
Dossier post-vol SIRIUS α et β

Pôle Espace du Cercle Aéronautique de CentraleSupélec

2023/2024



Equipe Mécanique :

Nicolas QUIOT, Julien BOUVIER, Altaïr CAMBON, Timothée REISENTHIEL, Inès de MARESCHAL,
Hadrien HENRIOT, Oscar BOUSSEL, Emilie PETERSCHMITT, Henri BRASSEUR, Baptiste
PARIOLLEAU, Bastien JACQUES, Jean CHOPPIN DE JANVRY, Thomas GAMELIN

Equipe Electronique :

Robin CURINIER, Antoine FAU, Malek WALLIER, Emily LAM, Louis HORAK, Matthieu PRIGENT,
Thibault MEMHELD

Software :

Thomas ACHARD, Lorie TURCO, Fabian ARFIRE

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Cadre du Projet	1
1.2	Présentation des équipes	1
1.3	Organisation du projet	1
1.4	Partenaires et financement	1
1.5	Motivations et Enjeux	2
1.5.1	Pourquoi une fusée double étage ?	2
1.5.2	Expériences embarquées	2
2	Structure Mécanique	3
2.1	Organisation des sous-équipes	3
2.2	Architecture générale	3
2.2.1	Stabilité et Trajectographie	3
2.2.2	Etage Alpha	4
2.2.3	Etage Beta	5
2.3	Système de séparation	6
2.4	Systèmes d'ouverture des portes parachutes	7
2.5	Parachutes	7
2.6	Coiffe	11
2.7	Dimensionnement et Fabrication des Tubes en Carbone	12
2.7.1	Choix du matériau et analyse des contraintes	12
2.7.2	Tests et mise en place d'un protocole	12
2.7.3	Tubes finaux	14
2.8	Intégration mécanique	15
2.8.1	Usinage des tubes	15
2.8.2	Test de flèche	17
2.9	Bagues	18
3	Architecture électrique	21
3.1	Informations générales sur les cartes	21
3.2	Carte Séquenceur	21
3.3	Carte Alimentation	22
3.4	Carte Expérience	22
3.5	Carte Inflammateur	22
3.6	Carte Informations	22
3.7	Intégration de l'électronique dans la fusée	22
3.8	Organisation interne de l'équipe électronique	23
4	Software	25
4.1	Présentation du soft de SIRIUS	25
4.1.1	Architecture globale	25
4.1.2	Algorithme de navigation inertielle	26
4.1.3	Intégration des outils de développement logiciel et structure	28
4.2	Analyse des données de vol	32
4.2.1	Capteurs	32
4.2.2	IMUs	33
4.2.3	Analyse de la défaillance moteur	36

Chapitre 1

Introduction

La fusée SIRIUS est une fusée expérimentale (FusEx) réalisée dans le cadre du concours C'Space organisé par Planète Sciences pour la campagne de lancement de juillet 2024. Elle fait aussi partie du pôle projet 'Véhicules intelligents' dans le cadre du cursus de première année de Centrale Supélec. Cette fusée a pour principale caractéristique de posséder deux étages dont le second doit mettre en oeuvre un allumage du deuxième moteur.

Malheureusement, les difficultés à valider l'un des contrôles nécessaires à l'autorisation de vol nous ont conduits à ne lancer que le deuxième étage de SIRIUS. Cela reste toutefois très instructif quand au fonctionnement de la fusée biétage car le deuxième étage contenait la plupart des systèmes critiques pour un vol biétage actif.

1.1 Cadre du Projet

Le projet SIRIUS est d'abord associatif. Il fait partie du pôle Espace du CACS (Cercle Aéronautique de CentraleSupélec) et fait intervenir des étudiants volontaires. Il a ensuite été intégré au pôle projet 'Véhicules intelligents' dans le cadre des cours de CentraleSupélec.

Le pôle a déjà participé aux deux dernières éditions des campagnes de lancement C'Space : en 2022 avec AJACS et en 2023 avec la fusée supersonique PHENICS.

Dans le cadre du C'Space, Planète Sciences fournit un vaste cahier des charges[2] qu'il faut intégralement respecter pour être ensuite autorisé à lancer. L'analyse de ce cahier des charges[2] a été le premier travail réalisé par l'ensemble de l'équipe, qui a ensuite permis de développer les systèmes conformément à ce dernier.

1.2 Présentation des équipes

L'équipe est formée de 25 membres dont 12 font partie du pôle projet 'Véhicules intelligents'. Elle regroupe des étudiants de deuxième année ayant participé à la fabrication de la fusée PHENICS en 2022/2023, ainsi que des étudiants en première année. Le projet SIRIUS est découpé en trois équipes :

- L'équipe **Mécanique** responsable de l'étude de la stabilité, de trajectoire, du dimensionnement de la fusée, de la réalisation d'un jumeau numérique sur SolidWorks, des simulations et enfin de la fabrication des pièces mécaniques et sous-systèmes.
- L'équipe **Electronique** responsable de la conception, fabrication et intégration des cartes électroniques nécessaires aux expériences et à la commande de la fusée.
- L'équipe **Software** qui s'occupe de la programmation du stack électronique : programmation des expériences embarquées, de la trajectographie ainsi que du traitement des données récupérées en vol.

1.3 Organisation du projet

Le chef de projet coordonne les équipes et supervise les interactions avec Planète Sciences. Chaque équipe technique est supervisée par un responsable technique. Le rôle des "Respos" est de veiller à la bonne répartition des tâches et d'assurer la communication entre les équipes. Ils sont également responsables du respect des dates butoirs imposées par le rétroplanning.

Les membres des équipes techniques sont répartis volontairement sur des tâches techniques en sous équipes, qui évoluent au fil du projet. En parallèle de l'avancement du projet, des séances de formation (usinage, soudure...) sont organisées pour développer les savoir-faire techniques des membres.

1.4 Partenaires et financement

Le financement du projet est principalement assuré par le partenariat avec *ArianeGroup*. *ArcheryConsulting* soutient aussi financièrement le projet de cette année. Nous sommes également à la recherche de nouveaux sponsors pour financer ou nous aider techniquement sur de futurs projets portés par le pôle. Nous avons également bénéficié du soutien financier et technique du pôle projet

'Véhicules intelligents'.

CentraleSupélec met à notre disposition un atelier appelé *La Fabrique*. Le parc machine (qui s'étend de l'imprimante 3D à la découpeuse jet d'eau en passant par des découpeuses lasers et des fraiseuses à commande numérique), nous permet de réaliser la plupart des pièces mécaniques et d'assembler les circuits électroniques nécessaires. Nous bénéficions aussi de l'aide de professeurs formés à l'utilisation de ces machines et à la fabrication de divers produits.

1.5 Motivations et Enjeux

SIRIUS est la première fusée double étage réalisée par le pôle et constitue un défi de taille tant sur le plan technique qu'organisationnel.

1.5.1 Pourquoi une fusée double étage ?

Dans l'industrie spatiale, cette technologie est présente dans toutes les fusées commerciales. Ce projet correspond ainsi aux enjeux techniques actuels du secteur spatial.

Par ailleurs réussir une séparation en vol est un challenge très ambitieux sur le plan technique : aucune équipe au C'Space n'a réussi de lancement nominal (c'est à dire avec deux moteurs actifs au cours du vol) depuis 8 ans. Ce projet est donc un excellent moyen pour le pôle de monter en compétences techniques mais aussi en capacité de gestion d'équipe. En effet cette année l'équipe est particulièrement grande avec près de 25 membres qu'ils faut coordonner sur des tâches parfois très différentes en un temps assez restreint chaque semaine.

1.5.2 Expériences embarquées

Les expériences embarquées cette année sont au nombre de cinq. Forts des expériences de gestion de gyromètres et d'accéléromètres des deux années précédentes au sein de l'association, nous renouvelons celles-ci au sein du deuxième étage de la fusée, afin de non seulement affiner nos techniques de traitement de données en temps réel, mais également de confirmer la trajectoire de la fusée pour l'allumage du deuxième étage. Nous avons également embarqué deux microphones en stéréo, expérience héritée de l'année dernière, mais n'ayant pas fonctionné complètement. De cette manière, nous pourrions retracer la chronologie de vol à l'aide du son, et tirer des données supplémentaires en post-traitant la bande-son. Finalement, SIRIUS embarque aussi des caméras : trois caméras sont positionnées à une même hauteur afin d'obtenir une image à 360°. Des études pourraient alors être menées sur la correction des données vidéo (par exemple, stabilisation des caméras par compensation du roulis ...) et des données à en tirer. Les méthodes de localisation de notre fusée sont fondées sur l'utilisation d'un GPS, d'un buzzer, d'un module GSM et de télémétrie. Effectuer une vérification croisée des différentes méthodes de recherche de la fusée était également un objet de notre projet.

Chapitre 2

Structure Mécanique

Le projet SIRIUS est une fusée double étage de diamètre constant, à 144mm extérieur et 140mm intérieur. La fusée fait une hauteur de 3011 mm entre le haut de la coiffe et la base où est placée le moteur du premier étage. Le diamètre reste constant entre les deux étages. Les caractéristiques de chaque étage sont :

- **Alpha**, l'étage inférieur ou booster, possède un moteur Pro75[3]. Il est plus petit, et contient moins d'expériences.
- **Beta**, l'étage supérieur, possède un Pro54[3] (moteur plus faible que le Pro75). La plupart des expériences sont intégrées dans cet étage.

2.1 Organisation des sous-équipes

Le pôle mécanique est divisé en sous équipes qui travaillent sur les différents systèmes et sous-systèmes mécaniques. Les tâches sont bien sûr amenées à évoluer au cours de l'année et dépendent souvent les unes des autres. La communication au sein du pôle est donc essentielle et passe par des réunions d'avancement fréquentes (toutes les 2 semaines) et par le travail du responsable mécanique qui fait en sorte de coordonner les efforts de l'équipe.

Plusieurs petites équipes ont ainsi été formées au cours de l'année :

- Une équipe **Tube** chargée d'expérimenter sur la fibre de carbone et de développer des protocoles
- Une équipe **Ailerons** chargée d'étudier la possibilité de réalisation d'ailerons en carbone
- Une équipe **Ouverture Porte** chargée de concevoir et fabriquer les mécanismes d'ouverture des portes parachutes
- Une équipe **Parachute** chargée de dimensionner et de fabriquer les parachutes
- Une équipe **Intégration** chargée de l'intégration au sein des tubes des éléments réalisés par les autres équipes
- Une équipe **Séparation** dont la tâche est de développer le système de séparation pneumatique.
- Plusieurs tâches individuelles pour la conception des différentes bagues

2.2 Architecture générale

SIRIUS est une fusée composée de 2 étages reliés par un système de séparation. Chaque étage est équipé d'un moteur, d'une bague de reprise de poussée, et de 2 bagues de guidage, réalisées en Aluminium et usinées au tour à métaux et à l'aide d'une découpeuse jet d'eau. Les ailerons seront réalisés en carbone. Dans chaque étage, on retrouve également un parachute, un système d'ouverture porte, et un stack élec.

2.2.1 Stabilité et Trajectographie

Les équipes du C'Space imposent de nombreuses contraintes pour opérer le lancement des fusées expérimentales. Nous devons ainsi démontrer que notre fusée complète et l'étage Béta seul, sont stables. Pour le vérifier, le CNES met à notre disposition un modèle Excel "Stabtraj" qui simule tous les paramètres de trajectoire, d'altitude, et de comportement au cours du vol. Pour s'assurer de la stabilité, deux éléments sont à considérer :

- les ailerons dont la forme et les caractéristiques influent sur la portance de l'engin.
- la distance entre le centre de masse et le centre de poussée de la fusée (aussi appelé marge statique) : en calculant la masse et la position de chaque sous-système, nous avons estimé la position de ce centre de masse sur notre jumeau numérique. Afin d'adapter cette position, on peut rajouter de la masse dans la coiffe. En effet, plus la masse est positionnée loin du centre

de gravité, plus le bras de levier est grand et plus l'influence est importante. Nous avons ainsi prévu de placer entre 3 et 6 kg de masse dans la coiffe. Le matériau choisi est le laiton car c'est le métal avec la masse volumique la plus grande que nous avons à disposition tout en restant accessible du point de vue du coût et utilisable sans protection particulière. Ce procédé est itératif et nécessite de nombreux allers et retours entre le jumeau numérique, les sous-systèmes et le stabtraj.

