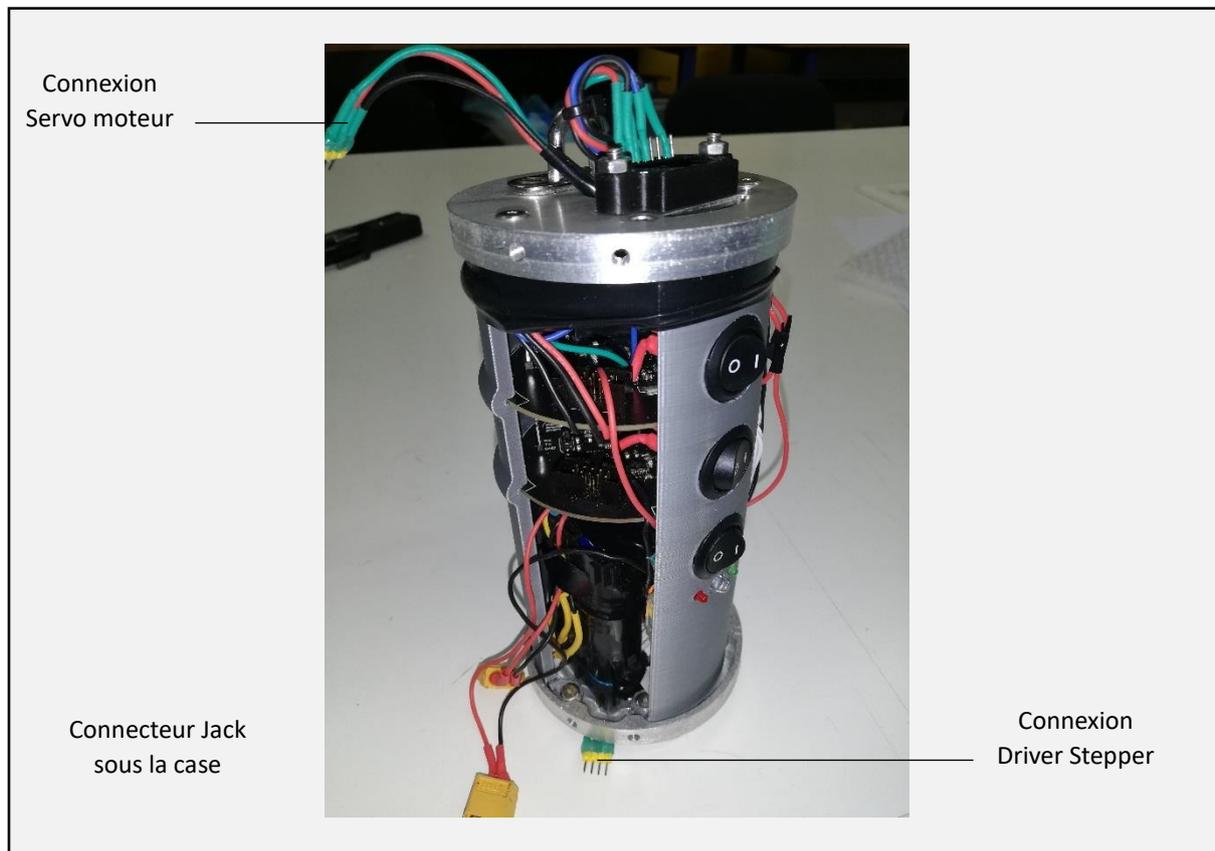
