

RAPPORT DE PROJET

BiBi Mini-fusée biétage



Lancements durant le C'SPACE 2025

Organisation de la campagne de lancement : Planètes Sciences / CNES

Association du projet : Estaca Space Odyssey (ESO)

Remerciements

Avant de débiter ce rapport, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de BiBi.

Nous remercions tout d'abord l'association Estaca Space Odyssey pour nous avoir permis de mener ce projet à bien, en le finançant et en l'intégrant au sein de notre école sous forme de projet PITA. Ce cadre nous a donné l'opportunité de bénéficier de l'expertise de M. Vincent Tolomio, ingénieur chez MaiaSpace, qui nous a accompagnés tout au long de l'année scolaire. Ses conseils avisés et son suivi régulier ont été déterminants dans nos choix techniques et dans la validation de nos avancées.

Nos remerciements vont également à M. Faux, responsable des instruments d'usinage du FabLab de l'école, pour son aide précieuse dans la fabrication de la bague en aluminium, pièce centrale de notre projet, réalisée dans des délais très courts.

Nous tenons aussi à remercier les bénévoles de Planète Sciences et du CNES pour leur soutien tout au long de l'année et lors du C'Space 2025. Un remerciement particulier à Thomas, responsable des contrôles minifusée, pour l'aide considérable qu'il nous a apportée durant la semaine de lancement, en prenant le temps de vérifier notre fusée malgré des contraintes de temps importantes.

Enfin, nous adressons un grand merci à toutes les personnes non citées, qui, de près ou de loin, nous ont conseillés, aidés, prêtés du matériel ou transmis leur savoir-faire.

Table des matières

Remerciements	2
Tables des illustrations.....	4
I. Introduction.....	5
Présentation de l'équipe.....	5
Organisation du projet.....	6
II. Mécanique.....	7
Structure & Design de la fusée	7
Système de séparation	8
Système d'activation de la séparation	9
Capteur de contact	11
Fabrication	11
Assemblage final pour la RCE 3	17
Stabtraj	18
Système de récupération.....	21
III. Electronique	24
Fonctionnement du 1 ^{er} étage.....	24
Fonctionnement du 2 ^e étage.....	25
Schémas électroniques des 2 étages	25
Caméra du 2 ^e étage	26
Calibration du BNO.....	27
Manipulation des interfaces électroniques.....	27
IV. Software (algorithmes et code)	29
Explication du code	29
V. C'Space 2025.....	30
Vol passif.....	30
Rapport de vol	32
Exploitation des données.....	32
Vol actif.....	33
Rapport de vol	33
Exploitation des données.....	35
VI. Retour d'expérience post-projet.....	36
VII. Conclusion.....	36
Annexes	36

Tables des illustrations

Figure 1 - CAO de la fusée complète.....	7
Figure 2 - Les différentes parties de la fusée.....	7
Figure 3 - CAO du système de séparation.....	8
Figure 4 - Système de crochets pour maintenir ensemble les deux étages.....	8
Figure 5 - Usinage pour le système de séparation.....	9
Figure 6 - CAO du système d'activation de la séparation.....	10
Figure 7 - Système de séparation fermé.....	10
Figure 8 - Système de séparation ouvert.....	10
Figure 9 - Capteur de contact pour vérifier la séparation.....	11
Figure 10 : Ailerons et supports d'ailerons, étage supérieur.....	12
Figure 11 - Ponçage du PVC.....	13
Figure 12 - Enroulage du papier cuisson.....	13
Figure 13 - Préparation de l'époxy.....	14
Figure 14 - Drapage.....	14
Figure 15 - Peau drapée.....	15
Figure 16 - Première équipe de ponçage.....	15
Figure 17 - Démonstration infructueuse de démoulage.....	16
Figure 18 - Découpe des trappes pour la récupération.....	16
Figure 19 - Fusée assemblée pour la RCE 3.....	17
Figure 20 - Stabtraj de la fusée complète.....	18
Figure 21 - Stabtraj de l'étage supérieur.....	19
Figure 22 - Trajectographie de la fusée complète (séparation à l'instant « ouverture para »)	20
Figure 23 - Trajectographie de l'étage supérieur, démarrage à l'allumage du moteur.....	20
Figure 24 - Premier parachute cousu.....	22
Figure 25 - Parachute avec ses suspentes et sa bague anti-torche.....	22
Figure 26 - Trappe en position ouverte, non bloqué par le servomoteur.....	23
Figure 27 : Modélisation de la trappe.....	23
Figure 28 - RunCam modifiée.....	26
Figure 29 - Interface 1er étage (à gauche) et 2 ^{ème} étage (à droite).	28
Figure 30 : Séparation, Vol passif.....	31
Figure 31 - Récupération, vol passif.....	31
Figure 33 Graphique résumant les données du vol passif.....	32
Figure 34 Séparation lors du vol actif.....	33
Figure 35 - Atterrissage BiBi, vol Actif.....	34
Figure 36 Récupération de l'étage inférieur (gauche) et supérieur (droite).....	34

I. Introduction

L'objectif du projet BiBi est de réaliser une fusée biétage de catégorie Minifusée en se basant sur les avancées et les leçons retenues du projet MEDUSA, un projet de fusée biétage de catégorie FUSEX.

Adapter le format de ce projet, (en passant de la catégorie FusEX à Minifusée), permet de se focaliser sur l'aspect le plus technique et innovant de la fusée : le système de séparation. Celui-ci représente un véritable défi car il doit en effet permettre de réaliser de façon fiable, précise et répétable la séparation des deux étages tout en assurant une flèche minimale.

Ce projet a été suivi tout au long de l'année par les équipes bénévoles de Planètes Sciences, notamment lors de 3 réunions d'avancement (RCE).

Suite à la RCE 3, le projet a été qualifié au C'Space 2025, la campagne de lancements étudiants, qui s'est déroulée au camp militaire du Gers (Tarbes – Occitanie) du 5 au 12 juillet 2025.

Sur place, différentes équipes ont assuré les contrôles de qualification ainsi que l'organisation des lancements (dont l'équipe pyrotechnique, en charge de l'intégration/allumage des moteurs).

Ce dossier résume le fonctionnement de la mini-fusée BiBi, et délivre les résultats obtenus lors de la campagne de lancement.

Présentation de l'équipe

Paul BAUBERT – chef de projet, étudiant 4A

Sébastien DIDON-SEON – étudiant 4A

Marie MIGEON – étudiante 4A

Ugo BOURREE – étudiant 4A

Timothée BRUNO – étudiant 4A

Hugues BELIGNE – étudiant 4A

Vincent TOLOMIO – tuteur MaïaSpace

Organisation du projet

Afin de se répartir les tâches et d'avancer au mieux, nous avons décidé de diviser ce projet en deux pôles :

- Pôle Système de séparation et Structure.

Ce pôle a pour rôle de modéliser et concevoir le système de séparation de la mini-fusée biétage, en respectant les points du cahier des charges de Fusex biétage du C'Space. Il a aussi la charge de concevoir la structure de la fusée.

Ce pôle est constitué des membres suivants :

- Hugues BELIGNE
- Ugo BOURREE
- Timothée BRUNO

- Pôle Systèmes Electriques.

Ce pôle est chargé de réaliser toute la partie électrique et électronique du projet, en respectant les mêmes cahiers des charges.

Il est constitué des membres suivants :

- Paul BAUBERT
- Sébastien DIDON-SEON
- Marie MIGEON

Afin de d'assurer l'avancement du projet et de valider les différents éléments du cahier des charges, nous avons rapidement mis en place un diagramme de Gantt et une checklist que nous avons mise à jour régulièrement. Ces éléments nous ont permis de nous projeter et de fixer des deadlines, points essentiels pour finir le projet dans les temps.

II. Mécanique

Structure & Design de la fusée

La première dimension principale de la fusée choisie est le diamètre de 80mm, compromis entre un diamètre de mini-fusée « classique » (environ 60 mm) et celui envisagé pour la Fusex Medusa (100mm). Cela permet d'avoir suffisamment de volume interne tout en restant un diamètre raisonnable pour une Minifusée.

La seconde dimension importante est la longueur totale de la fusée, qui découle elle-même de la longueur de chacun des 2 étages. Celle-ci a évolué au cours de l'année, initialement prévu à 1400mm, elle a finalement atteint 1600mm à la fin de la conception et après la fabrication des premières pièces. En effet, chaque moteur mesurant 228mm, auxquels s'ajoutent les compartiments parachutes d'environ 200mm chacun, la fusée atteint rapidement un profil très allongé.

Ci-dessous le modèle CAO de la fusée réalisé avec Fusion360 et complété au fur et à mesure de la modélisation des éléments internes. Le diagramme de la Figure 2 présente les différentes parties de la fusée qui seront détaillées dans la suite de ce rapport.