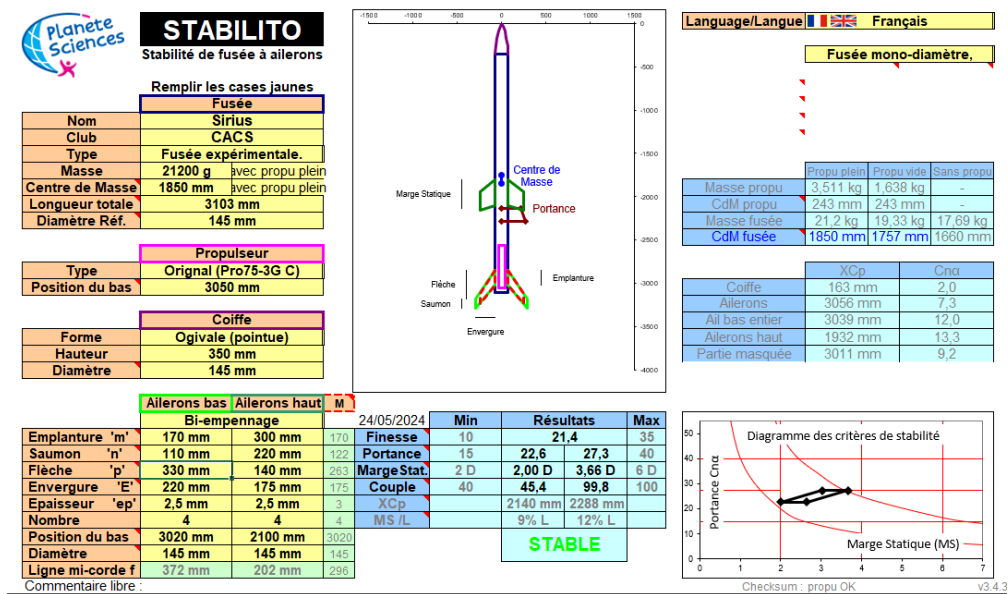


FIGURE 2.1 – Interface du stabtraj utilisé pour la première partie du vol (Alpha + Beta). L'entiereté de l'interface a été fournie par Planètes Sciences.

Le 'StabTraj' fourni aussi des données essentielles en matière de trajectographie et de déroulé du vol. Ainsi la vitesse en sortie de rampe, la vitesse de chute sous parachute en fonction des caractéristiques de ce dernier, la parabole théorique du vol sont fournies par le programme. Toutes ces données nous permettent de dimensionner certains sous-systèmes (parachutes, patins et de façon plus générale taille et masse de la fusée). Pour la temporalité, nous avons pour l'instant prévu de faire la séparation environ 6 secondes après le décollage, le moteur de Alpha aura fini sa phase de poussée et la fusée aura une attitude correcte.

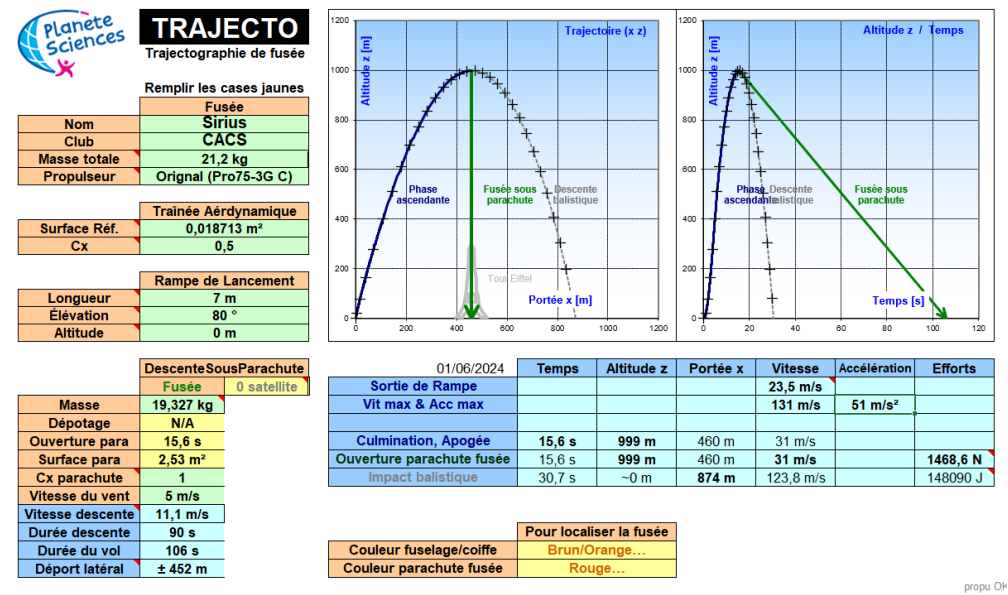


FIGURE 2.2 – Trajectographie fournie par l'interface StabTraj pour l'étage Bêta seul (d'où un apogée relativement basse).

2.2.2 Etage Alpha

L'étage du bas (le premier étage de la fusée) est nommé Alpha. C'est le plus petit des deux (1 m de long). Equipé de son moteur Pro 75-3G fourni par le CNES, il assure la première phase de l'ascension de la fusée.

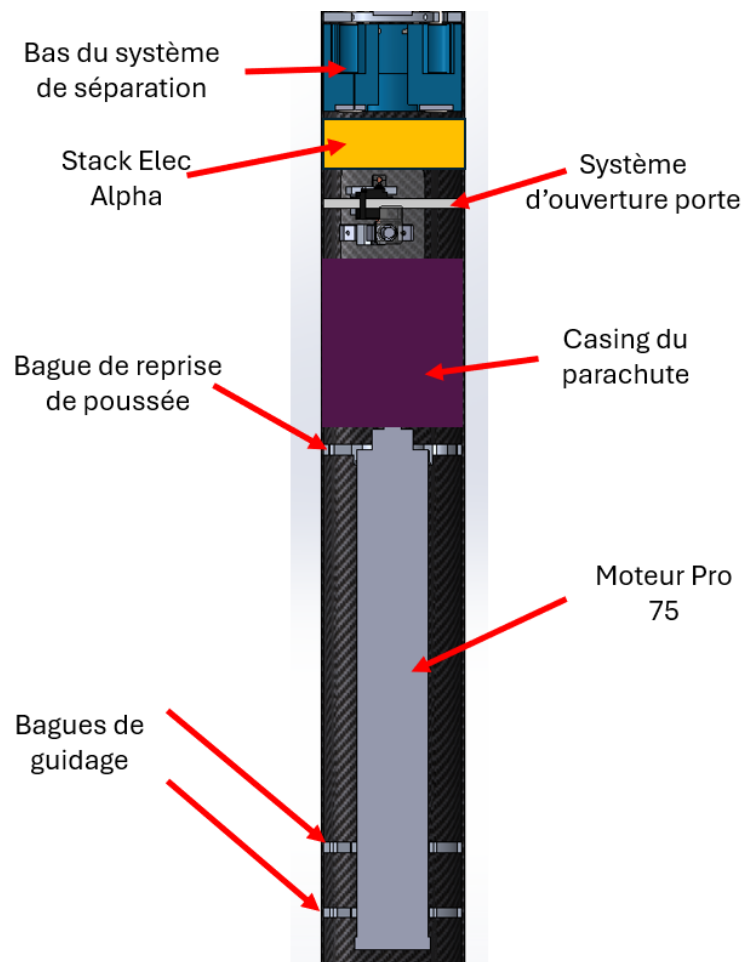


FIGURE 2.3 – Schéma de la répartition des divers sous systèmes au sein du premier étage de la fusée. Les vues utilisées sont des coupes réalisées sur le jumeau numérique de la fusée (SolidWorks). Ce schéma est simplifié de façon à donner une idée globale de la structure interne.

2.2.3 Etage Beta

Beta est le deuxième étage de la fusée (1.75 m de long sans la coiffe, 3.10 m avec). Il est doté d'un moteur Pro54 qui prend le relai du Pro 75-3G après la séparation effective des deux étages (voir section Système de Séparation).

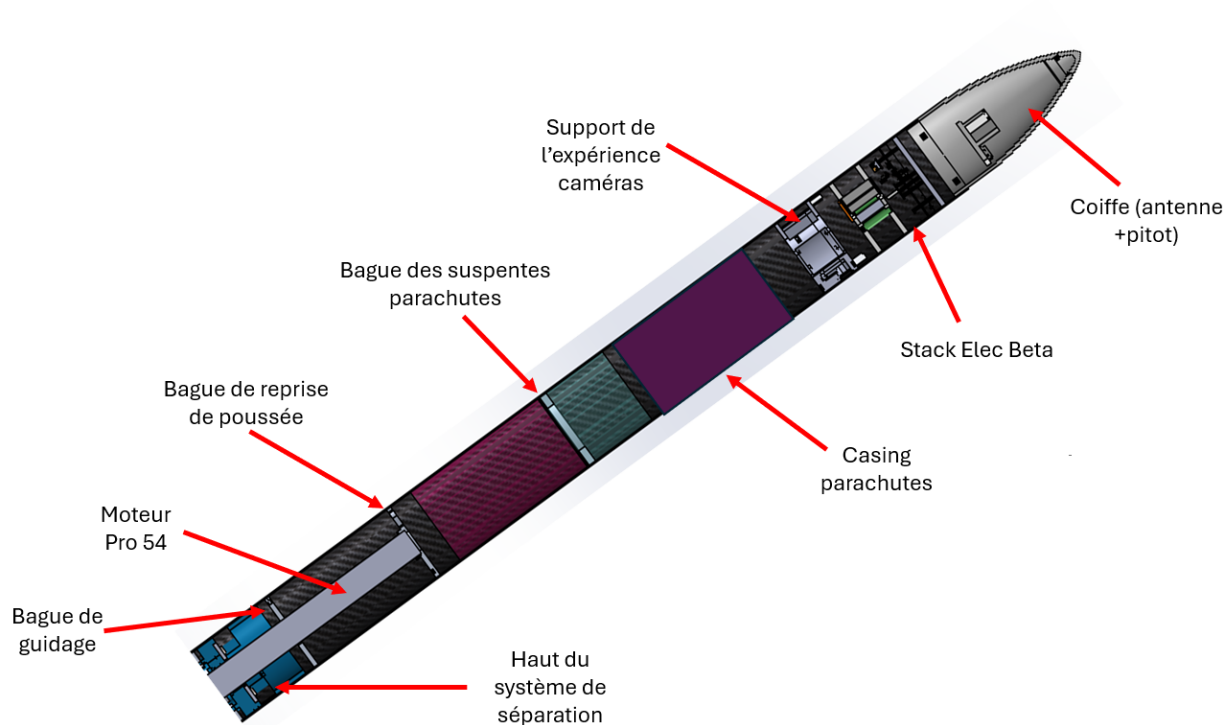


FIGURE 2.4 – Schéma de la répartition des sous-systèmes au sein du deuxième étage de la fusée. Ce schéma est résumé et ne donne qu'un aperçu global de la structure interne de la fusée. Il provient d'une vue en coupe Solidworks

2.3 Système de séparation

Le principal défi technologique d'un lanceur bi-étage comme le nôtre réside dans la liaison mécanique entre les deux étages. Pour des lanceurs industriels, les systèmes de séparation mis en œuvre ont pour fonction de détruire la liaison encastrement qui maintient les deux étages. Ces systèmes utilisent principalement des méthodes chaudes comme la pyrotechnie, mais notre cahier des charges[1] nous interdit l'utilisation de tels systèmes.

Le défi pour SIRIUS est alors de mettre en œuvre une liaison encastrement démontable électriquement entre les deux étages. Les solutions technologiques retenues étaient alors de placer le système dans l'étage supérieur principalement, notamment pour des raisons d'encombrement dans l'étage Alpha. Les principales contraintes techniques étaient :

- L'intégration du système avec la présence du moteur
- La tenue mécanique de la liaison encastrement, notamment la flèche entre les deux étages
- Une séparation fiable et rapide des deux étages

Le système de séparation se compose de trois actionneurs pneumatiques (vérins doubles effets) ainsi que d'un système de distribution associé. Le système inclut également un système de guidage glissière réalisé au moyen de palier à billes et permettant de garantir la rectitude de la liaison.