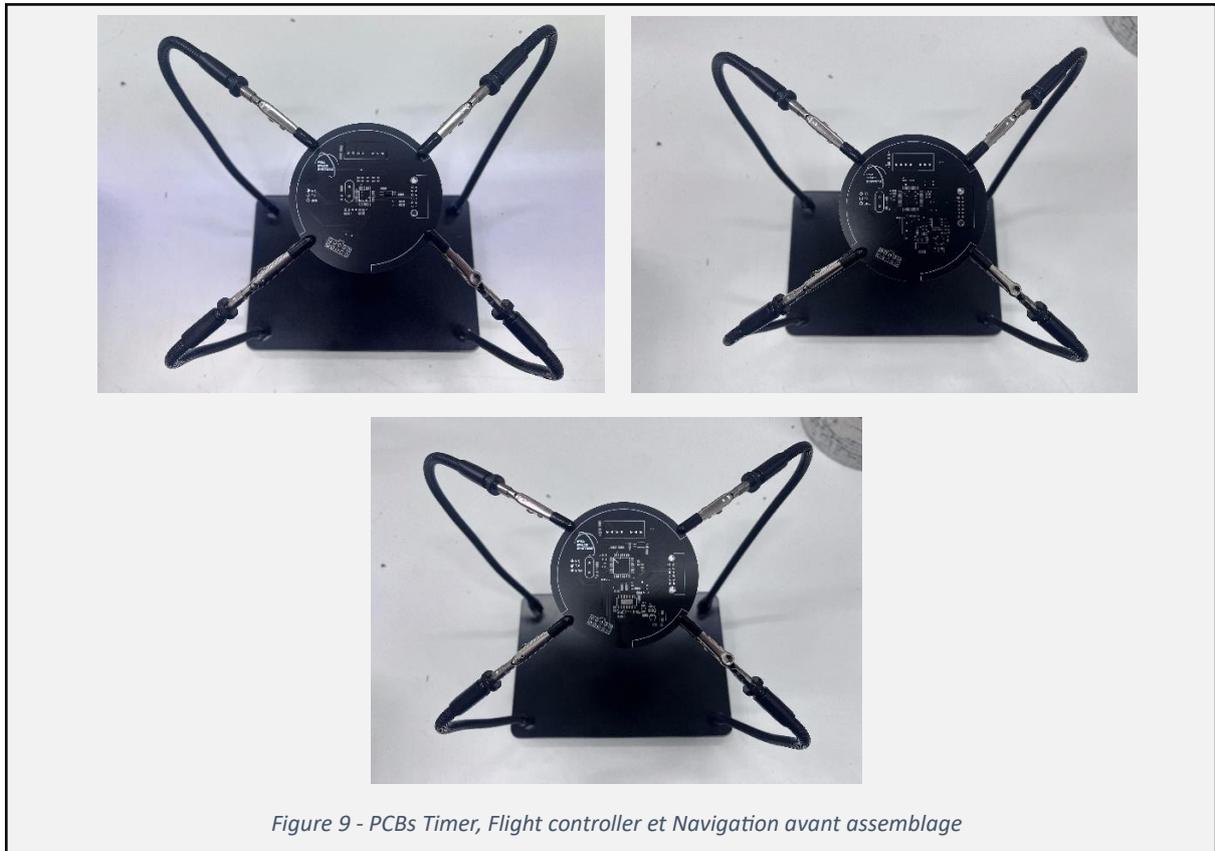
D. Navigation