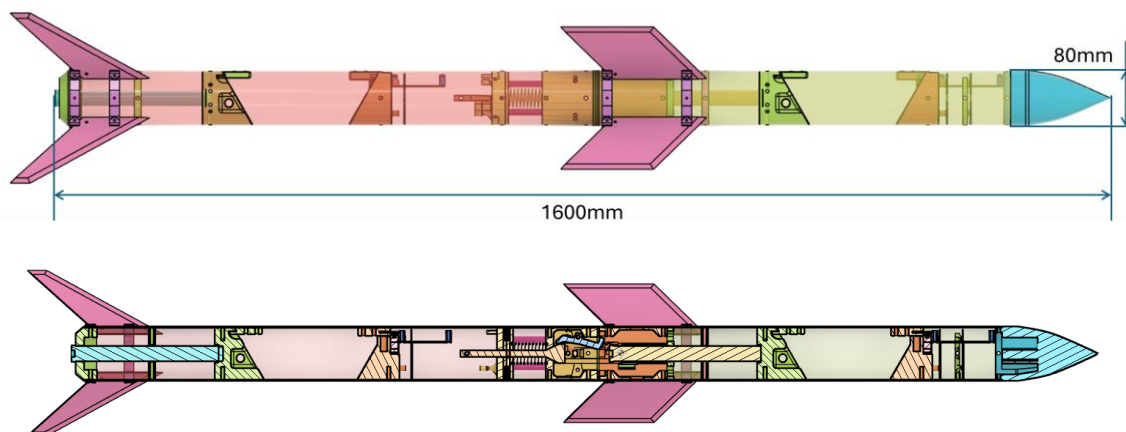


Figure 1 - CAO de la fusée complète

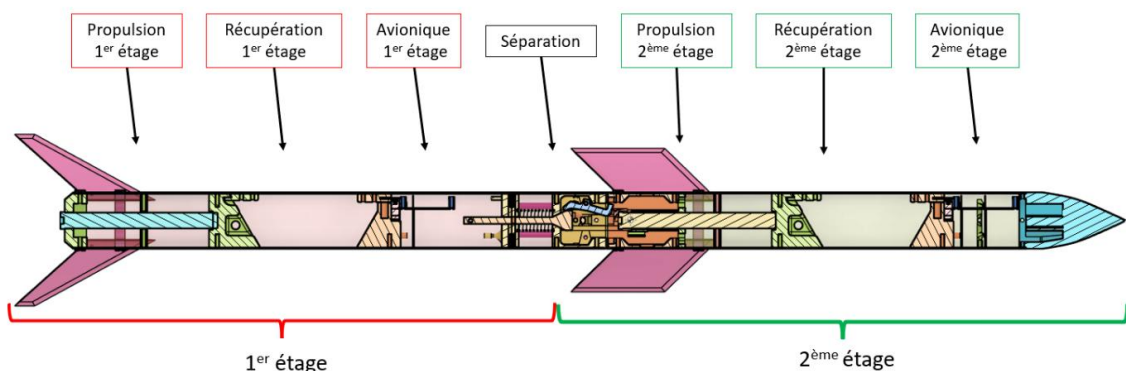


Figure 2 - Les différentes parties de la fusée

Système de séparation

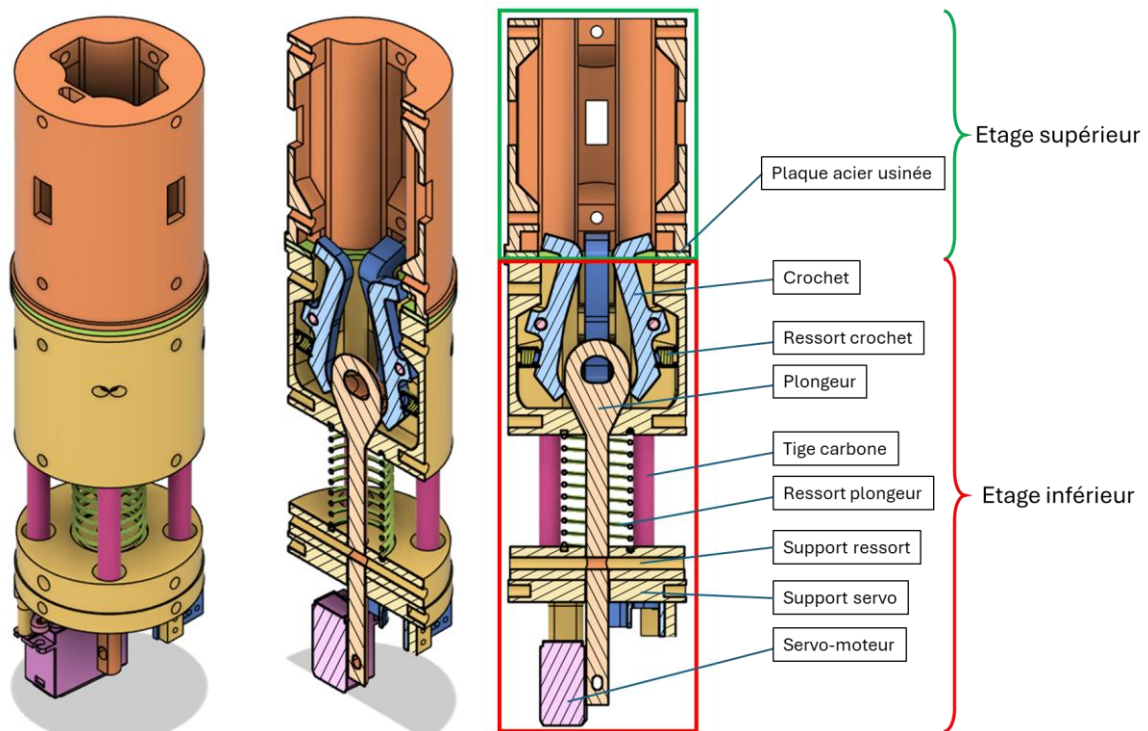


Figure 3 - CAO du système de séparation

Le système de séparation de la fusée repose sur un système de crochets maintenant ensemble les deux étages. Ces crochets sont tenus par défaut en position fermée à l'aide de ressorts situés au-bas de ceux-ci. Lors de la séparation et à l'aide d'un plongeur, les crochets passent en position ouverte, et les étages se séparent, guidés par des tiges en carbone.

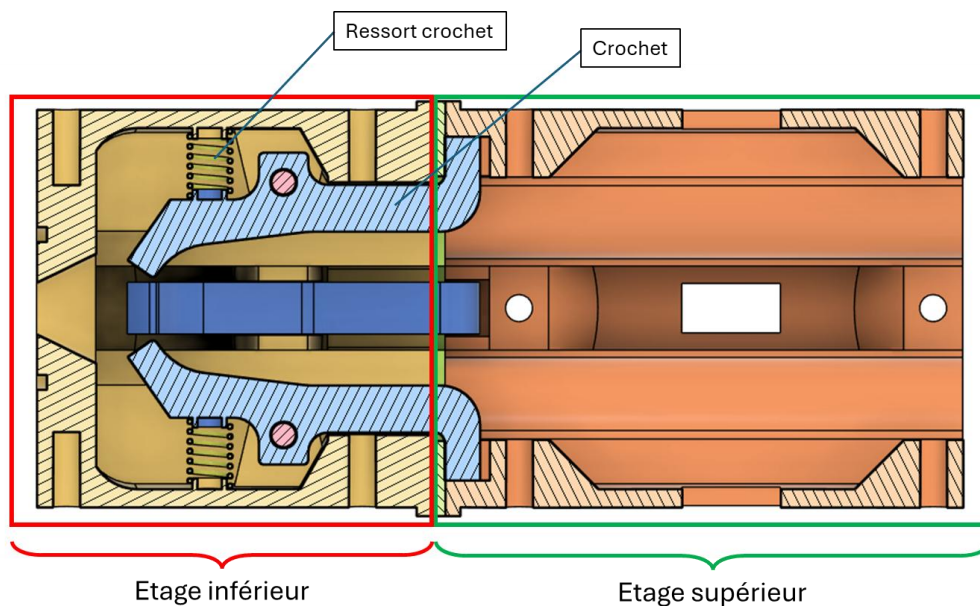


Figure 4 - Système de crochets pour maintenir ensemble les deux étages

Le plan de la séparation des étages est une zone critique. Elle doit garantir l'intégrité du système de séparation ainsi qu'une flèche minimale sur la fusée. C'est sur cette pièce que les crochets de maintien viennent s'appuyer, une forte adhérence est donc requise, sans pour autant entraver la séparation. Cette pièce a donc été usinée en aluminium, matériau alliant résistance et un bon état de surface, à l'atelier de l'école. Le reste des pièces, mis à part les tiges de guidage qui sont en fibre de carbone, ont été imprimées en PETG, ce qui permet d'obtenir des propriétés similaires au PLA, tout en résistant mieux à la chaleur. En effet, le site de lancement se situant à Tarbes en plein mois de juillet, entraîne une exposition au soleil parfois longue ce qui peut mener à des déformations suite à la fonte du PLA.

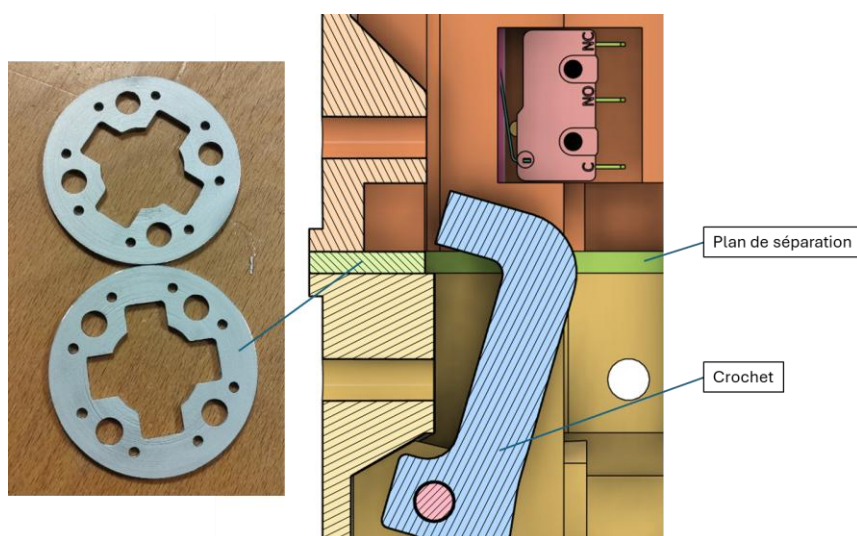


Figure 5 - Usinage pour le système de séparation

Système d'activation de la séparation

L'ouverture du système de séparation s'effectue par compression des ressorts exerçant une force au niveau du bas des crochets. Pour ce faire, nous avons utilisé un système de plongeur qui vient comprimer ces ressorts lors de sa descente. Un ressort est comprimé de manière à chercher à faire descendre constamment le plongeur, mais ce dernier est maintenu en position à l'aide d'une goupille reliée à un servo-moteur. Lors de la séparation, cette goupille est ensuite retirée par activation du servo-moteur, libérant alors le plongeur qui grâce au ressort descend comprimer les ressorts présents en bas des crochets. Les étages se séparent alors, éloignés l'un de l'autre par des ressorts situés autour de chacune des tiges de guidage.