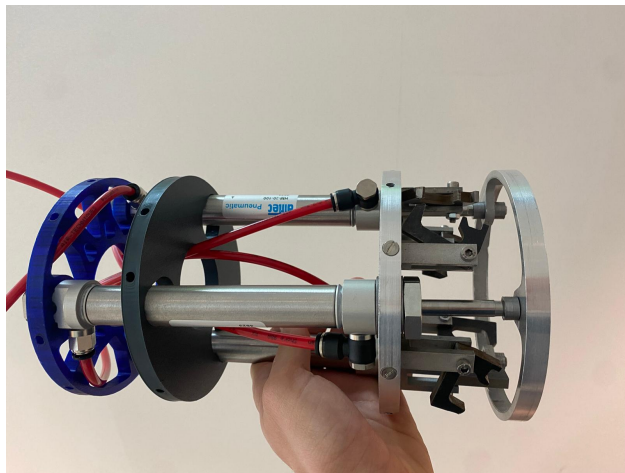


FIGURE 2.5 – Système de séparation pneumatique

Cette solution technologique a été retenue en raison de la fiabilité de ses composants (nos composants pneumatiques sont fabriqués par un industriel français), et par la mutualisation des actions qu'elle permet. En effet, le même système permet la liaison encastrement ainsi que la séparation des étages.



FIGURE 2.6 – Montage du système de séparation

2.4 Systèmes d'ouverture des portes parachutes

Pour chacune des deux portes, les architectures du système d'ouverture sont similaires. La porte est fixée en bas sur le support corde par deux crochets qui jouent le rôle de liaison pivot lors de l'ouverture de la porte et la retiennent pendant la phase active.

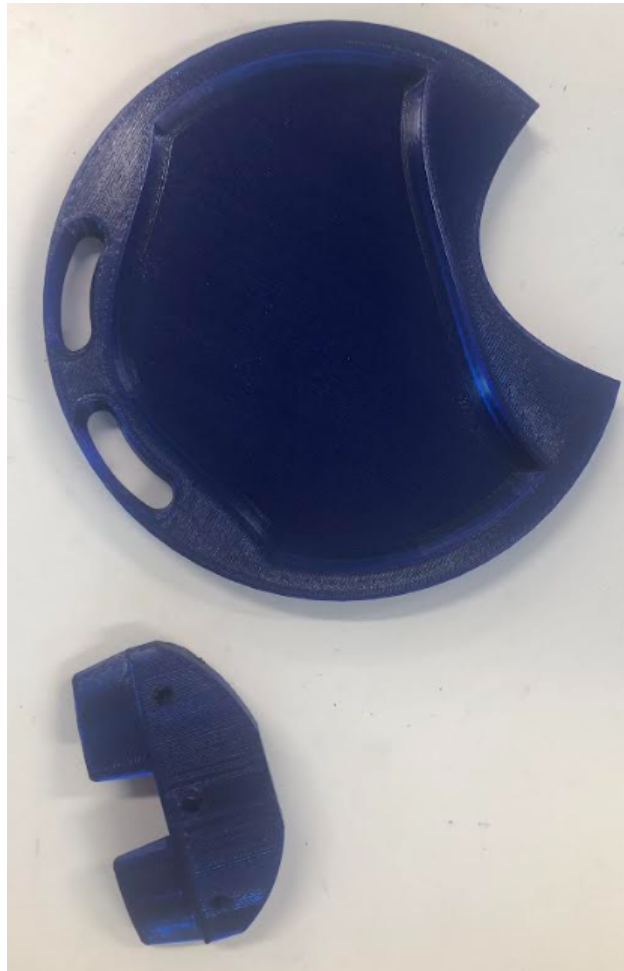


FIGURE 2.7 – système d'attache inférieur de la porte : support corde avec le crochet

Au sommet de la porte, est fixée une attache qui permet son verrouillage avec le corps de la fusée via un mécanisme dans le tube qui diffère pour les deux étages mais qui s'appuie sur le principe du bélier : un ressort est maintenu en compression jusqu'à ouverture. Une fois la porte entrouverte, les effets dynamique de traînées assurent l'ouverture complète du parachute. Une corde relie la porte au corps de la fusée pour assurer sa récupération pour le deuxième lancement et ne pas relâcher un déchet, ce qui est interdit par le cahier des charges[1].

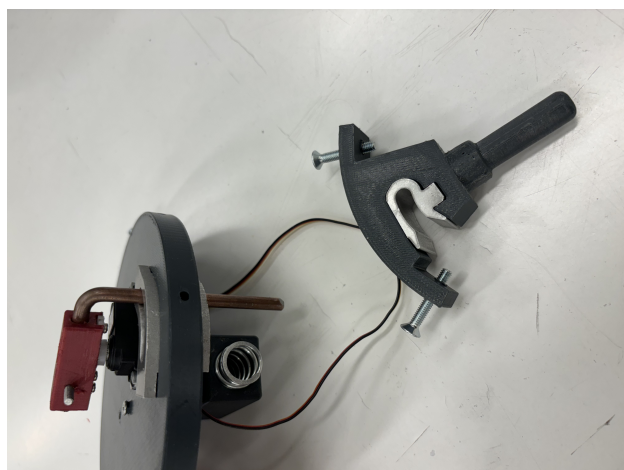


FIGURE 2.8 – Ouverture porte Alpha

2.5 Parachutes

Chaque étage a besoin de son propre parachute pour pouvoir redescendre à vitesse contrôlée. Le C'Space impose en effet une vitesse de descente comprise entre 5 et 15 m/s pour chaque étage. Grâce au logiciel stabtraj, en paramétrant la masse de la fusée, la forme et les dimensions

des parachutes ainsi que l'instant d'ouverture porte, ce logiciel nous calcule la vitesse finale, ainsi que les efforts exercés sur les parachutes. Deux situations sont à considérer :

- dans le cas d'un vol nominal, la séparation est faite et chaque étage descend sous son parachute.
- dans le cas d'un vol dégradé où la séparation n'a pas eu lieu, seul le parachute de Beta doit s'ouvrir. Il doit alors permettre la redescente de la fusée (les deux étages accrochés) en respectant le cahier des charges[1] notamment les vitesses de descente.

On souhaite également repérer la fusée lorsqu'elle descend pour pouvoir la récupérer une fois qu'elle a atterri. Nous avons donc choisi des couleurs voyantes pour les toiles (orange pour Beta, le deuxième étage et rose pour Alpha le premier étage) qui ne se confondent pas avec la couleur du ciel, des nuages ou celle des feuilles / arbres.

Ainsi, une fois la commande des toiles faites, l'étape de couture a pu commencer. La forme générale des parachutes est un dôme circulaire avec une cheminée en son centre qui permettra d'évacuer l'air lors de la descente. Nous avons tout d'abord découpé les deux toiles en forme de "pétales" au nombre de huit afin d'optimiser la quantité de tissu utilisée au moment de la découpe. Cette étape terminée, nous avons travaillé avec la machine à coudre de La Fabrique pour assembler les différentes pièces de tissus entre elles. Des biais ont été cousus entre les pétales pour renforcer les liaisons.

Une des étapes importantes dans la fabrication du parachute fut le choix des cordes. En effet, deux types de cordes permettent de relier la toile à la fusée : la corde principale ainsi que les suspentes qui sont au nombre de huit pour chaque parachute. Le corde principale est celle reliée à la fusée : sa première extrémité est attachée à la fusée, l'autre à un émerillon. Ce même émerillon attache les huit suspentes qui ont leur autre extrémité reliée à la toile du parachute. Un petit anneau avec 8 trous sera inséré sur les suspentes : il leur permet de mieux "couliser" lors du déploiement du parachute et d'éviter les noeuds. Il a été modélisé sur SolidWorks et imprimé à l'aide d'imprimante 3D. Au moment du "choc para", instant de libération du parachute, les cordes devront supporter des efforts importants pour assurer la descente des étages.

Les tensions maximales pouvant s'appliquer au moment du "choc para" sont :

- Pour Alpha : $T = 1471 \text{ N}$
- Pour Beta : $T = 3434 \text{ N}$
- Pour Alpha + Beta : $T = 3621 \text{ N}$

Ainsi, connaissant ces trois valeurs, nous avons pu choisir le diamètre des cordes qui constitueront le parachute :

- Pour Alpha : la corde principale a un diamètre de 5mm, les suspentes 4mm
- Pour Beta : la corde principale a un diamètre de 6mm, les suspentes 5mm

De même, l'émerillon doit aussi supporter une certaine force lors du "choc para" :

- Pour Alpha : effort de 507 N
- Pour Beta : effort de 1690 N
- Pour Alpha + Beta : effort de 1597 N

Ainsi, avec une marge de sécurité, nous avons décidé de prendre deux émerillons ayant chacun une résistance de 450 kg.

Un casing para a également été modélisé sur SolidWorks puis imprimé en 3D. Sa mission est de loger le parachute et de favoriser sa sortie du tube une fois la porte ouverte. Pour cela, le support est en pente vers la porte.

Pour l'étage Beta, la carte pyro ainsi que plusieurs fils électriques passent à l'arrière du casing, une porte a donc été créée dans la pièce pour accéder à ces composants lors du montage. Celle-ci est amovible et peut être dévissée pour accéder à l'élec.

Au vu des forces qui s'exercent à l'instant du déploiement du parachute, les cordes vont exercer une très forte pression sur cette pièce. Une tige métallique de 4mm de diamètre en acier sera ajoutée à l'intérieur pour renforcer la pièce et éviter une rupture.

Le casing para pour Alpha prend quand à lui tout le diamètre.

La corde principale est fixée à une bague en acier située entre le casing para et le support corde. Celle ci doit donc supporter le choc para tout en étant la plus légère possible notamment à l'étage Alpha où les contraintes sont plus importantes.



FIGURE 2.9 – Anneaux (en haut) et émérillons (en bas) des parachutes. Les deux émérillons sont les mêmes pour les deux parachutes. En revanche, l’anneau de Beta a un diamètre plus important (puisque les suspentes ont un diamètre plus grand).

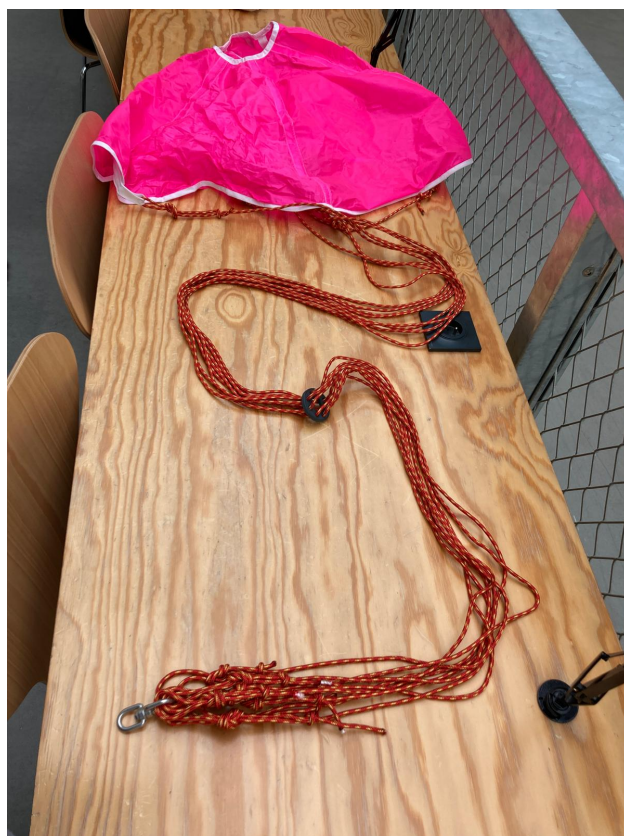


FIGURE 2.10 – Parachute d’Alpha (toile, suspentes, anneau, émérillon) auquel il ne manque que la corde principale.