Le module navigation embarque une IMU. Son alimentation en 3.3V nécessite un régulateur de tension, et un level shifter pour permettre la communication avec le microcontrôleur ATmega324PB-AU qui fonctionne à une tension d'alimentation de 5V. Un bus de transmission des données vers le flight controller est conçu, puisque ce dernier devait à l'origine exploiter les données filtrées de l'IMU pour un asservissement des aérofreins au cours du vol. Les données de navigation sont stockées sur une carte SD.



E. Réalisation électronique

L'assemblage des cartes est réalisé à la main après réception des PCB et des composants nécessaires.



F. Interface extérieure

L'interface extérieure est constituée de trois interrupteurs à deux positions et trois LEDs. De haut en bas, le premier interrupteur allume ou éteint le module timer, alimenté indépendamment par sa propre batterie. Le second interrupteur permet de verrouiller et déverrouiller manuellement le système de séparation. Le dernier interrupteur est chargé de l'alimentation des deux cartes flight controller et navigation.

La LED rouge indique l'alimentation ou non de la carte timer. La LED bleue s'allume si le contact avec la prise Jack est rompu (c'est le cas sur les photos). Enfin, la LED verte indique l'alimentation des deux derniers modules.

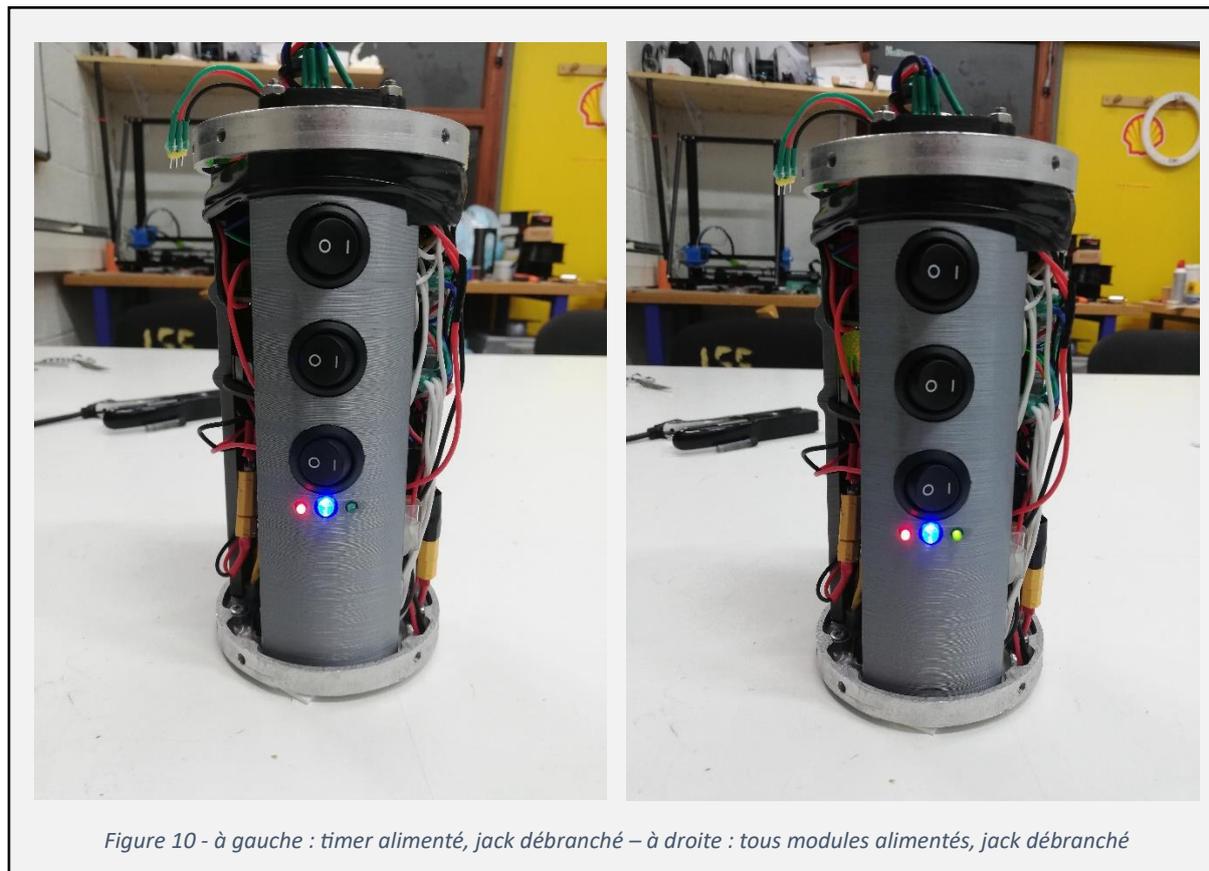


Figure 10 - à gauche : timer alimenté, jack débranché – à droite : tous modules alimentés, jack débranché

4. Résultat du vol et analyse

A. Déroulement du vol

Après avoir validé les qualifications le mercredi 19 juillet, SUPER a décollé le jeudi 20 juillet en début d'après-midi et a effectué un vol nominal malgré quelques imprévus.