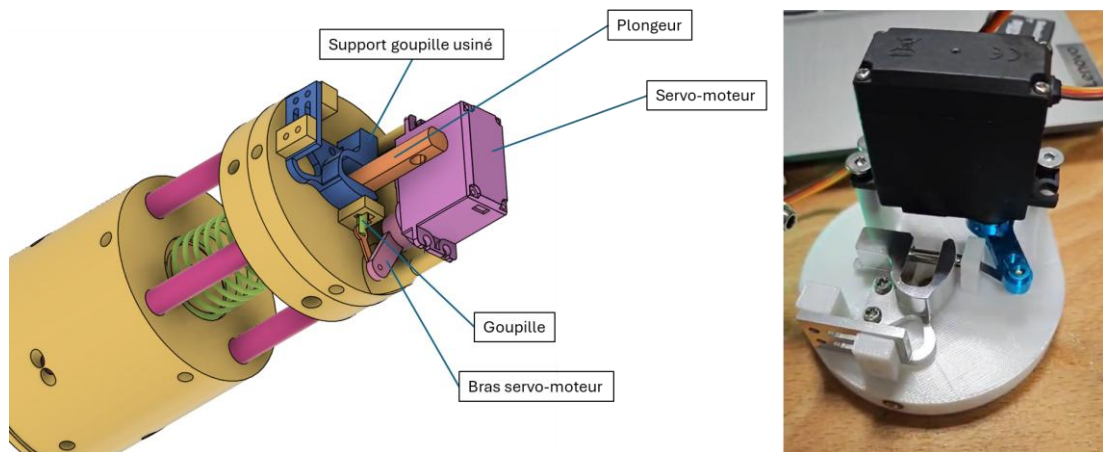


Figure 6 - CAO du système d'activation de la séparation

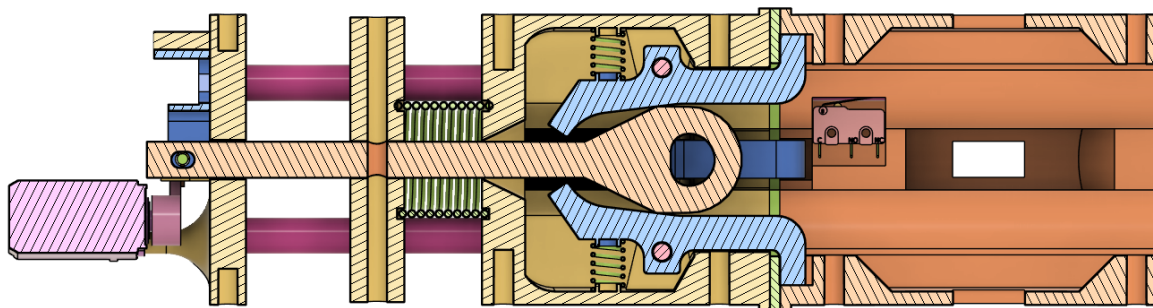


Figure 7 - Système de séparation fermé

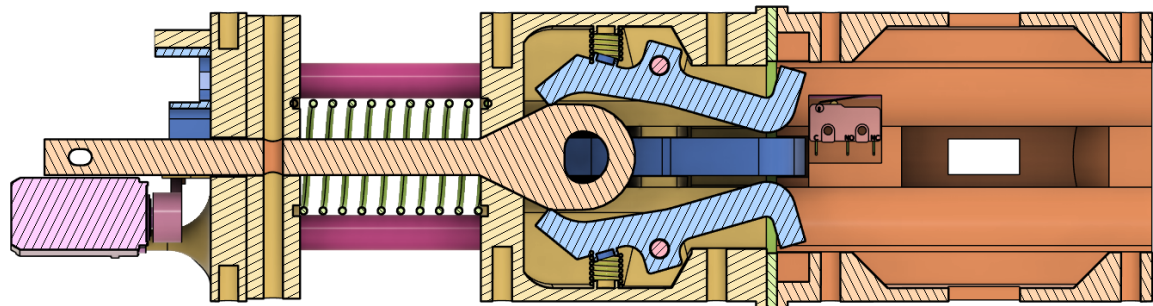


Figure 8 - Système de séparation ouvert

Capteur de contact

Un capteur de contact est présent afin de vérifier l'état de la séparation. Le capteur de contact est maintenu dans l'état « fermé » par une des tiges en carbone servant au guidage de la séparation, il ne change d'état que lorsque la séparation est effective et complète.

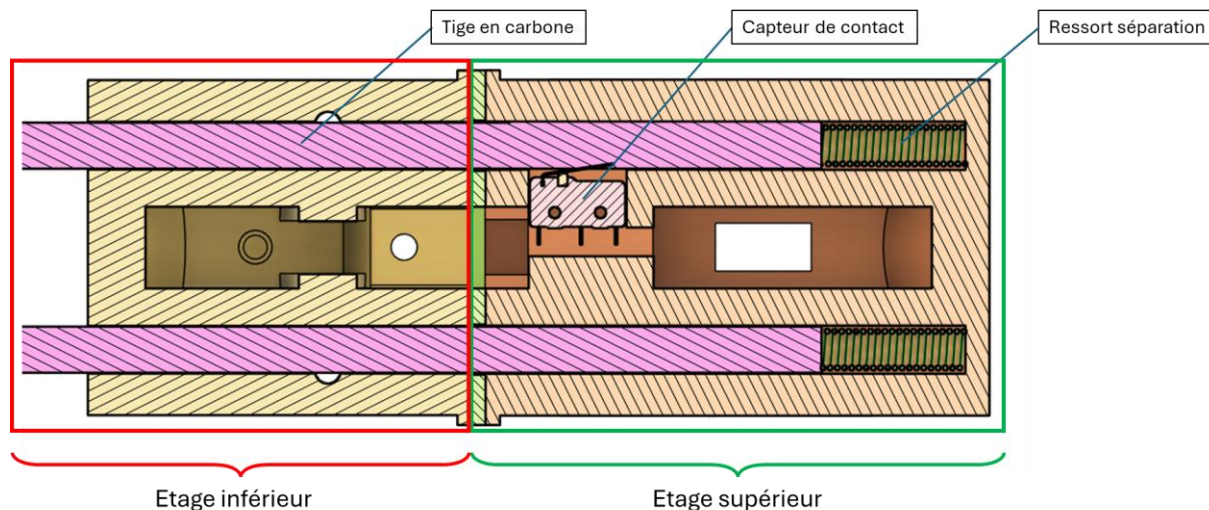


Figure 9 - Capteur de contact pour vérifier la séparation

Fabrication

Pour la fabrication des deux peaux qui constituent le corps de chacun des étages, nous avons utilisé un tube en PVC comme mandrin, que nous avons légèrement poncé afin d'éliminer les imperfections de surface. Ce ponçage permet également de faciliter le démoulage par la suite. Une première couche de papier cuisson est enroulée autour du tube, puis fixée avec du ruban adhésif. Une deuxième couche de papier cuisson est ensuite ajoutée, mais cette fois-ci fixée à la première couche, et non au tube.

Une fois cette préparation terminée, il faut découper et peser notre fibre de verre, puis mesurer les bonnes proportions de résine époxy (préciser proportions utilisées). Nous avons choisi d'utiliser de la fibre de verre car elle ne perturbe pas les ondes électromagnétiques nécessaires à la centrale inertielle, tout en étant un matériau léger et résistant. Nous avons ensuite procédé au drapage de la fibre sur le papier cuisson, en prenant soin d'assurer une bonne imprégnation. Enfin nous avons enroulé du ruban adhésif transparent autour de la fibre imprégnée afin de la comprimer et d'obtenir un meilleur état de surface. La pièce a été laissée à sécher pendant au moins 48 heures, temps nécessaire au durcissement de la résine époxy au sein de la fibre.

Après durcissement, un ponçage au papier de verre a permis d'améliorer l'aspect de surface. Puis arrive le moment du démoulage. Pour ce faire, il faut retirer le premier ruban adhésif (celui en contact avec le tube) et laisser le second en place.

A retenir : ne pas retirer le deuxième ruban adhésif !!

En effet, le démoulage de la première peau s'est avéré bien plus difficile que prévu. Nous avons en premier lieu retiré le deuxième ruban adhésif. Le papier cuisson s'est alors déchiré

sous la peau, et s'est recroquevillé sur lui-même lors de la traction, ce qui a rendu le démoulage particulièrement laborieux.

Il nous aura fallu plus de trois heures d'acharnement afin de réussir ce démoulage, qui a conduit à une visite chez l'ostéopathe pour l'un des membres de l'équipe. La solution a été de tourner le tube dans le sens inverse de la peau, tout en tirant sur la peau. Cela s'est effectué en plusieurs fois.

Pour la seconde peau, forts de cette expérience, le démoulage a été cette fois-ci quasi immédiat, ne prenant que quelques minutes.

Enfin, pour terminer la peau, les trappes ont été découpées à la DREMEL et les trous percés grâce à des guides imprimés en 3D.

Le PETG a été utilisé comme matériau principal des pièces internes, cela a permis un prototypage rapide, avec une meilleure résistance thermique que du PLA, des propriétés mécaniques semblables tout en restant très léger.

Les ailerons de la fusée ont été initialement imprimés en PETG, avec une épaisseur de 2,25mm. Leur forme a été déterminée à partir du Stabtraj, et a donc évolué au cours du projet. Utiliser l'impression 3D nous permet d'avoir rapidement de nouvelles versions des ailerons, tester différentes méthodes de fabrication (orientations des couches, mélanges de matériaux...) tout en restant léger et peu cher. Il a été décidé à la suite de la RCE3 de passer sur des ailerons en carbone.

Les ailerons sont reliés entre eux par des pièces en PETG formant des quarts de cercles et des vis. Ces pièces sont elles-mêmes accrochées à la fusée par des vis, le tout garantissant le bon espacement et l'orientation des ailerons.

Ci-dessous des photos des ailerons supérieurs en PETG et leur fixation :



Figure 10 : Ailerons et supports d'ailerons, étage supérieur

Les vis accrochant les supports aux ailerons ont été changées pour des vis plus courtes, et les "supports hauts" des ailerons ont également été vissés dans la peau une fois la forme définitive sera confirmée.

Voici quelques photos des étapes de fabrication de la peau :



Figure 11 - Ponçage du PVC

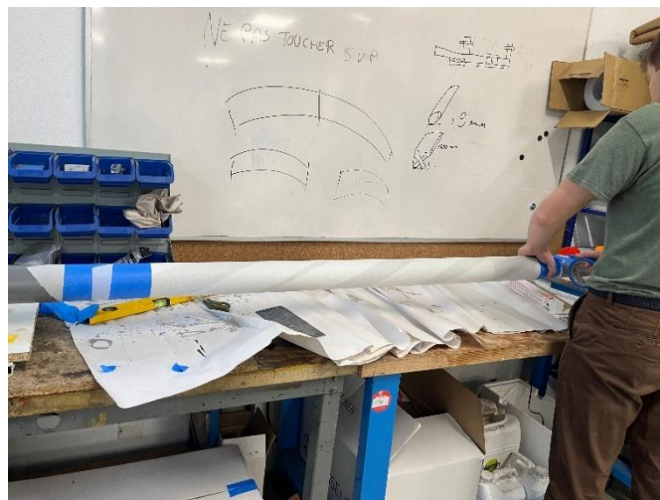


Figure 12 - Enroulage du papier cuisson



Figure 13 - Préparation de l'époxy



Figure 14 - Drapage



Figure 15 - Peau drapée



Figure 16 - Première équipe de ponçage



Figure 17 - Démonstration infructueuse de démoulage



Figure 18 - Découpe des trappes pour la récupération

Assemblage final pour la RCE 3



Figure 19 - Fusée assemblée pour la RCE 3

Stabtraj

Le critère de stabilité est un élément capital de la qualification de la fusée, de nombreuses itérations ont été réalisées au cours de la conception puis fabrication de la fusée afin de s'adapter aux dimensions et grandeurs réelles de la fusée.