FIGURE 2.11 – Demi-toile de la toile du parachute de bêta. Cet angle met en évidence l'utilisation des biais (bandes blanches) entre les pétales pour venir renforcer les coutures.



FIGURE 2.12 – Support parachute bêta avec porte d'accès à l'élec

2.6 Coiffe

La coiffe est l'élément situé au sommet de la fusée. Imprimé en 3D en plastique PETG ses fonctions sont multiples.

Elle doit tout d'abord assurer l'aérodynamisme de la fusée. Volant en vitesse subsonique, la coiffe doit limiter les angles et privilégier les formes courbes.

Mesurant près de 35 cm, elle a dû être imprimée en trois parties car les imprimantes MK4 de la Fabrique ne peuvent pas imprimer des objets de plus de 22cm de haut.

A son sommet un tube pitot sera installé pour pouvoir mesurer la vitesse de la fusée, cette position est en effet la seule permet de conserver la symétrie de révolution de la fusée, condition essentielle pour garantir un vol rectiligne.

L'intégration de composants électroniques a également été nécessaire. Des antennes GPS, GSM et Lora sont fixés sur la paroi intérieure de la coiffe. En effet, étant imprimé en plastique les ondes radio ne sont pas bloquées par les parois de la coiffe contrairement au tube en carbone qui lui agit comme une 'cage' électromagnétique. Outre les antennes, des fixations pour leurs cartes électroniques ont été prévus.

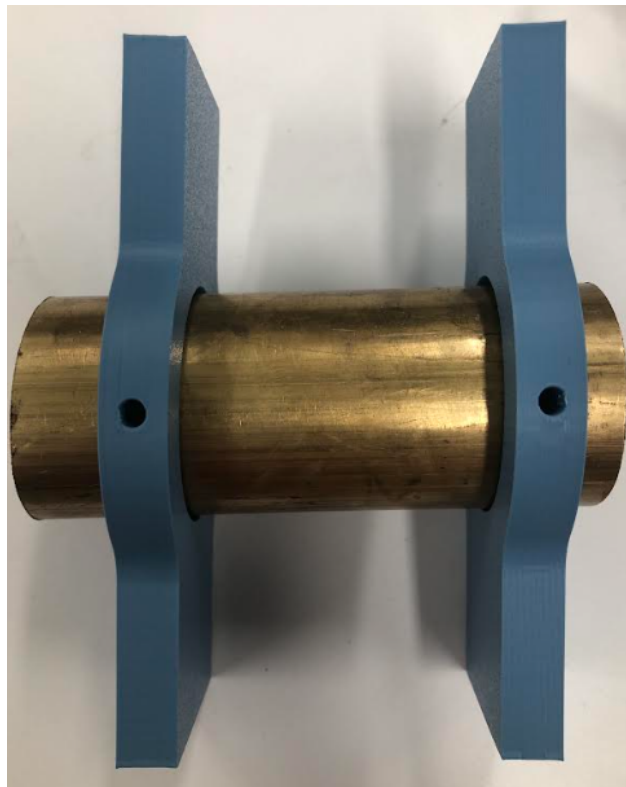


FIGURE 2.13 – système de fixation du laiton

Par ailleurs, au vu de son grand volume intérieur libre et de la nécessité d'assurer la stabilité de la fusée, une masse adaptable sera fixée dans la coiffe. Le cylindre de laiton de 4cm de diamètre est tenu par deux bagues fixées à la coiffe dans sa partie basse. Une fois au Cspace nous pourrons adapter la masse à embarquer selon le vol et les résultats de mesure du centre de gravité. Il faut cependant éviter que cet ajout de métal proche des antennes ne viennent perturber l'émission et la réception des ondes.



FIGURE 2.14 – assemblage des 3 parties de la coiffe

2.7 Dimensionnement et Fabrication des Tubes en Carbone

Les tubes des deux étages sont des éléments clés du projet. Le bon déroulement de leur fabrication est un facteur bloquant pour de nombreuses tâches mécaniques et nécessite donc une attention particulière ainsi que de nombreuses itérations.

Pour SIRIUS, les deux tubes (140mm de diamètre intérieur, 1m de long pour Alpha, 1m75 pour Beta) sont moulés par les membres du projet dans les locaux de La Fabrique de CentraleSupélec.

2.7.1 Choix du matériau et analyse des contraintes

La fibre de carbone présente des qualités intéressantes dans le cadre de la réalisation d'une fusée : c'est un matériau léger et extrêmement résistant aux efforts de traction qui permet de limiter l'épaisseur des tubes de la fusée. De plus le pôle Espace du CACS a une certaine expérience avec le moulage de tubes en fibre de carbone puisque les deux précédentes éditions (PHENICS et AJAX) avaient elles aussi des tubes en carbone.

L'épaisseur du tube a été déterminée grâce à des analyses réalisées sous Comsol. Ces dernières permettent de simuler d'analyser les contraintes que vont subir les deux tubes et de déduire une épaisseur acceptable de ce dernier (ici 1.5 mm suffisent). L'analyse tient aussi compte des points de faiblesse que représentent les portes parachutes et les perçages nécessaires aux différentes bagues, autour desquels les contraintes sont plus importantes.

2.7.2 Tests et mise en place d'un protocole

De nombreux tests de moulage de la fibre carbone ont été réalisés afin de déterminer le meilleur moyen de mouler puis de démouler les tubes. Le principe est relativement simple et consiste à enrouler la fibre de carbone (qui se présente sous la forme de grandes feuilles souples) autour d'un tube en PVC. Le tout est enduit de résine époxy à chaque couche.

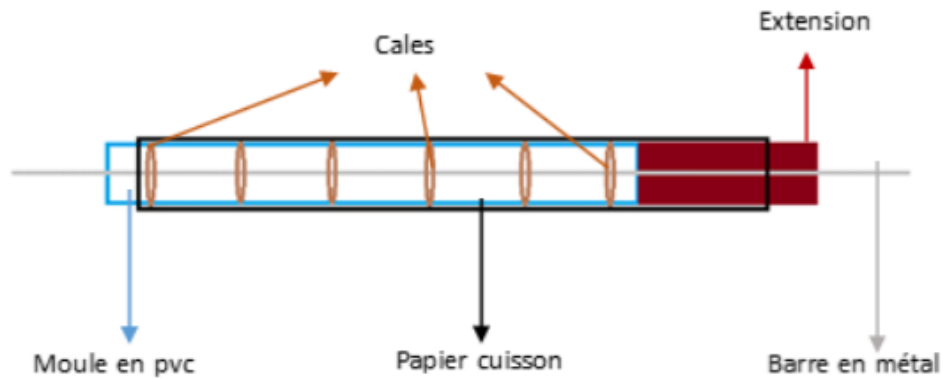


FIGURE 2.15 – Représentation schématique du montage réalisé pour le moulage des tubes. La barre en métal est un profilé sur lequel viennent glisser des cales permettant de fixer le moule en PVC. Les rôles de l'extension et du papier cuisson seront détaillé plus loin. L'ensemble du montage est maintenu en hauteur grâce à deux tréteaux sur lesquels sont posés les bords du profilé en aluminium

Les défis présentés par la méthode sont nombreux :

- Les feuilles de carbone ont tendance à s'abîmer ou à se détendre ce qui crée des imperfections sur le tube
- Une fois secs les tubes sont extrêmement difficiles (voir impossibles) à démouler (frottements avec le moule en PVC qui sont insurmontables du fait de la surface de contact bien plus grande que les années précédentes)

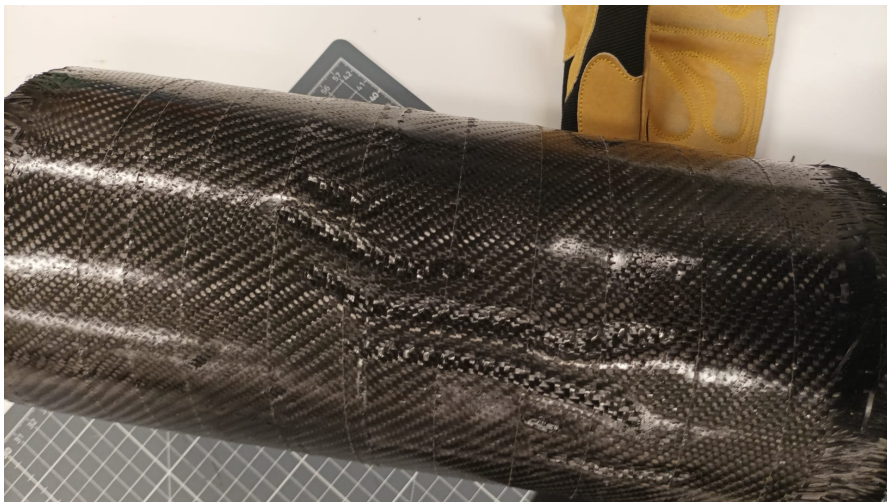


FIGURE 2.16 – Défauts observés lors d'un test de fabrication : les fibres se sont détendues au cours de la manipulation ce qui provoque ces importants défauts de surface

Pour palier à ces problèmes de nouveaux protocoles ont été développés au cours des différents tests réalisés :

- La fibre de carbone est tendue à l'aide d'une barre en bois accroché à l'extrémité des feuilles à enrouler : cela permet de garder la fibre sous tension en permanence et d'obtenir un rendu plus propre (avec un nombre de défauts de surface nettement réduit).
- Pour le démoulage diverses solutions ont été envisagées. La première est de déposer une couche de graisse autour du moule en PVC pour faciliter l'extraction. Suite à l'échec de cette méthode (le carbone a tendance à absorber la graisse ce qui neutralise tout effet positif), la réalisation d'une 'chaussette' à l'aide de papier cuisson (silicone) s'est avérée être une méthode satisfaisante. Une extension en plastique (imprimée sur imprimante 3D) a aussi été conçue pour s'emboîter à l'extrémité du moule en PVC et être enlevée très facilement une fois le tube sec : ceci permet ensuite de trouser l'extrémité en Carbone démoulé pour y faire passer des cordes (très utiles pour tirer sans déformer le tube).
- Afin de faciliter encore un peu plus le démoulage, les tubes sont moulés en deux fois. Les trois premiers tours de fibre de carbone sont enroulés puis démoulés en l'espace de 24h. Les trois dernières couches sont réalisées directement sur le tube démoulé. Cette méthode permet de réduire la difficulté du démoulage.

2.7.3 Tubes finaux

Les deux tubes ont été moulés au cours du mois de février 2024 dans les locaux de la Fabrique.



FIGURE 2.17 – Fabrication du tube Beta : le tube moulé mesure ici 2m10 de façon à avoir suffisamment de marge pour le découper et l'usiner par la suite. Une équipe de 10 personnes a été mobilisé pour la fabrication avec des postes et des rôles bien précis assignés à chacun.

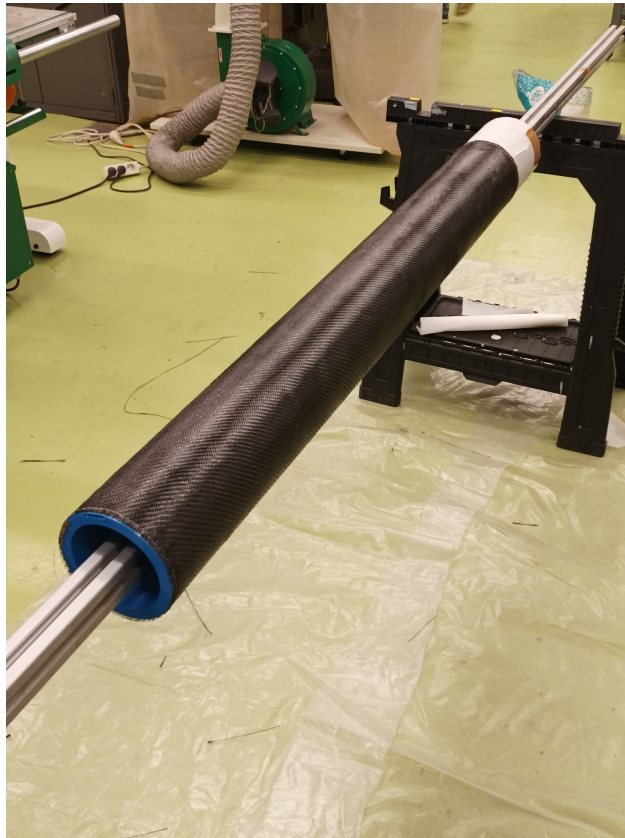


FIGURE 2.18 – Le tube de l'étage beta juste avant le démoulage : on peut voir l'extension en plastique imprimé (en bleu) ainsi que le profilé en aluminium utilisé pour maintenir les cales à l'intérieur du tube.