Très peu de temps après la sortie de rampe, la trajectoire de la fusée a été légèrement déviée vers l'Ouest. Avec le déploiement du parachute une fois l'apogée atteinte, le corps de la fusée subit un moment important sous la voile. Le système de maintien du propulseur, sous dimensionné, n'a pas résisté à l'accélération du casing du Pro75 qui est tombé seul et a été perdu. Plus légère que prévue à cause de ce délestage, la vitesse de redescente a diminué et la fusée a été déportée par le vent plus longtemps pour atterrir sur le parking de la zone visiteurs pour une récupération optimale.



B. Analyse

- ❖ Lors de la récupération, les aérofreins ont été trouvés ouverts, malgré un léger manque de couple du moteur pas à pas constaté lors des tests au sol. Le système est légèrement endommagé : une des pièces faisant la liaison entre l'aérofrein et la bielle s'est fracturée, très probablement lors du choc de l'atterrissage qui a eu lieu sur cette surface.
- ❖ Lors de la séparation, la coiffe, dont l'attache au parachute était plus longue pour éviter de heurter le tube pendant la descente, a percuté un aileron sur son chemin. L'aileron est brisé au niveau du pied où nous avons pu constater un léger manque de pâte époxy remplacé par un excès de mousse, moins résistante. La correction de cette petite fragilité n'aurait probablement pas sauvé l'aileron de son impact violent avec la coiffe.
- ❖ Le système de maintien du propulseur a été retrouvé plié après par l'accélération du casing vide subie au déploiement de la voile.