Réduire l'échelle de la fusée et l'utilisation de moteurs Pandora s'est avéré être un challenge lors de la conception : le critère de vitesse en sortie de rampe étant fixé à 18 m/s, la masse maximale de la fusée assemblée est donc limitée, à environ 3,5kg (sans propulseur). Cette limite est atteignable relativement facilement pour un projet avec ces dimensions et nous a donc engendré des optimisations et choix de fabrication.

Notre diamètre de référence étant de 83mm, le critère de finesse minimal de l'étage supérieur et le critère maximal sur la fusée complète, couplé avec les dimensions de notre système de séparation ont entraîné une architecture quasi symétrique des étages (chacun 80cm de longueur).

Les critères de portance, marge statique et couple sont liés aux dimensions des ailerons et à la position du centre de masse relativement au centre de portance. Les dimensions des ailerons de l'étage supérieur ont d'abord été fixés afin de satisfaire sa stabilité. Ces derniers contribuent à relever le centre de portance, en conséquence le centre de masse est également déplacé par ajout de masse dans la coiffe. En effet, après un premier montage complet la fusée pesait 2,880kg, ce qui a laissé de la marge pour ajouter de la masse inerte. Le centre de gravité est finalement à 80,2 cm de la coiffe, soit quasiment au niveau du plan de séparation des étages. Ci-dessous le Stabtraj de la fusée complète et de l'étage supérieur obtenus pendant la campagne de lancement :

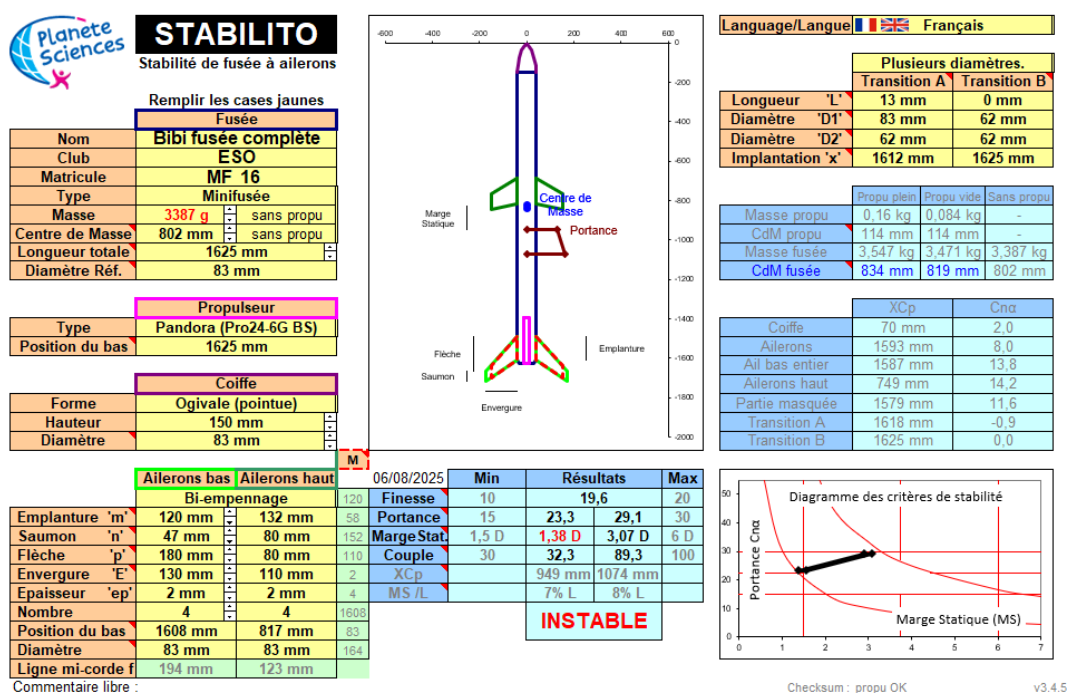


Figure 20 - Stabtraj de la fusée complète



STABILITO

Stabilité de fusée à ailerons

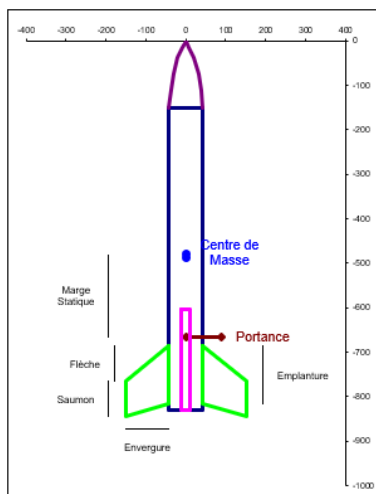
Remplir les cases jaunes

Fusée			
Nom	Bibi étage supérieur		
Club	ESO		
Matricule	MF 16		
Type	Minifusée		
Masse	1713 g	-	sans propu
Centre de Masse	465 mm	-	sans propu
Longueur totale	831 mm	-	-

Propulseur			
Type	Pandora (Pro24-6G BS)		
Position du bas	831 mm		

Coiffe			
Forme	Ogivale (pointue)		
Hauteur	150 mm	-	-
Diamètre	83 mm	-	-

Ailerons			
Mono-empennage			
Emplanture 'm'	132 mm	-	-
Saumon 'n'	80 mm	-	-
Flèche 'p'	80 mm	-	-
Envergure 'E'	110 mm	-	-
Épaisseur 'ep'	2 mm	-	-
Nombre	4	-	-
Position du bas	817 mm	-	-



06/08/2025	Min	Résultats	Max
Finesse	10	10,0	20
Portance	15	16,2	30
Marge Stat	1,5 D	2,15 D	2,26 D
Couple	30	34,7	100
XCp	665 mm	665 mm	665 mm
MS /L	21% L	23% L	23% L

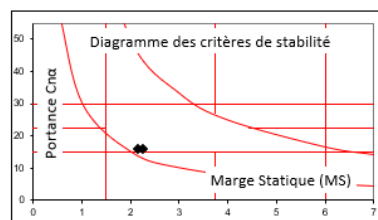
STABLE

Language/Langue Français

Fusée mono-diamètre,

	Propu plein	Propu vide	Sans propu
Masse propu	0,16 kg	0,084 kg	-
CdM propu	114 mm	114 mm	-
Masse fusée	1,873 kg	1,797 kg	1,713 kg
CdM fusée	487 mm	477 mm	465 mm

	XCp	Cna
Coiffe	70 mm	2,0
Ailerons	749 mm	14,2



Commentaire libre :

Checksum : propu OK

v3.4.5

Figure 21 - Stabtraj de l'étage supérieur

Le Stabtraj permet également d'obtenir des données de trajectographie théoriques, qui servent ensuite à déterminer les instants clés de la séparation et des minuteriers.

La fin de la propulsion du 1^{er} étage a lieu à $T=1,1s$; la séparation a lieu à $T=2s$, la fusée ayant alors un angle de $72,3^\circ$ et une altitude de 44m. L'éjection du parachute de l'étage inférieur a lieu à $T=3s$.

La fenêtre temporelle pour l'allumage du moteur de l'étage supérieur s'ouvre à $T=2,3s$ et se referme à $T=3s$, pour un instant optimal prévu à $T=2,5s$. La fin de propulsion du deuxième étage étant donc à $T=3,6s$. L'ouverture de la trappe parachute du 2^{ème} étage a lieu à $T=9s$; la fusée est alors proche de son apogée à 292m d'altitude. L'impact balistique est prévu à 405m, raison pour laquelle le lancement a lieu en rampe fusex, en plus des risques de sécurité liés aux fusées bi-étages.

L'attitude de la fusée pourra être comparée avec les données de la centrale inertielle et les vidéos du vol. Ci-dessous les trajectographies des 2 étages :



TRAJECTO

Trajectographie de fusée

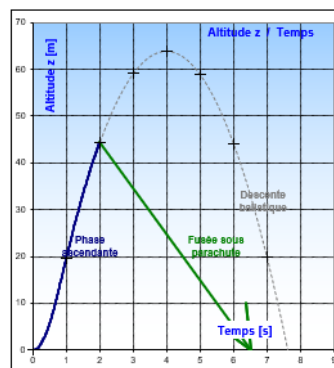
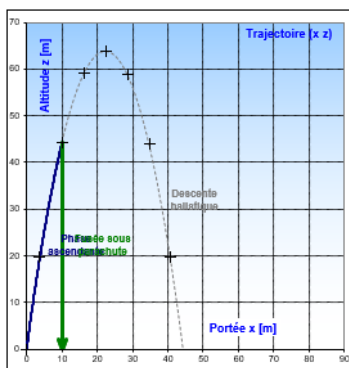
Remplir les cases jaunes

Nom	Fusée
Club	Bibi fusée complète
Matricule	ESO
Masse totale	MF16
Propulseur	3,5469 kg
	Pandora (Pro24-6G BS)

Surface Réf.	Trainée Aérodynamique
Cx	0,006451 m²
	0,6

Longueur	Rampe de Lancement
Élévation	5 m
Altitude	80 °
	0 m

Masse	Descente Sous Parachute
Dépotage	Fusée
Ouverture para	0 satellite
Type de para	2 s
Surface para	N/A
Cx parachute	Croix
Vitesse du vent	0,58 m²
Vitesse descente	1
Durée descente	5 m/s
Durée du vol	9,8 m/s
Déport latéral	5 s
	± 23 m



06/08/2025	Temps	Altitude z	Portée x	Vitesse	Accélération	Efforts
Sortie de Rampe				20,4 m/s		
Vit max & Acc max				36 m/s	58 m/s²	
Culmination, Apogée	3,9 s	64 m	22 m	6 m/s		
Ouverture parachute fusée	2,0 s	44 m	10 m	21 m/s		151,9 N
Impact balistique	7,7 s	~0 m	45 m	35,8 m/s		2229 J

Couleur fuselage/coiffe	Pour localiser la fusée
Couleur parachute fusée	Brun/Orange...
	Rouge...