FIGURE 2.19 – Tentative de démoulage du tube

Malgré les méthodes mises au point pour faciliter le démoulage, celui du tube bêta a été très ardu. Afin de ne pas avoir à tirer manuellement nous avons mis au point un système permettant de mettre à profit une slackline : de longues bandes de scotch sont fixés au corps du tubes (ce qui permet de tirer de façon surfacique et d'éviter des défauts localisés) et viennent s'enrouler autour d'une pièce en métal à laquelle est fixée la slackline. L'autre extrémité du tube (en PVC) est attachée avec des serres joints à une base fixe (un pilier). La slackline nous permet de monter à des tensions avoisinant les 350 kg. La méthode a correctement fonctionné.

2.8 Intégration mécanique

2.8.1 Usinage des tubes

Une fois les tubes bruts en carbone formés, il a fallu les usiner afin de permettre, entre autres, d'intégrer les bagues dans la fusée et de permettre la sortie des parachutes.

- **Ponçage des tubes** : Après la formation du tube, il reste des défauts de surface liés à des coulures d'époxy séchées ou du carbone mal replié, il faut alors les poncer pour avoir un

bel état de surface. Pour ce faire nous nous équipons pour travailler le carbone (Masque à cartouches, blouse, surblouse, gants). Il y a également des défauts internes, liés également à des coulures d'époxy, qui empêchent de glisser les bagues dans le tube, et que nous avons poncé à la main.

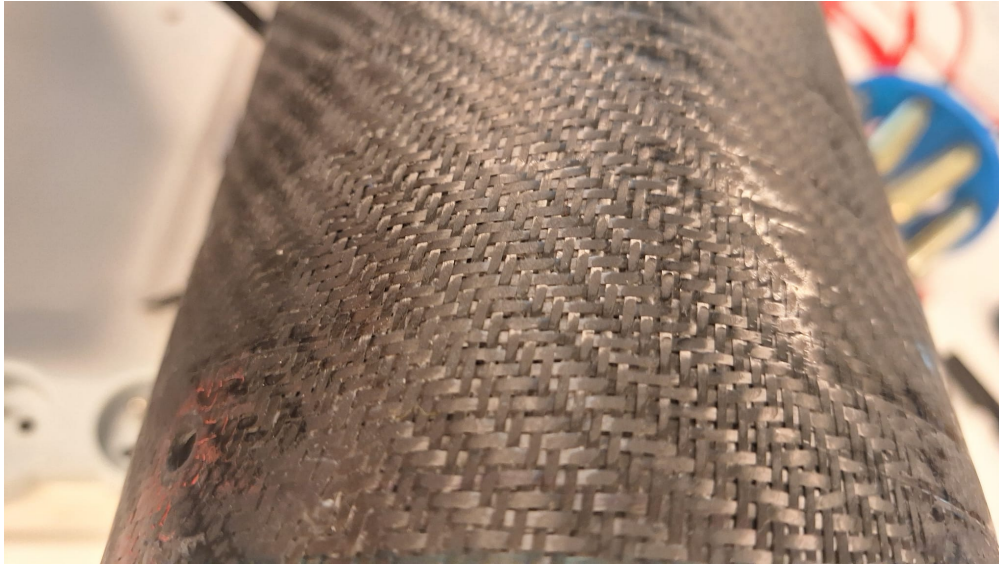


FIGURE 2.20 – Etat de surface extérieur des tubes après moulage. Le ponçage n'est ici pas vraiment nécessaire mais permet principalement d'avoir une surface correcte pour les touches de peinture finales (détails)



FIGURE 2.21 – Etat de surface intérieur des tubes après moulage. Les coulures d'époxy sont gênantes pour l'intégration des bagues à l'intérieur de la fusée, le ponçage est donc essentiel dans ce cas.

- **Découpe** : Les tubes formés sont plus grands que les tubes finaux, ce afin de ne pas avoir de défauts dus aux effets de bord lors de la fabrication du tube. Nous avons donc imprimé en 3D une bague afin de marquer les coupes que nous avons ensuite réalisées à la scie à métaux (plus adaptée pour couper de la fibre de carbone qu'une scie classique).
- **Mise au niveau** : Si les découpes étaient précises, nous avons tout de même du poncer localement les bords afin de s'assurer que les plans de coupes aient bien pour normale l'axe du tube. Pour vérifier cela nous nous sommes aidés d'un marbre (considéré comme parfaitement plan) et d'équerres.
- **Perçage des trous de bagues** : Les bagues de la fusée, véritables "étages" internes, sont fixées au tube via des vis. De par la forme des bagues, elles ne peuvent accueillir des pas de vis n'importe où. De plus et deuxième contrainte, les bagues doivent respecter un agencement précis et leur position angulaire n'est pas aléatoire car elles ne sont pas indépendantes les unes des autres. Résulte de ces deux contraintes un schéma de perçages du tube assez chaotique. Afin de réaliser ces perçages, nous nous servons de grandes feuilles de papier qui nous servent

de patrons et que l'on vient enrouler autour du tube pour marquer les perçages que l'on réalise ensuite à la perceuse à colonne.



FIGURE 2.22 – Perçages au niveau du système de séparation

- **Découpe Portes** : Afin de permettre l'éjection des parachutes, qui permettent de récupérer la fusée après le vol, il faut découper des portes dans la fusée. Nous avons imprimé en 3D deux patrons externes (rigidifiés grâce à des barres en métal) qui épousent le tube et sur lesquels nous nous sommes appuyés afin de pouvoir découper les portes de la fusée au cutter. Une fois les découpes effectuées, un ponçage des contours des découpes est nécessaire afin d'éliminer les potentielles échardes car l'équipe sera amenée à travailler sans protection au niveau des portes.



FIGURE 2.23 – Porte de Alpha

2.8.2 Test de flèche

Avant d'être autorisée à voler, la fusée doit passer une nombreuse série de tests. L'un d'entre eux est le test de flèche : la base fixée, la pointe de la fusée ne doit pas s'affaisser de plus de 3cm par rapport à l'horizontale (et ce peu importe son orientation). La qualité de bi-étages de la fusée induit une potentielle faiblesse au niveau du système de séparation. Chaque tube pris indépendamment présente une flèche plus faible que ce que nous pouvons détecter : la zone d'intérêt est donc entièrement centrée autour du système de séparation.



FIGURE 2.24 – Test de flèche réalisé pour évaluer les performances du système d’encastrement entre les deux étages (de séparation donc)

Le critère du cahier des charges impose une déviation d’au maximum 1° par rapport à l’axe du moteur. Avec les 3103mm de longueur de la fusée assemblée, cela correspond à un affaissement de presque 6cm au niveau de la coiffe. Lors des tests réalisés dans l’école, nous avons maintenu le premier étage à un bâti, puis mesuré l’affaissement de la coiffe. Nos mesures étaient légèrement inférieures à 60mm. Cependant, le protocole réalisé par les contrôleurs lors du C’Space était différent. La fusée est maintenue par un moteur, via les bagues de guidage et de poussée et la longueur prise entre la bague de reprise, et la base de la coiffe, soit environ 2.3m. Cette longueur impose alors un affaissement de 30mm maximum. Les tests dynamiques et statiques de la flèche sont les suivants :

Positionnement	Flèche statique	Flèche dynamique
<i>Patins vers le haut</i>	10 mm	+3 mm
<i>Écran vers le haut</i>	60 mm	+7 mm
<i>Patins vers le bas</i>	48 mm	+7 mm
<i>Écran vers le bas</i>	21 mm	+3 mm

Seuls deux orientations n’ont pas permis de valider la flèche statique avec ce protocole. Le critère de la flèche n’a pas pu être validé au cours du C’Space ce qui nous a conduit à ne tirer que le deuxième étage comme une fusée mono-étage.

2.9 Bagues

- Les bagues en aluminium sont des éléments clefs de la fusée qui jouent différents rôles :
- les bagues de reprise de poussée ont pour rôle de ‘caler’ les moteurs et de reprendre les efforts fournis par ces derniers. Ce sont des pièces qui doivent être robustes mais rester légères et faciles à intégrer au corps de la fusée.



FIGURE 2.25 – Bague de reprise de poussée en aluminium.

- les bagues de guidage servent à fixer les équerres des ailerons et ainsi à maintenir ces derniers. Etre précis sur leur usinage est particulièrement important afin de respecter l'alignement des ailerons.

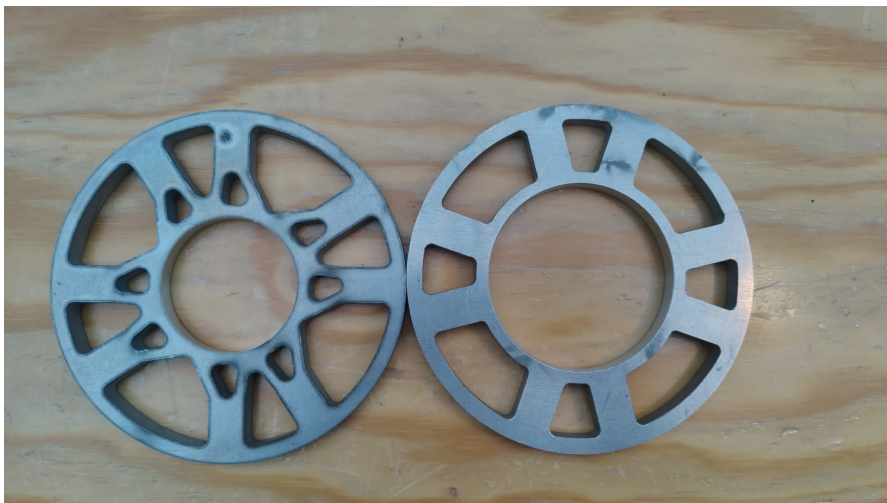


FIGURE 2.26 – Bague de guidage réalisée en aluminium. leurs structures sont étudiées pour minimiser leur masse tout en guidant correctement les vis des équerres.

Ces bagues sont entièrement usinées en utilisant les machines de La Fabrique. Ainsi les bruts d'aluminium sont d'abord découpés à la découpeuse jet d'eau puis retravaillés à l'aide des tours à métaux et d'une fraiseuse.

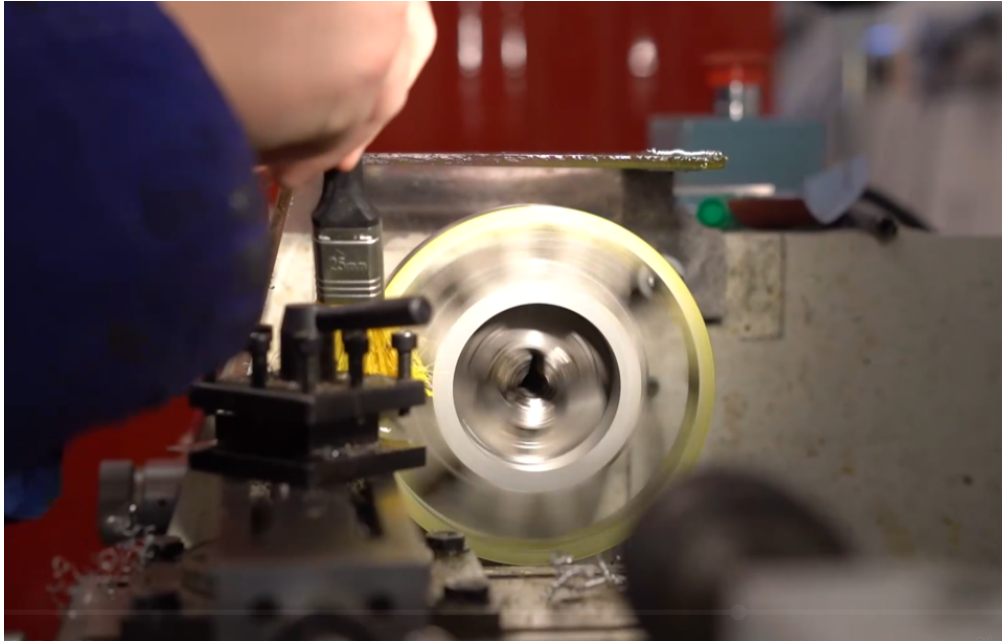


FIGURE 2.27 – Usinage en cours d’une bague de reprise de poussée au tour à métaux.