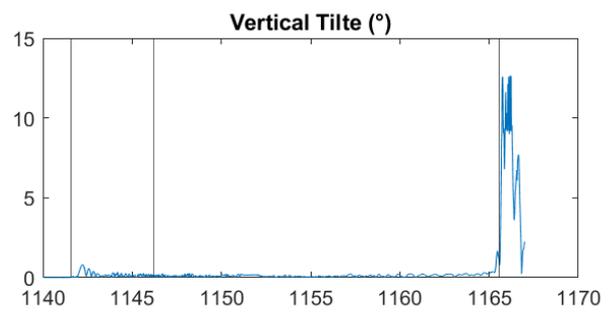
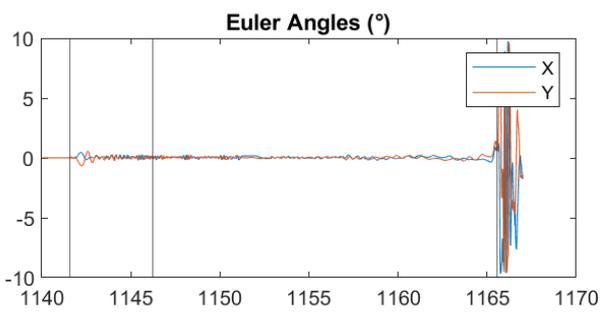
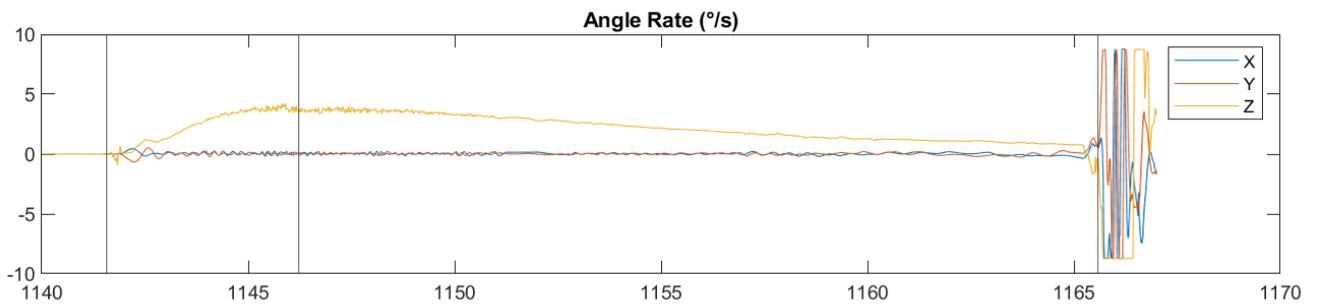
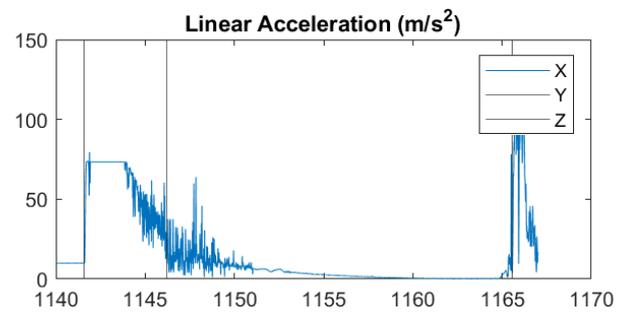
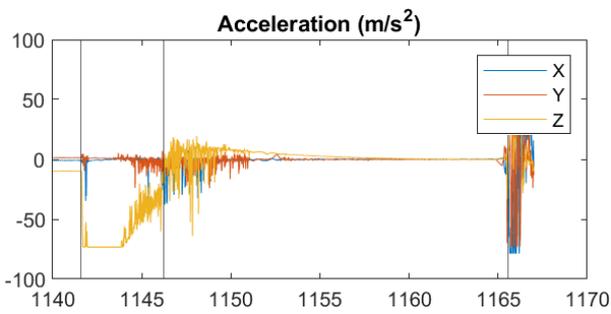
Concernant la mécanique de la fusée, la majorité des sous-systèmes a fonctionné de manière nominale. Certaines modifications peuvent être apportées pour les fiabiliser encore, notamment l'utilisation de charnières plus ajustées pour réduire le faible jeu sur les aérofreins, ou encore l'ajout de renforts supplémentaires externes à la peau du tube pour le rigidifier. Le sous-système à revoir complètement est le maintien du propulseur. Le peu de place que nous avons pour celui-ci nous a poussé à le sous-dimensionner, et son fonctionnement n'était pas pratique pour l'installation du moteur.

L'électronique a fonctionné comme prévu. Certains points sont à modifier pour améliorer son intégration, en particulier concernant la connectique qui devrait à l'avenir être autant que possible débarrassée de câbles libres, avec l'utilisation notamment d'un fond de panier pour les connexions inter-cartes.

C. Données de vol

Le seul capteur embarqué était une IMU. Malheureusement, une mauvaise calibration la limitant à un fonctionnement entre plus et moins 8g a entraîné une saturation du capteur pendant la phase propulsive. Le filtre de Kalman, qui à l'origine devait filtrer en temps réel les données pour un algorithme de contrôle, a été appliqué post-vol pour tenter d'obtenir des données moins bruitées, mais sans succès. La conception de ce filtre sans l'utilisation d'un autre capteur correctement calibré n'était pas suffisante pour obtenir des données exploitables.

Dans les données bruitées, il est possible de distinguer les phases principales de vol, mais pas d'identifier des détails sur le comportement de la fusée pendant ces phases. L'impact des aérofreins et de la traînée ajoutée en fin de propulsion n'a donc pas pu être observé.



Conclusions et perspectives

En deux années de développement, nous avons gagné en expérience et en confiance sur la conception et la fabrication de nos systèmes. Confrontés à de nombreux imprévus et ralentissements, toute l'équipe a eu l'occasion de se familiariser en profondeur avec les procédés de développement de l'association.

Cette première conception de fusée pour la quasi-majorité des membres qui y ont participé s'achève sur un vol nominal et nous permet de retenir de précieuses conclusions pour les projets à venir, en mécanique comme en électronique et acquisition de données.