Commentaire libre : 2 parachutes identiques

propu OK
v3.4.5

Calcul de la surface d'un parachute

Bord 'a'	235 mm
Côté 'b'	250 mm
Surface para	0,29 m²

Résultats détaillés	Temps	Altitude z	Portée x	Vitesse	Accélération	Angle
	s	m	m	m/s	m/s²	°
Décollage	0	0	0	0	-	80
Sortie de Rampe	0,46	4,72	0,83	20,4	39,8	80,0
Vit max & Acc max	-	-	-	36	58,1	-
Fin de Propulsion	1,1	22	4	30	10,4	77,6
Culmination, Apogée	3,9	64	22	6	9,8	7,9
Impact balistique	7,7	~0	45	36	9,0	-80,6
Ouverture parachute fusée	2,0	44	10	20,67	10,1	72,3
Impact fusée sous para.	7	~0	-13 33	10	9,8	-

Figure 22 - Trajectographie de la fusée complète (séparation à l'instant « ouverture para »)



TRAJECTO

Trajectographie de fusée

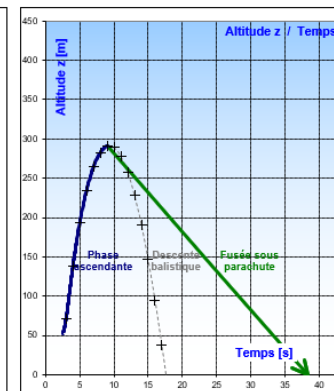
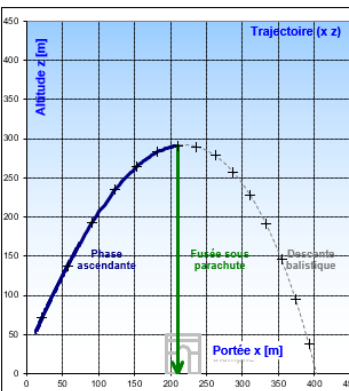
Remplir les cases jaunes

Nom	Fusée
Club	Bibi étage supérieur
Matricule	ESO
Masse totale	MF16
Propulseur	1,8729 kg
	Pandora (Pro24-6G BS)

Surface Réf.	Trainée Aérodynamique
Cx	0,006291 m²
	0,6

Longueur	Rampe de Lancement
Élévation	2,5 m
Altitude	67 °
	0 m

Masse	Descente Sous Parachute
Dépotage	Fusée
Ouverture para	0 satellite
Type de para	9 s
Surface para	N/A
Cx parachute	Croix
Vitesse du vent	0,29 m²
Vitesse descente	1
Durée descente	5 m/s
Durée du vol	10,0 m/s
Déport latéral	29 s
	± 146 m



06/08/2025	Temps	Altitude z	Portée x	Vitesse	Accélération	Efforts
Sortie de Rampe				#N/A		
Vit max & Acc max				81 m/s	119 m/s²	
Culmination, Apogée	9,3 s	292 m	218 m	27 m/s		
Ouverture parachute fusée	9,0 s	291 m	210 m	27 m/s		132,0 N
Impact balistique	17,7 s	~0 m	405 m	65,5 m/s		3850 J

Couleur fuselage/coiffe	Pour localiser la fusée
Couleur parachute fusée	Brun/Orange...
	Rouge...

Commentaire libre :

propu OK
v3.4.5

Figure 23 - Trajectographie de l'étage supérieur, démarrage à l'allumage du moteur

Système de récupération

En tenant compte des données indiquées par le Stabtraj les deux parachutes ont été réalisés afin de permettre à chaque étage de redescendre à 10 m/s.

En considérant que les étages sont de dimensions et de masses très proches, ces parachutes sont de tailles identiques et en forme de croix. Cela a permis une simplicité de fabrication, de pliage et éventuellement de raccommodage en cas de besoin entre les vols.

Fabriqués en toile de parachute orange, ils permettent à la fusée un atterrissage le plus doux possible et sont facilement repérable sur de l'herbe ou de la terre.

Voici les différents calculs utilisés lors de leur réalisation :

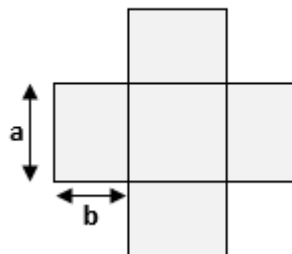
$$S = \frac{2 \cdot g \cdot M}{R \cdot C_x \cdot V_d^2}$$

Avec $M=1,75\text{kg}$ (en moyenne par étage), $V_d=9.5\text{m/s}$, $g=9,81\text{ m/s}^2$, $R=1,3\text{ kg/m}^3$, $C_x=1$
On obtient : $S= 0,29\text{ m}^2$

Cette surface est obtenue par une croix avec des côtés de 24cm.

Calcul de la surface d'un parachute

Bord 'a'
240 mm
Côté 'b'
240 mm
Surface para
0.29 m²



La force exercée sur le parachute est calculée par : $F = \frac{R \cdot S \cdot C_x \cdot V_0^2}{2}$

Avec $S=0,29\text{ m}^2$, $R=1,3\text{ g/l}$, $C_x=1$, V_0 fixé à 45 m/s , la force maximale est de $F=381\text{ N}$ soit environ 38 kg

Les parachutes sont reliés à un émerillon par 8 suspentes chacun d'une longueur d'1,3 fois le « diamètre » du parachute, puis à la fusée par une corde de 2m de long. Leur fixation sur la fusée se fait par une tige en carbone accrochée à une bague du corps de la fusée. Des nœuds de 8 ont été utilisés pour toutes les liaisons des éléments des parachutes.

Un anneau anti-torche en plastique empêche l'emmêlement des suspentes lors de l'ouverture du parachute.



Figure 24 - Premier parachute cousu



Figure 25 - Parachute avec ses suspentes et sa bague anti-torche

La trappe d'éjection de chaque étage est également reliée à son parachute respectif. Elle est maintenue en place par une languette en plastique dans une fente d'un côté et verrouillée par un palonnier de servomoteur de l'autre. Le système est identique pour les 2 étages. Lorsque l'ordre d'ouverture de la trappe est envoyé, le servomoteur tourne, libérant la trappe, qui s'éjecte à l'aide d'un ressort. La trappe entraîne alors avec elle le parachute

Voici une image montrant le haut de la trappe, lorsque le palonnier du servomoteur est tourné et ne verrouille pas la trappe.



Figure 26 - Trappe en position ouverte, non bloqué par le servomoteur

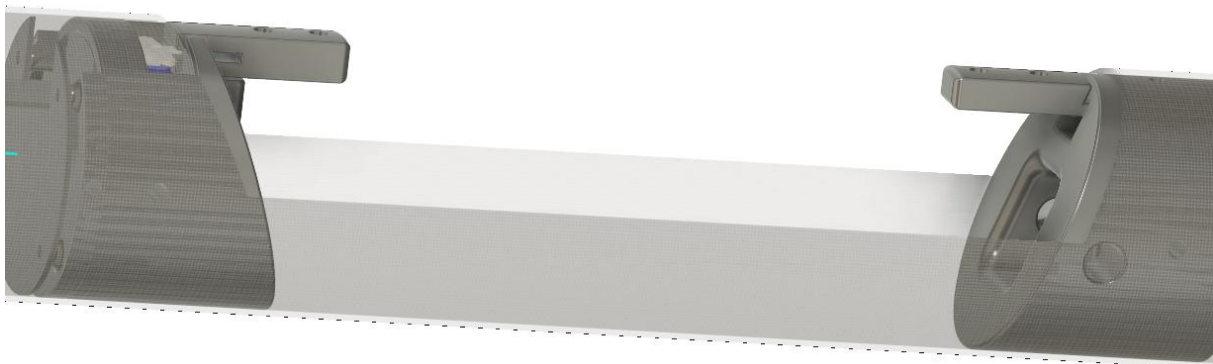
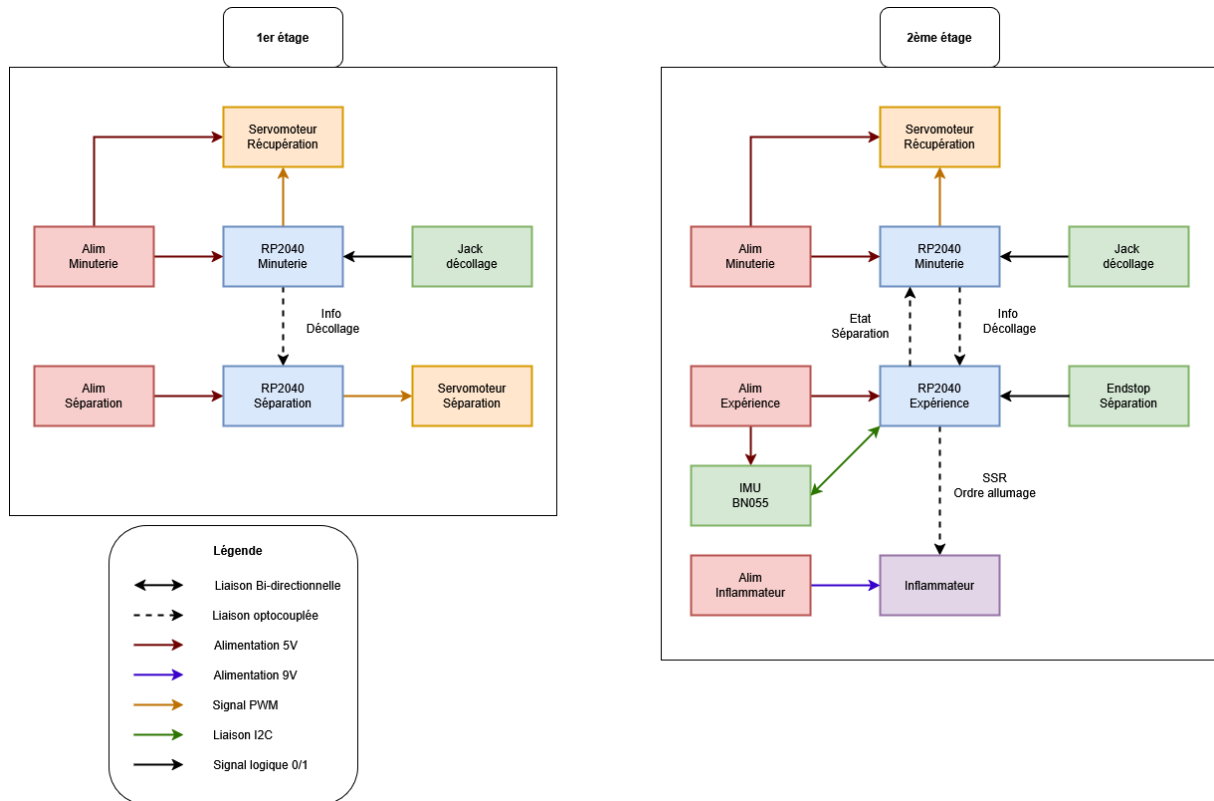


Figure 27 : Modélisation de la trappe

III. Electronique

Le système électronique de BiBi reprend les fondations établies sur le projet Medusa, tout en les développant. Il repose sur deux avioniques distinctes et cinq systèmes isolés électriquement : la minuterie et l'expérience du 1er étage, la minuterie et l'expérience du 2e étage, ainsi que l'inflamateur du 2e étage.