Chapitre 3

Architecture électrique

3.1 Informations générales sur les cartes

La fusée compte différentes cartes électroniques. Sur Alpha, on peut trouver les cartes : Alimentation, Information et Séquenceur. Sur Bêta, on a : Alimentation, Information, Séquenceur, Inflamateur et Expérience.

- Carte **Séquenceur** : elle commande les actionneurs de la séparation et des portes des parachutes quand toutes les conditions sont réunies.
- Carte **Alimentation** : elle permet de gérer l'alimentation de la fusée, avec notamment des convertisseurs de tension.
- Carte **Expérience** : elle contient deux IMU et récupère les informations des caméras qui se situent sur le tube de la fusée.
- Carte **Inflamateur** : elle attend les ordres de la carte Séquenceur pour allumer le moteur.
- Carte **Informations** : cette carte gère la télémétrie.



FIGURE 3.1 – Stack Bêta (à gauche), buzzer, et batteries de Bêta (à droite)

3.2 Carte Séquenceur

La carte Séquenceur est peut-être la carte la plus importante de tout Sirius. Un exemplaire est présent à chaque étage. Son architecture est relativement simple, et elle accueille une ESP32, un port pour servo-moteur, une prise jack (mâle ou femelle selon l'étage), un buzzer, et un optocoupleur. Elle gère aussi une petite carte déportée, la carte Pyro, qui comporte des LED d'affichage et des shunts.

Le choix de l'ESP32 par rapport aux Teensy présentes sur les autres cartes est simple : ses fonctionnalités suffisent très largement pour cette carte, le tout au dixième du prix d'une Teensy. La carte pilote le servomoteur des parachutes, qui permettent donc leur déploiement à l'apogée.

L'optocoupleur sert quant à lui à communiquer entre Séquenceur et Inflammateur, tout en isolant électriquement les deux cartes pour respecter le cahier des charges[1].

Les prises jack permettent de s'assurer ou non de la séparation : lorsque le deuxième étage éjecte le second, les deux connecteurs se déconnectent, et les deux cartes Séquenceur peuvent donc déclencher la suite des actions. De même, si la séparation n'est pas effective, les cartes le détectent et lancent alors une autre suite d'instructions.

Le buzzer 12V sera activé au moment de l'atterrissage : il nous permettra d'entendre au loin la fusée pour la retrouver plus rapidement.

3.3 Carte Alimentation

La carte Alimentation est la carte qui est chargée d'alimenter en énergie les différentes cartes et composants. Elle utilise des régulateurs bucks 5V soudées a même la carte (LM2596 et LM2678) pour alimenter d'une part la carte séquenceur d'autre part la carte experience et informations quand à la carte Inflammateur elle est directement alimentée par un petite batterie LiPo 3S que l'on court circuite. Les connexions entre les batteries LiPo et Li-ion se font via des connecteurs XT60. Les BMS sont déportés et sont directement placés sur les packs batterie (3S). L'alimentation vers les cartes se fait via le bus principal.

3.4 Carte Expérience

La carte Expérience intègre les composants nécessaires aux expériences. On a notamment des IMU qui nous permettent de connaître à chaque instant l'accélération de la fusée et son orientation angulaire. Ainsi on pourra retracer la trajectoire de la fusée et déterminer son orientation au moment de la séparation. Les données sont stockées sur la carte SD de la Teensy. La carte Expérience gère aussi l'allumage et l'extinction des caméras : sur le second étage, trois caméras sont réparties uniformément autour du tube, ce qui nous permet de modéliser après le vol une vidéo 3D. Une carte son sera également dans la partie supérieure du tube, directement liée à la carte Experience pour l'enregistrement des données.

3.5 Carte Inflammateur

La carte Inflammateur est relativement simple, mais cruciale pour l'allumage du deuxième moteur. Elle est composée d'une simple porte AND, qui, lorsque la batterie est sous tension et que l'ordre de mise à feu est envoyé par Séquenceur, alimente un allumeur (un simple fusible) qui s'enflamme et démarre le moteur.

3.6 Carte Informations

La carte Informations utilise une Teensy 4.1 pour le traitement des informations, et est équipée d'une carte microSD pour le stockage de données, ainsi que d'un capteur de pression, un GPS, un GSM, une LoRa et un tube Pitot.

Le GPS, le GSM et la LoRa permettront de retrouver les deux étages de la fusée après leur vol et leur séparation, et le capteur de pression permet de mesurer la pression intérieure à la fusée, qui est normalement la même que la pression extérieure car le tube est perméable. On peut ainsi obtenir une estimation de l'altitude.

On trouve également un tube Pitot dont le double capteur de pression se trouve dans la coiffe pour mesurer la vitesse dans l'air de Bêta. Cette carte est reliée à plusieurs antennes (GPS, LoRa et GSM). Les contraintes électromagnétiques sont très grandes. En effet, le tube en carbone agissant comme une cage de Faraday, on doit déporter les antennes dans la coiffe ou à l'extérieur du tube.

Des LED sont aussi présentes pour confirmer le fonctionnement de la LoRa et la possibilité de décollage si tous les systèmes ont bien répondu positivement aux tests, qui seront activés grâce à un bouton situé sur la carte.

3.7 Intégration de l'électronique dans la fusée

La mise en place physique dans le tube a été un véritable défi, il fallait respecter le cahier des charges [1] sur les positions des différents composants, tout en respectant la place nous étant allouée

par les contraintes mécaniques.

Les cartes sont disposées en stack, avec un bus traversant et maintenues entre elles avec des entretoises. Ces stacks sont ensuite maintenus dans le tube via des bagues en PLA.

Il y a aussi d'autres pièces mécaniques utilisées pour tenir les éléments électroniques :

- Bague de support caméra Bêta : cette bague permet de tenir les 3 caméras dans le tube, ainsi que l'écran d'information, le buzzer, et la carte son.
- Bague de support caméra Alpha : elle permet de tenir l'unique caméra d'Alpha, dirigée vers le système de séparation pour en avoir des images.
- Bague Batterie : sur chaque étage, on a une bague de support batterie ; sur Alpha, elle contient 6 cellules 18650 et leurs BMS, et sur Bêta, 9 cellules 18650 et une batterie LiPo. Les deux bagues ont une géométrie différentes, pour s'adapter aux contraintes de chaque étage.
- Support du Pitot et des antennes LoRa, GPS et GSM dans la coiffe.

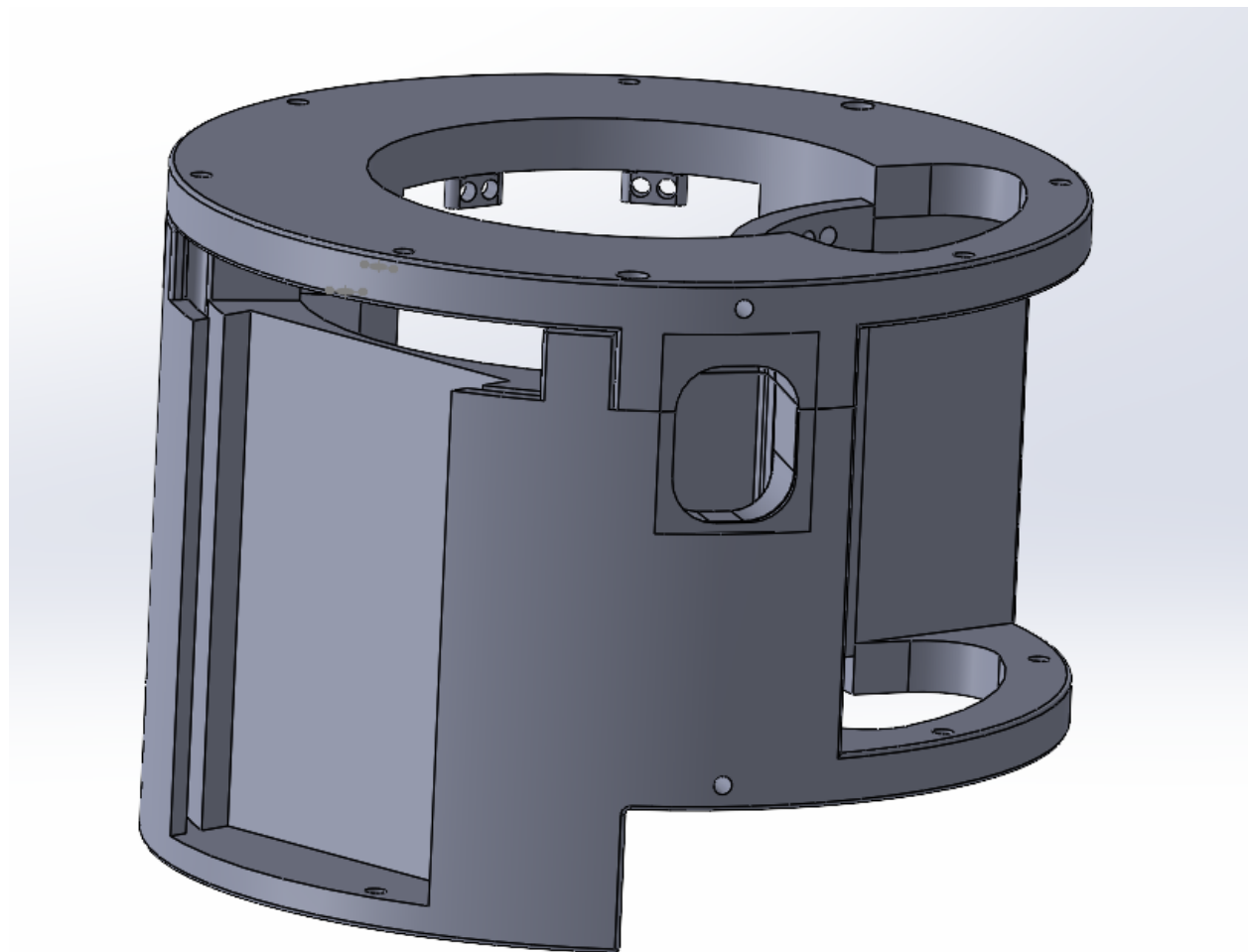


FIGURE 3.2 – Support caméra Bêta

3.8 Organisation interne de l'équipe électronique

L'équipe électronique était constituée au total de 6 personnes, dont un responsable. Chaque personne s'est vue assigner une carte électronique au début de l'année scolaire, et a travaillé dessus jusqu'en janvier environ, au moment des commandes des premières versions. Le travail a ensuite été mis en commun pour la gestion des problèmes des V1 l'intégration de l'élec. On suivait aussi bien entendu un rétroplanning interne pour respecter les deadlines. Certaines cartes étaient fonctionnelles dès la V1, mais d'autres ont dû être déboguées. Ainsi, on s'est échangé les cartes entre nous pour avoir un regard nouveau sur les différents problèmes. Toutes les cartes ont été conçues sur EasyEDA.

On suivait aussi bien entendu un rétroplanning interne pour respecter les deadlines. Une réunion interne était organisée tous les 10 jours environ pour s'assurer du bon avancement en élec, en plus des réunions d'avancement "globales" communes à toutes les équipes. On se servait aussi d'un drive commun avec tous les fichiers utilisés, en particulier des tableaux excel d'organisation "à court terme".