Voici un schéma représentant les connexions entre ces différents éléments :



Fonctionnement du 1^{er} étage

Le 1er étage comporte deux microcontrôleurs indépendants : l'un dédié à la minuterie, l'autre au système de séparation. Chacun dispose de sa propre batterie. Le microcontrôleur de la minuterie contrôle le servomoteur qui libère la trappe du parachute, ainsi que celui qui déclenche la séparation. Une liaison logique est assurée entre la minuterie et la séparation grâce à un optocoupleur. Le jack de sécurité, arraché au moment du décollage, est également relié à la minuterie. Aucun capteur n'est embarqué sur cet étage ; l'ensemble du système repose sur un algorithme temporel.

Au moment du décollage, la fusée quitte la rampe et le jack se déconnecte. Ce signal déclenche le début de la séquence : la minuterie envoie une impulsion à l'autre microcontrôleur via l'optocoupleur, et les deux modules commencent à compter le temps écoulé. Lorsque la plage temporelle de la séparation est atteinte, le mécanisme de séparation

est activé. Ensuite lorsque la plage temporelle de la récupération est atteinte, le parachute est libéré. Cette dernière action marque la fin du cycle de fonctionnement de l'avionique du 1er étage.

Fonctionnement du 2^e étage

Le 2e étage présente une architecture bien plus sophistiquée. Là encore, on retrouve deux microcontrôleurs, chacun avec sa propre alimentation : un pour la minuterie, l'autre pour le système expérimental. Le microcontrôleur de la minuterie est connecté au jack et commande le servo chargé de libérer le parachute. Le microcontrôleur de l'expérience, quant à lui, intègre une centrale inertielle (BN0055) équipée d'un filtre de Kalman intégré ainsi qu'un capteur de fin de course permettant de valider la séparation entre les étages. Une double communication entre les deux microcontrôleurs est rendue possible grâce à deux optocoupleurs.

Le fonctionnement de cet étage repose à la fois sur une logique temporelle et sur des conditions d'état. Dès le décollage, confirmé par la déconnexion du jack, les deux microcontrôleurs démarrent leur chronomètre. Lorsque la plage temporelle de la mise à feu est atteinte, l'algorithme étudie l'état de l'attitude et celle du capteur fin de course. Si l'attitude est correcte et si le capteur n'est plus dans l'état « fermé », la mise à feu est autorisée et l'ordre est envoyé à l'inflamateur.

Une confirmation est renvoyée à la minuterie si la mise à feu a eu lieu. Cette confirmation est essentielle : en cas de non-allumage, la séquence de récupération est modifiée. En effet, les apogées étant différentes selon que le 2e étage est allumé ou non, le moment d'ouverture de la trappe parachute doit être ajusté en conséquence.

Enfin, une dernière fenêtre temporelle déclenche la libération du parachute par le servomoteur. Une fois cette action réalisée, le cycle de l'avionique du 2e étage s'achève.

Un point supplémentaire sur la centrale inertielle est à noter. Le temps nécessaire à la compréhension du fonctionnement de ce capteur a été un challenge bien sous-estimé. Le BN0055 est une centrale inertielle très complète avec beaucoup de fonctionnalités qu'il faut savoir exploiter. En complément, de nouvelles fonctions ont été ajoutées manuellement pour nous permettre d'accéder et exploiter les données par adresse.

Schémas électroniques des 2 étages

(Veuillez vous référer aux schémas électriques en annexe)

La lecture des schémas électroniques de BiBi peut s'avérer complexe, en raison du nombre important de connexions nécessaires pour assurer le fonctionnement coordonné des différentes interfaces. Cette densité est inévitable dans un système embarqué réparti sur plusieurs étages et composants indépendants.

Un choix technique qui mérite d'être souligné est l'utilisation de relais statiques (SSR - Solid State Relays). Contrairement aux relais mécaniques classiques, ces composants ne possèdent aucune pièce mobile, ce qui les rend parfaitement adaptés aux environnements soumis à de fortes vibrations. Outre leur robustesse, ils présentent également l'avantage d'assurer une isolation électrique entre le système d'inflammation du 2^e étage et les autres sous-systèmes.

Caméra du 2^e étage

La caméra utilisée est une RunCam Split 3 Nano que nous avons modifiée.

Cette caméra ne dispose pas d'une interface permettant une commande simple par un microcontrôleur. Nous avons donc dessoudé le bouton à l'aide d'un pistolet à air chaud, puis soudé à ses contacts des fils de cuivre émaillés de 0,3 mm de diamètre, reliés à la RP2040 Zero de l'expérience. Grâce à cette modification, il était possible de démarrer ou d'arrêter l'enregistrement, ainsi que de mettre la caméra en veille (un mode où sa consommation est quasi nulle). Cependant, cette méthode n'était pas idéale : la petite taille du bouton rend le dessoudage délicat, d'autant qu'il est entouré de nombreux composants essentiels au bon fonctionnement de la caméra. Si l'un de ces composants venait à se dessouder, cela pourrait compromettre son fonctionnement.

Une alternative plus simple aurait été d'utiliser un MOSFET pour allumer et éteindre la caméra. Dans ce cas, celle-ci aurait démarré directement l'enregistrement dès sa mise sous tension.

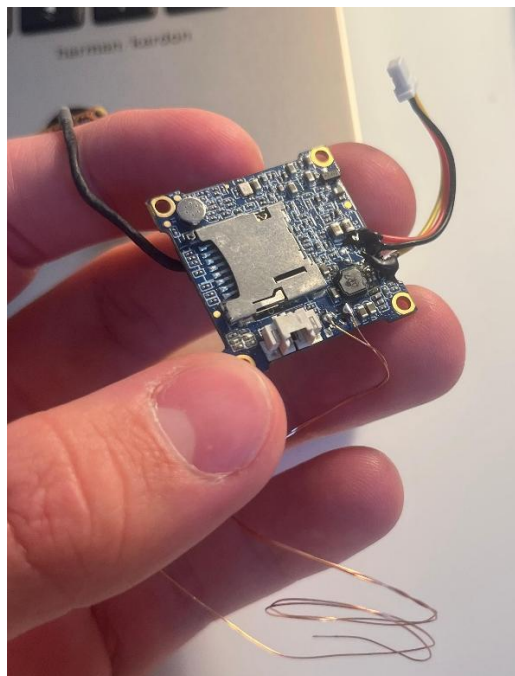


Figure 28 - RunCam modifiée

Calibration du BNO

L'algorithme de validation d'attitude de l'avionique utilise les quaternions pour se repérer dans l'espace. Le BNO055 fournit ces informations que nous convertissons dans un domaine sphérique (thêta, phi) orienté par le pôle Nord magnétique. Il suffit d'entrer les plages en thêta et phi où la mise à feu est autorisée pour obtenir l'algorithme de validation d'attitude. Cet algorithme a été testé à l'aide de Matlab. Le script nous a permis de voir en temps réel l'attitude de la fusée ainsi que la plage de mise à feu autorisée. Cela permet de visuellement constater que la LED « ATTITUDE » s'allumait au bon moment.

Manipulation des interfaces électroniques

L'interface du 1er étage n'est pas commentée ici, car elle est pratiquement identique à celle du 2e étage, à l'exception de l'absence de l'inflamateur. Nous allons donc nous concentrer sur le fonctionnement de l'interface du 2e étage.

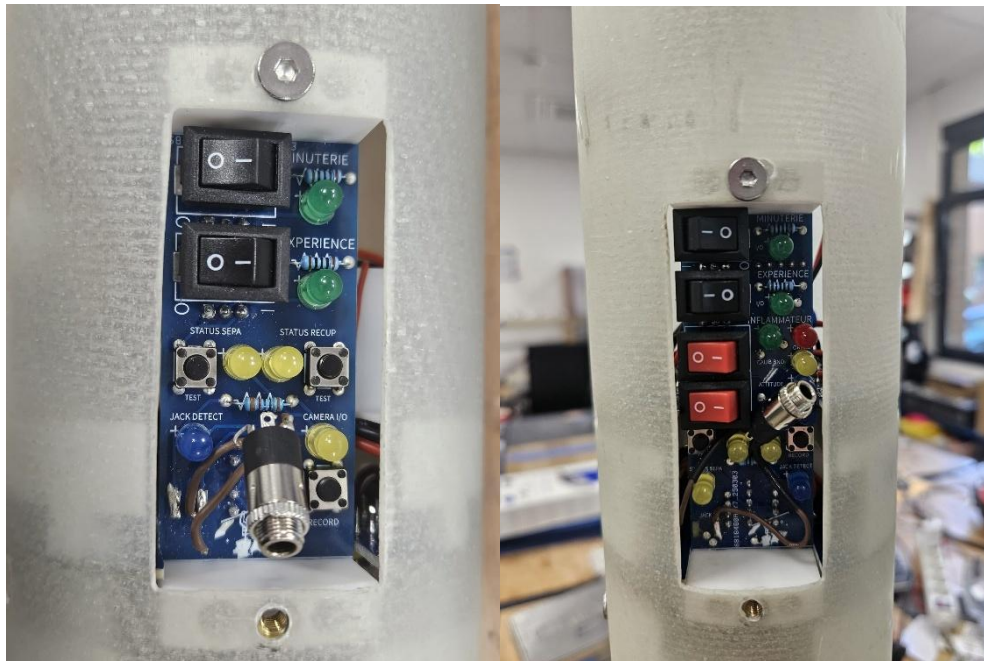
La procédure de mise en route commence par le branchement du jack de sécurité. Ensuite, les deux interrupteurs noirs sont actionnés, ce qui allume leurs LED vertes respectives. Ces dernières indiquent que les deux modules sont bien alimentés électriquement. En guise de test visuel, l'intégralité des LED du système s'allument brièvement afin de valider leur bon fonctionnement.

Lors de la phase d'attente précédant le lancement, une LED orange nommée « CALIB BNO » s'allume : elle signale que la centrale inertielle est en cours de calibrage. Une fois cette LED éteinte, la centrale est opérationnelle et le système est prêt à être lancé.

Une LED bleue appelée « ATTITUDE » s'allume lorsque la centrale inertielle détecte une orientation correcte pour autoriser l'allumage du moteur du 2e étage. Cela permet aux opérateurs de vérifier en temps réel que la centrale fonctionne correctement. Une autre LED bleue, intitulée « FENÊTRE », indique quant à elle que le chronomètre de l'expérience est entré dans la plage temporelle autorisant une mise à feu.

Tant que le jack est en place (donc avant le décollage), un bouton nommé « TEST » peut être utilisé pour ouvrir manuellement la trappe du parachute, ce qui permet de tester le bon fonctionnement du servo de la récupération. Un nommé également « TEST » permet tester le bon fonctionnement du servo de la séparation et un dernier bouton est attribué à la caméra.

Avant le retour des pyrotechniciens en zone de lancement, les boutons rouges seront basculés afin d'activer le système de mise à feu. Un témoin vert s'allumera.



*Figure 29 - Interface 1er étage (à gauche) et 2^{ème} étage (à droite).
(Il manque sur ces images la pièce en plastique servant à maintenir en position le connecteur du Jack)*

IV. Software (algorithmes et code)

Explication du code

Nous allons uniquement évoquer l'algorithme de l'expérience du 2^e étage car c'est ici que se concentre la logique la plus critique.

Dans le code de l'expérience, l'exécution commence par une phase d'initialisation. Les broches d'entrées et de sorties sont configurées selon leur usage respectif, qu'il s'agisse de capter un signal d'optocoupleur, de lire l'état d'un bouton ou de commander la caméra par un signal haut ou bas. La centrale inertielle BNO055 est ensuite initialisée étape par étape : mise en mode configuration, téléversement des données de calibrations des capteurs internes (ces valeurs ont été recherchées au préalable) et passage en mode de fusion de données pour obtenir directement des mesures d'attitude. La centrale se calibre ensuite à partir des nouvelles valeurs de calibration importées. Vient ensuite l'initialisation du système de stockage : la mémoire flash interne est montée avec le système de fichiers LittleFS, ce qui rend possible l'enregistrement structuré des données. Enfin, une file d'attente est créée pour stocker temporairement les mesures avant leur écriture en mémoire.

L'exécution du programme est répartie sur les deux cœurs de la RP2040, chacun s'occupant du fonctionnement d'une boucle indépendante. La première boucle est conçue pour tourner le plus vite possible, sans opérations bloquantes, afin d'évaluer en temps réel les conditions nécessaires au rallumage du second étage. La seconde boucle, elle, s'occupe de l'enregistrement des données, une tâche moins critique en termes de latence mais plus lourde en traitement.

Dans la première boucle, les états de trois entrées sont mis à jour : le signal de l'optocoupleur indiquant que la fusée a décollé, le capteur de contact indiquant la séparation des deux étages, et le bouton d'activation de l'enregistrement de la caméra et des données. Les mesures de la centrale inertielle sont ensuite acquises ; les quaternions fournis par le BNO055 sont convertis dans un système de coordonnées sphériques afin de déterminer l'attitude de l'étage et de vérifier si elle est conforme aux critères de mise à feu.

Le fonctionnement diffère selon que l'optocoupleur signale un mode « sol » ou un mode « vol ». En mode sol, il est possible de lancer l'enregistrement vidéo et la collecte de données qui aura lieu après un temps prédéfini. En mode vol, le programme suit le temps écoulé depuis l'allumage du moteur du premier étage et gère deux fenêtres temporelles distinctes. La première est celle de la mise à feu : si l'on se trouve dans cette fenêtre, que l'attitude est correcte et que la séparation a bien eu lieu, le microcontrôleur envoie un signal haut pour déclencher le rallumage du second étage. Dans le même temps, un signal haut est transmis à l'optocoupleur de la minuterie pour indiquer qu'il faudra ouvrir le parachute plus tard. La seconde fenêtre temporelle correspond à la fin de mission : lorsque cette étape est atteinte, la caméra et l'enregistrement des données sont arrêtés. En fin de cycle de cette boucle, toutes les données importantes sont regroupées dans une structure et envoyées dans la file d'attente.

La seconde boucle, moins exigeante en vitesse, se charge de recevoir cette structure, de la lire et de la sauvegarder sur la mémoire interne si l'enregistrement est activé.

V. C'Space 2025

Notre fusée étant une biétagée avec deux moteurs, nous avons dû effectuer deux vols : un vol passif puis un vol actif. Le rôle du vol passif est de vérifier en condition réel que l'allumage du moteur s'effectue au bon moment et dans les conditions adéquates. En effet, un allumage intempestif serait dangereux et pourrait blesser des spectateurs.

Vol passif

Afin de pouvoir effectuer le lancement du vol passif, il a fallu passer les qualifications effectuées par les contrôleurs du CNES et de Planètes Sciences. Ces qualifications consistent en une multitude de tests afin de vérifier que la fusée est prête pour effectuer un lancement correct et sans danger. Les principaux tests de ces qualifications sont la vérification du Stabtraj, où les contrôleurs mesurent toutes les dimensions de la fusée pour créer le Stabtraj et vérifier sa conformité. Viennent ensuite les tests de solidité des différents ailerons ainsi que le test de la flèche. Ce dernier permet de vérifier que la fusée ne se déforme que peu sous la contrainte.

Ensuite, une fois que tous les paramètres ont été validés, vient l'étape du vol simulé. Devant un responsable CNES et un pyrotechnicien, nous devons simuler toute notre chronologie de vol (mise en rampe, accroche des jacks, allumage de l'électronique ...), puis simuler le vol en portant la fusée et en suivant un vol « nominal », c'est-à-dire un vol parfaitement réussi, ce qui nous permet de vérifier que le temps de séparation, les temps d'ouverture des trappes de récupération et notre procédure de lancement s'effectuent correctement. Une fois cette dernière vérification effectuée et validée, la fusée est qualifiée et plus aucune modification n'est acceptée jusqu'au vol (excepté pour recharger les batteries).

Notre qualification pour le vol passif a eu lieu le mercredi après-midi. Celles-ci se sont déroulées sans problème, bien que nous ayons dû avoir une dérogation pour la flèche de la fusée qui était trop élevée de 4mm sur le côté avec les trous pour les trappes mais bonne dans les 3 autres directions.

Cela a été pour nous une qualification tardive, car ce vol a eu lieu le jeudi matin, et qu'il fallait que nous requalifions après réparation notre fusée pour le vol actif, et que les qualifications se terminaient le jeudi midi.

Le lancement du vol passif a eu lieu le jeudi 10/07 à 8h46.

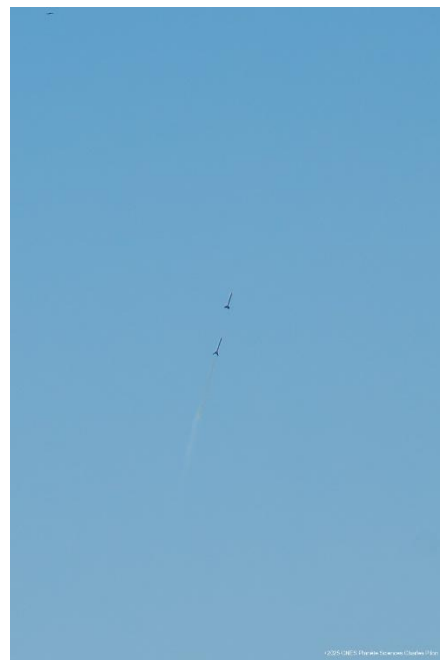
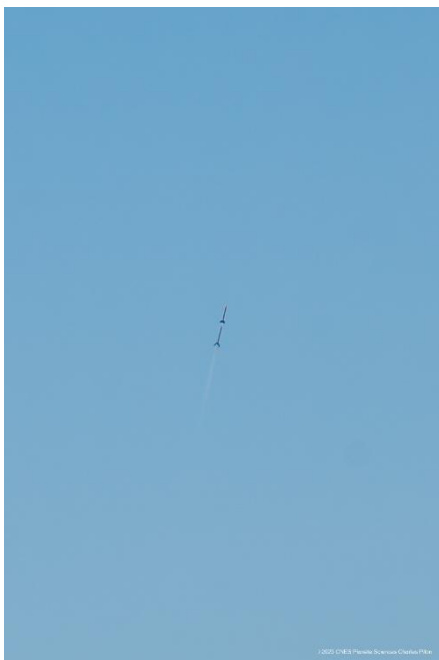


Figure 30 : Séparation, Vol passif

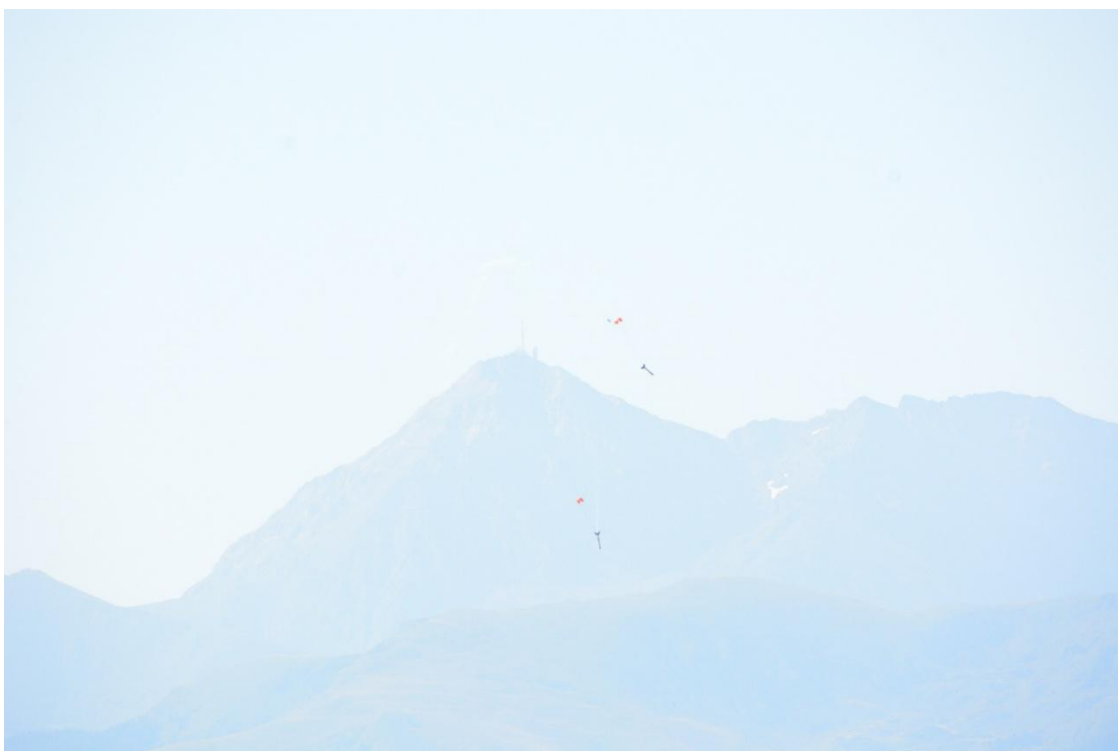


Figure 31 - Récupération, vol passif

Rapport de vol

Le vol passif s'est parfaitement réalisé, nous offrant de belles images. La fusée a effectué un vol nominal, la séparation a eu lieu au bon moment, les parachutes de chaque étage se sont ouverts en même temps et au bon moment et l'inflammateur du deuxième étage s'est allumé également au bon moment et dans les bonnes conditions. La fusée a atterri à environ 20 m des rampes, ce qui a rendu sa récupération facile et rapide. Nous l'avons récupéré en très bon état, avec seulement de la dégradation au niveau d'un support jack et de 4 équerres en PETG. Le buzzer s'est allumé, ce qui signifie qu'en cas de vol actif le moteur du 2^{ème} étage se serait allumé.