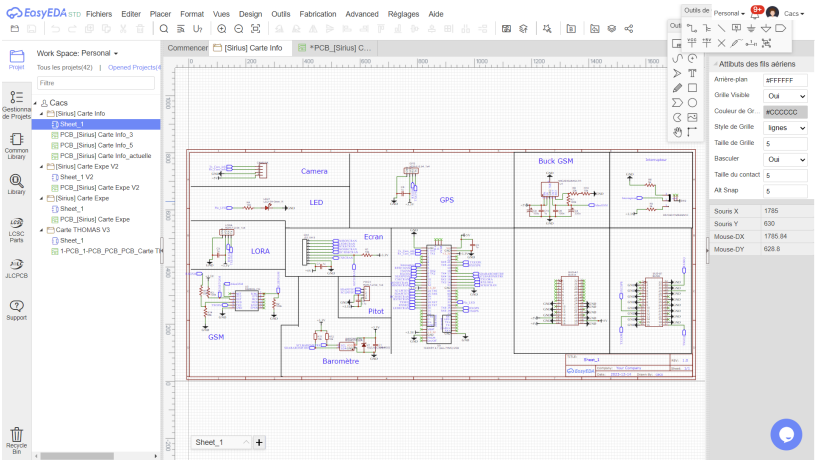


FIGURE 3.3 – Interface EasyEDA

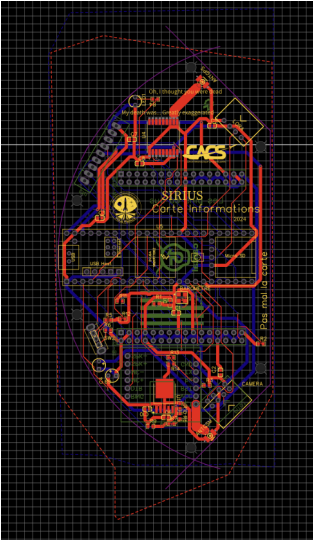


FIGURE 3.4 – Routage de la carte Info

Chapitre 4

Software

4.1 Présentation du soft de SIRIUS

4.1.1 Architecture globale

SIRIUS possède plusieurs cartes électroniques et systèmes qu'il convient de programmer.

- **Déclenchement parachute** : Il prend en compte un fenêtrage temporel, qui varie en fonction des cas dégradés du vol : séparation effective ou pas, allumage du second moteur,...
En guise d'expérience, une détection d'apogée avec un capteur de pression est réalisée, mais dans les limites du fenêtrage temporel : quel que soit le moment où l'apogée est détectée, la porte parachute s'ouvrira dans la fenêtre temporelle.
- **Déclenchement de la séparation des étages** : Il est actionné à un instant prédéterminé après le décollage.
- **Allumage du second moteur** : Il prendra en compte un fenêtrage temporel, la détection que la séparation des étages est effective ainsi que l'attitude (assiette et azimuth) de la fusée en accord avec le cahier des charges[1]. Si l'une des 3 conditions précédentes n'est pas vérifiée, l'ordre d'allumage n'est pas envoyé.
- **Capteurs** : L'acquisition des données des capteurs présents sur les cartes : les IMUs, les baromètres, le tube Pitot. Elle sera faite grâce à des interruptions de programme à intervalles précis (IntervalTimer sur Teensy) afin de s'assurer de l'acquisition des données à la fréquence souhaitée peu importe ce que le programme fait à chaque instant, en particulier l'enregistrement sur carte SD.
- **Cartes SD** : L'enregistrement des données et des journaux de vol (logs) se réalise en association avec les interruptions, grâce à deux mémoires tampons (buffers). À chaque interruption du programme, les données sont stockées dans le tampon actuel. Dès que le tampon actuel est plein, l'enregistrement débute sur l'autre tampon, et les données du tampon plein sont sauvegardées sur la carte SD en une seule fois dans la boucle principale. Ce processus se répète de manière cyclique lorsque le dernier tampon se remplit à son tour. L'utilisation de tampons permet de réduire les risques de perte de données lors de l'enregistrement.
- **Carte son** : Enregistrer le son issu de la carte son.
- **Caméras** : Les caméras que nous avons utilisées contiennent chacune une carte SD sur laquelle elles stockent les données vidéo. En terme de code, il suffisait donc de déclencher l'enregistrement vidéo juste avant le vol. L'enregistrement ne devait pas commencer trop tôt, sans quoi les cartes SD risquaient d'être pleines avant que le vol n'ait commencé. Nous avons donc décidé de commencer l'enregistrement vidéo au moment où le shunt télémétrie est retiré, ce qui est la dernière action réalisée par les pyrotechniciens au niveau de la fusée.
- **Télémétrie** : Certaines données importantes sont transmises par LoRa, en particulier les données GPS, la pression atmosphérique, la vitesse Pitot, la norme de la vitesse intégrée, l'altitude intégrée, l'état des différentes cartes, etc... Elles sont transmises en binaire puis décodées sur la station sol.
Un code a également été réalisé afin d'envoyer certaines de ces données par SMS à l'aide d'un module GSM, cependant nous avons rencontré beaucoup de dysfonctionnements à ce niveau, l'envoi de SMS a donc été abandonné.
- **Station sol** : Les données transmises par télémétrie sont reçues par la station sol et affichées en temps réel sur un tableau de bord.
- **GPS** : Les modules GPS permettent d'avoir la position de la fusée pendant la phase de descente et à l'atterrissage. Leur rôle principal est de retrouver les deux étages de la fusée en envoyant les données GPS à la station sol.
- **Écran et boutons** : L'écran permettra d'afficher à tout instant l'état de la fusée. Les boutons permettront d'interagir avec la fusée pour pouvoir activer ou désactiver des sous-systèmes et les tester séparément. Ces systèmes servent uniquement au debug et aux tests de la fusée.

- **Carte Pyro** : La carte Pyro contiennent 13 leds qui permettent de connaître l'état de la fusée et des systèmes critiques.
- **Communication entre les cartes** : Cette communication est indispensable pour diffuser l'information signalant le décollage de la fusée, ainsi que pour transmettre les données des capteurs à la carte Informations en vue de les afficher sur l'écran, et les communiquer à la station sol. De plus, elle permet le transfert des informations provenant des boutons aux autres cartes.
- **La trajectographie inertielle** : Elle intégrera en temps réel les données des IMUs afin de déterminer l'attitude, la vitesse et la position de la fusée dans le référentiel terrestre.
- **Traitement des données post-vol** : Pour le traitement des données après le vol, les données enregistrées sur la carte SD seront lues et analysées afin de vérifier les performances.

4.1.2 Algorithme de navigation inertielle

La détermination de l'orientation de la fusée en cours de vol constitue un élément essentiel du cahier des charges[1] pour un système à deux étages, garantissant ainsi un positionnement adéquat du deuxième étage avant d'émettre l'ordre d'allumage du moteur. Elle se fait grâce à l'intégration des IMUs. L'expérience a déjà été réalisée les années précédentes sur AJACS et PHENICS.

Orientation initiale

Soit $B_{ENU} = (\vec{E}, \vec{N}, \vec{U})$ la base terrestre (Est, Nord, Haut) et $B_{f0} = (\vec{X}_0, \vec{Y}_0, \vec{Z}_0)$ la base liée au référentiel fusée avec $\vec{Z}_0$ l'axe de la fusée dirigé vers le haut, toutes deux bases orthonormées directes.

On souhaite d'abord déterminer la matrice de passage $\mathbf{M}_0$ de B_{f0} à B_{ENU} . Pour cela, on détermine d'abord en moyennant sur une période où la fusée est considérée statique (juste avant le décollage) les mesures de l'accélération $a\vec{c}c_0$ (en m/s^2) et les mesures gyroscopiques $gy\vec{r}_0$ (en rad/s) dans le référentiel de la fusée grâce aux IMUs. Les IMUs seront soit préalablement calibrés avec des méthodes permettant de corriger le mal-alignement et l'échelle des axes ainsi que le biais ou seront calibrés sur cette même phase avant le vol pour corriger le biais des gyroscopes et avoir la norme de $\vec{g}$.

Soit $\vec{E}, \vec{N}$ et $\vec{U}$ les vecteurs unitaires Est, Nord et Haut exprimés dans B_{f0} . On a alors $\vec{U} = (U_x \ U_y \ U_z)^T = \frac{a\vec{c}c_0}{\|a\vec{c}c_0\|}$. On pose $\vec{t}_N = \frac{\vec{U} \wedge \vec{X}_0}{\|\vec{U} \wedge \vec{X}_0\|}$ un vecteur temporaire du vecteur Nord, et $\vec{t}_E = \vec{t}_N \wedge \vec{U}$ un vecteur temporaire de l'Est qui seront dans le plan $(\vec{E}, \vec{N})$. Il suffira ensuite de calculer l'azimut de la fusée dans ce référentiel pour pouvoir tourner la base et obtenir l'azimut initial α_0 désirée.

On calcul un angle β permettant de tourner ces vecteurs pour avoir le bon azimut :

$$\beta = -\alpha_0 + \text{atan2} \left(\frac{U_x U_z}{\sqrt{U_x^2 U_y^2 + U_x^2 U_z^2 + U_y^4 + 2U_y^2 U_z^2 + U_z^4}}, \frac{-U_y}{\sqrt{U_y^2 + U_z^2}} \right)$$

Puis on pose la matrice de rotation d'angle beta dirigée vers le haut dans la base B_{ENU} :

$$\mathbf{R}(\beta) = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & -\sin(\beta) & 0 \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ainsi, on obtient $\mathbf{M}_0 = \begin{pmatrix} \vec{t}_E & \vec{t}_N & \vec{U} \end{pmatrix} \times \mathbf{R}(\beta)$ la matrice de passage de B_{f0} à B_{ENU} . Autrement dit, si $\vec{v}$ est un vecteur colonne exprimé dans la base B_{ENU} et $\vec{v}'$ le même vecteur colonne exprimé dans la base B_{f0} , alors $\vec{v}' = \mathbf{M}_0 \vec{v}$. On a aussi que $\mathbf{M}_0^{-1} = \mathbf{M}_0^T$ car les deux bases sont orthonormales.

À noter qu'il n'est en réalité pas nécessaire de connaître l'azimut initial pour que le reste de l'algorithme fonctionne, cela permet seulement de placer $\vec{E}$ et $\vec{N}$ sur l'est et le nord respectivement.

Pour baisser le nombre de paramètres tout en évitant le blocage de cardan, on convertit la matrice $\mathbf{M}^T$ en quaternion $q = q_i \ i + q_j \ j + q_k \ k + q_w$.

Pour retrouver la matrice de rotation à partir d'un quaternion, on utilise la formule suivante :

$$\mathbf{M}^T = \begin{pmatrix} 1 - 2(q_j^2 + q_k^2) & 2(q_i q_j - q_k q_w) & 2(q_i q_k + q_j q_w) \\ 2(q_i q_j + q_k q_w) & 1 - 2(q_i^2 + q_k^2) & 2(q_j q_k - q_i q_w) \\ 2(q_i q_k - q_j q_w) & 2(q_j q_k + q_i q_w) & 1 - 2(q_i^2 + q_j^2) \end{pmatrix}$$

Equation d'évolution du système

Soit $x(t) = (v_x(t) \ v_y(t) \ v_z(t) \ p_x(t) \ p_y(t) \ p_z(t) \ q_i(t) \ q_j(t) \ q_k(t) \ q_w(t))^T$ un vecteur représentant l'état du système à un instant t , avec $\vec{v}(t) = (v_x(t) \ v_y(t) \ v_z(t))^T$ et $\vec{p}(t) = (p_x(t) \ p_y(t) \ p_z(t))^T$ respectivement la vitesse et la position de la fusée dans la base B_{ENU} et $q(t) = q_i(t) \ i + q_j(t) \ j + q_k(t) \ k + q_w(t)$ le quaternion représentant la matrice $\mathbf{M}(t)^T$ de passage de B_{ENU} à $B_f(t)$. Soit $u(t) = (a_x(t) \ a_y(t) \ a_z(t) \ g_x(t) \ g_y(t) \ g_z(t))^T$ avec $a\vec{c}c(t) = (a_x(t) \ a_y(t) \ a_z(t))^T$ et $g\vec{y}r(t) = (g_x(t) \ g_y(t) \ g_z(t))^T$ respectivement la mesure de l'accélération (m/s^2) et de la vitesse de rotation (rad/s) de la fusée dans la base $B_f(t)$.