Exploitation des données

A la suite du vol passif, nous avons récupéré les données de stockage et de la caméra. Elles ont bien démontré le fait que la fusée était stable après la séparation, et donc qu'il y aurait eu allumage du 2^{ème} étage ; cela est confirmé par le fait que l'inflammateur de test s'est déclenché. Pour vérifier les minutages de séparation et d'allumage, nous avons utilisé la caméra qui a enregistré la première partie du vol. Les timings ont été validés et correspondent aux ordres envoyés.

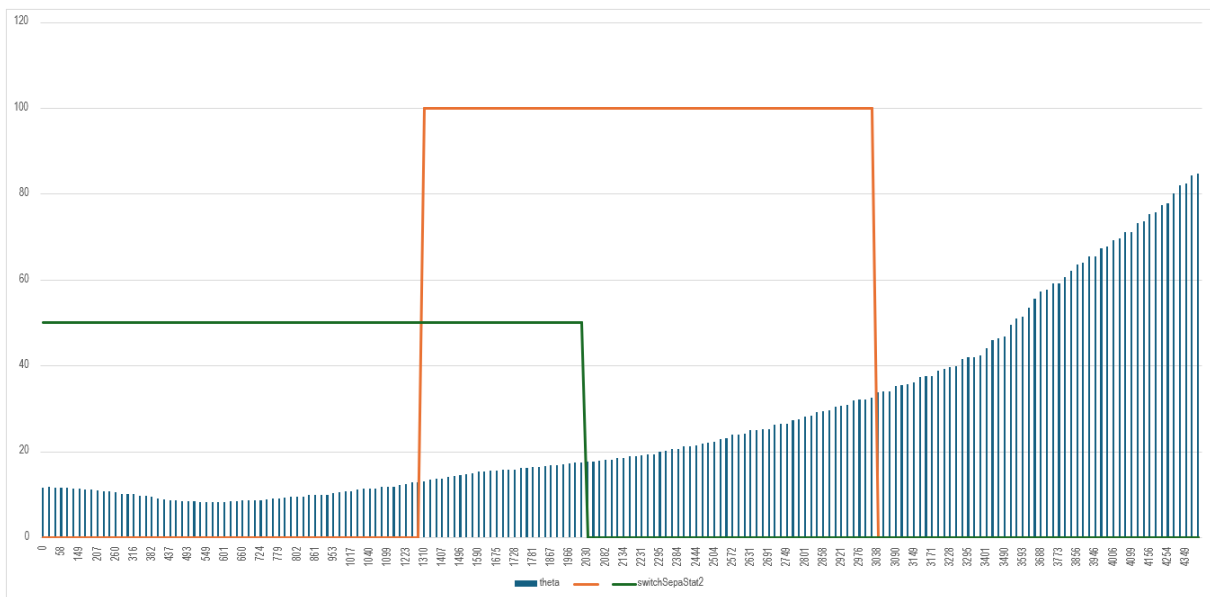


Figure 32 Graphique résumant les données du vol passif

Sur ce graphique les traits bleus représentent l'attitude de la fusée (inclinaison par rapport à l'axe Z, normal au sol). La plage autorisée était entre 13° et 33°, représentée la porte orange. Le créneau en vert représente le bon déclenchement de la séparation des étages à 2s (comme prévu). La fenêtre temporelle pour l'allumage du moteur du 2^{ème} étage étant entre 2.3s et 3s, le buzzer s'allume (son dans la vidéo) et l'inflammateur brûle.

Vol actif

À la suite du bon déroulement de notre vol passif, il a fallu de nouveau passer les qualifications pour cette fois-ci le vol actif. Nous avions peu de temps, les qualifications étant censées se terminer le jeudi midi. Seulement, la fusée ayant subi peu de dégradations, nous avons pu la remettre rapidement en état. Par anticipation, nous avons également imprimé en PETG d'autres exemplaires des pièces susceptibles de casser lors du vol passif.

Notre fusée fut qualifiée pour le vol actif le jeudi en fin d'après-midi sans encombre. Le vol actif de BiBi a eu lieu le vendredi 11/07 dans la matinée.

Rapport de vol



Figure 33 Séparation lors du vol actif

Le vol de BiBi s'est effectué à 6h32. Ce vol fut également nominal, cependant, il n'y a pas eu d'allumage du 2ème étage. Après analyse des données, il s'est avéré que l'attitude du deuxième étage ne permettait pas le rallumage de ce dernier. En revanche, le mode dégradé de la fusée a parfaitement fonctionné. Les conditions de rallumage du deuxième étage n'étant pas réunies, la fusée a réalisé l'équivalent d'un second vol passif, ce qui a démontré la fiabilité de notre système.



Figure 34 - Atterrissage BiBi, vol Actif

La fusée a atterri une nouvelle fois proche des rampes. Par mesure de sécurité, les pyrotechniciens ont dû attendre 30 minutes avant d'aller désarmer le moteur du 2nd étage. Nous avons récupéré peu après la fusée, cette fois-ci il y a eu plus de dégradations, surtout pour le 2ème étage dont le parachute s'est mal déployé : la ficelle du parachute a arraché une partie de la peau.



Figure 35 Récupération de l'étage inférieur (gauche) et supérieur (droite)

Exploitation des données

A la suite de ce second vol, nous avons récupéré les données de stockage et les données de la caméra. Grâce à cela, nous avons pu confirmer que le rallumage du deuxième étage n'avait pas eu lieu car les conditions n'étaient pas respectées. Nous avons également observé que le 2ème étage n'était pas loin de se rallumer. En effet, entre le moment où la fusée sort de la bonne attitude et le moment où la fenêtre d'allumage commence, il n'y a qu'une différence de 17ms.

Plusieurs hypothèses ont été avancées concernant le fait que les conditions n'est pas été réunies. Visuellement, nous avons remarqué une vitesse en sortie de rampe plus faible, entraînant une apogée légèrement précocce, qui entraînerait la sortie de la plage de rallumage. Ce manque de vitesse a pu être causé par un mauvais alignement des patins, un moteur moins performant ou encore des dégâts à la suite du premier vol qui auraient fragilisé la fusée.

Grâce à ce vol, nous avons pu tout de même valider la conformité de notre code dans le cas du non-allumage du 2ème étage.

VI. Retour d'expérience post-projet

Grâce à ces deux vols et forts de notre expérience au C'Space, nous avons retenu un certain nombre d'améliorations pour BiBi qui seront à prendre en compte dans la perspective d'évolution du projet.

Il serait mieux de placer les trappes côté rampe pour que les parachutes puissent s'ouvrir directement et ne pas avoir à faire le tour de la structure pour s'ouvrir. Idéalement, les trappes devraient être accrochées sur la suspente en haut du parachute plutôt que sur un bout extérieur du parachute ; cela éviterait à la trappe de s'enrouler dans le parachute et donc d'empêcher celui-ci de s'ouvrir correctement (comme pour le 2^{ème} étage lors du vol actif). De plus, l'accroche de la récupération du 1^{er} étage doit être mise un peu au-dessus du centre de gravité pour éviter que le système de séparation prenne un choc lors de l'atterrissage.

Concernant le système de récupération, il faudrait éviter d'avoir un ressort qui pousse sur le bras du servomoteur. Même si c'est une méthode compacte, elle a amené à fragiliser les engrenages métalliques plusieurs fois. La méthode de la cloche pourrait être utilisée. Pour le design du parachute, il faut prendre la marge basse en termes de vitesse de redescende, comme la fusée ne va pas très haut et qu'elle doit effectuer un 2^{ème} vol. Aussi, comme la fusée atterrit très proche des rampes, on peut la récupérer rapidement (en ayant bien demandé et prévenu l'organisation).

Une amélioration importante serait de faire une avionique démontable plus facilement, notamment au niveau du routage interne des câbles. Aussi, des tests doivent être effectués sur les systèmes avant le C'Space, notamment tester l'inflamateur avec un fusible retirable. Il faudrait avoir plus de pièces critiques de rechange, comme des servomoteurs.

Une observation importante, et qui a été cruciale pour le non-allumage du 2^{ème} étage lors du vol actif, est liée au rapport poussée/masse : le moteur Pandora ne pousse pas beaucoup par rapport à la masse de BiBi. Cela implique que la fusée penche plus vite et risque de sortir de la fenêtre d'attitude autorisée pour l'allumage de l'étage supérieur. Comme la fusée va moins vite, les ailerons ont aussi moins d'effet. Il est donc préférable d'avoir des conditions météo très calmes.

VII. Conclusion

Bien que le deuxième étage ne se soit pas rallumé lors du vol de notre fusée, nous considérons ce projet comme une véritable réussite. Nous avons su concevoir un système de séparation fiable ainsi qu'une avionique pleinement fonctionnelle. Ce travail nous a permis d'acquérir de nombreuses compétences nouvelles et de progresser collectivement. Nous avons eu l'honneur de recevoir, de la part du CNES et de Planète Sciences, le prix de la meilleure Minifusée lors du gala du C'Space 2025, ce qui a rendu cette aventure encore plus marquante.

Pour conclure, voici une petite citation : « Pour BiBi, HIP HIP HIP... YOURA » - Thierry

Annexes