On a alors la représentation d'état suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t)) \\ &= \begin{pmatrix} \mathbf{M}(t)^T a\vec{c}c(t) - \begin{pmatrix} 0 & 0 & \|a\vec{c}c_0\| \end{pmatrix}^T \\ \vec{v}(t) \\ 0.5 (g_x(t) \ i + g_y(t) \ j + g_z(t) \ k) \otimes q(t) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} (1 - 2(q_j(t)^2 + q_k(t)^2))a_x(t) + 2(q_i(t)q_j(t) - q_k(t)q_w(t))a_y(t) + 2(q_i(t)q_k(t) + q_j(t)q_w(t))a_z(t) \\ 2(q_i(t)q_j(t) + q_k(t)q_w(t))a_x(t) + (1 - 2(q_i(t)^2 + q_k(t)^2))a_y(t) + 2(q_j(t)q_k(t) - q_i(t)q_w(t))a_z(t) \\ 2(q_i(t)q_k(t) - q_j(t)q_w(t))a_x(t) + 2(q_j(t)q_k(t) + q_i(t)q_w(t))a_y(t) + (1 - 2(q_i(t)^2 + q_j(t)^2))a_z(t) - \|a\vec{c}c_0\| \\ v_x(t) \\ v_y(t) \\ v_z(t) \\ 0.5(g_x(t)q_w(t) + g_y(t)q_k(t) - g_z(t)q_j(t)) \\ 0.5(-g_x(t)q_k(t) + g_y(t)q_w(t) + g_z(t)q_i(t)) \\ 0.5(g_x(t)q_j(t) - g_y(t)q_i(t) + g_z(t)q_w(t)) \\ 0.5(-g_x(t)q_i(t) - g_y(t)q_j(t) - g_z(t)q_k(t)) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

On peut résoudre cette équation différentielle ordinaire non linéaire numériquement en temps réel à l'aide de la méthode d'Euler par exemple.

$$x[k] = x[k-1] + (t[k] - t[k-1])f(x[k-1], u[k])$$

Une meilleur manière de résoudre numériquement l'équation est d'utiliser la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4.

Calcul de l'assiette et de l'azimuth

On peut déduire l'assiette $\theta(t)$ (l'angle entre l'axe de la fusée et le sol) et l'azimuth $\alpha(t)$ (l'angle orienté du nord vers l'axe de la fusée par rapport à la verticale) à partir de $q(t)$.

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \frac{\pi}{2} - \arccos \left(\left\langle \vec{Z}(t), \vec{U} \right\rangle \right) \\ &= \frac{\pi}{2} - \arccos \left(\left\langle \mathbf{M}(t)^T \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\rangle \right) \\ &= \frac{\pi}{2} - \arccos (1 - 2 (q_i(t)^2 + q_j(t)^2)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= \text{atan2} \left(-\left\langle \vec{Z}(t), \vec{E} \right\rangle, \left\langle \vec{Z}(t), \vec{N} \right\rangle \right) \\ &= \text{atan2} \left(-\left\langle \mathbf{M}(t)^T \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\rangle, \left\langle \mathbf{M}(t)^T \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\rangle \right) \\ &= \text{atan2} (-q_i(t)q_k(t) + q_j(t)q_w(t), -q_i(t)q_w(t) + q_j(t)q_k(t)) \end{aligned}$$

Avec :

$$\text{atan2}(y, x) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & \text{si } x > 0, \\ \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{x}{y}\right) & \text{si } y > 0, \\ -\frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{x}{y}\right) & \text{si } y < 0, \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \pm \pi & \text{si } x < 0, \\ \text{non définie} & \text{si } x = 0 \text{ et } y = 0. \end{cases}$$

4.1.3 Intégration des outils de développement logiciel et structure

Pour notre organisation de la partie Software de SIRIUS, nous avons utilisé PlatformIO, un écosystème open-source pour le développement IoT. PlatformIO offre un environnement unifié pour écrire du code, gérer des bibliothèques et déployer des projets sur plusieurs plateformes, telles que Arduino, que nous avons utilisé dans notre cas. Il nous permet d'intégrer facilement diverses bibliothèques et de gérer efficacement les dépendances.

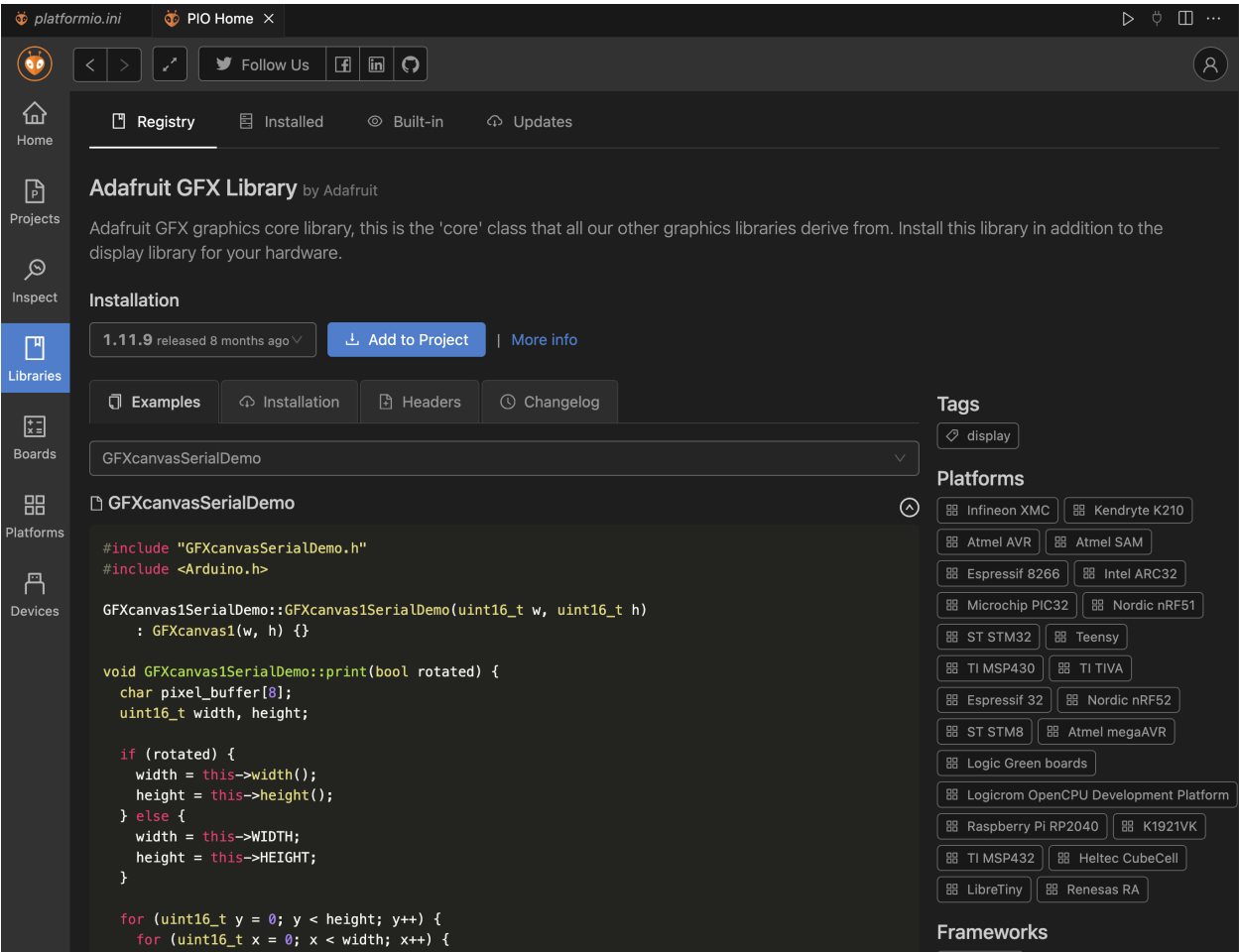


FIGURE 4.1 – Interface de PlatformIO montrant l’installation de la bibliothèque Adafruit GFX.

La bibliothèque Adafruit GFX, comme le montre la Figure 4.1, est une bibliothèque graphique de base qui prend en charge un large éventail de matériel d’affichage. Elle simplifie la tâche de rendu des graphiques sur différents écrans, ce qui est crucial pour les éléments de l’interface utilisateur de notre projet. PlatformIO fournit également des outils pour configurer et communiquer avec notre matériel.

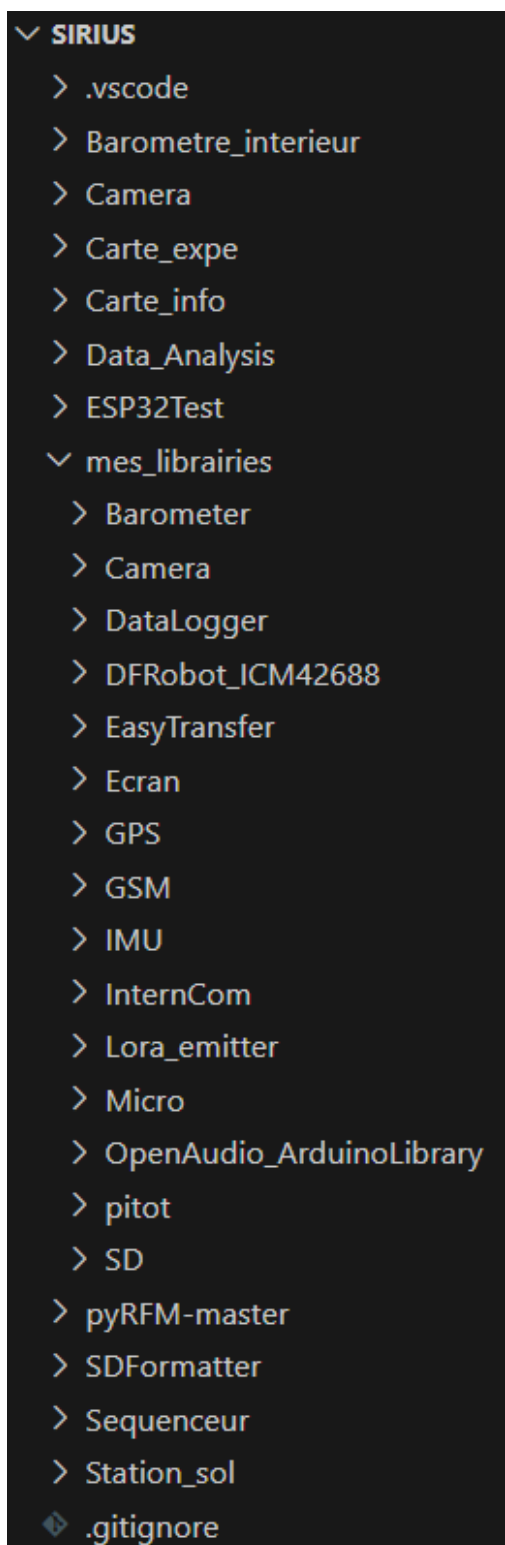


FIGURE 4.2 – Structure du répertoire courant du projet.

La structure modulaire de notre code est un autre aspect crucial. Chaque capteur et module dispose de ses propres fichiers dédiés pour l'implémentation et les définitions des en-têtes. Ces fichiers sont stockés dans le dossier "mes_libraries", et sont appelés comme des bibliothèques dans le code des cartes. Cette organisation améliore la maintenabilité et la lisibilité de notre projet.

Chaque composant est construit à l'aide d'une classe, contenant des méthodes privées et publiques, selon leur utilisation dans le code. Les différents modules sont ensuite intégrés dans le fichier principal de la carte électronique sur laquelle on souhaite coder, lui-même utilisant des classes. Cette approche modulaire nous permet de tester chaque composant indépendamment avant de les intégrer, assurant ainsi une meilleure stabilité du système global.

```

G+ cartelInfo.cpp • G+ LoRa.cpp 2 X
Carte_info > src > G+ LoRa.cpp > ...
50 }
51
52 int Lora::get_baud_rate() {
53     return baud_rate;
54 }
55
56 void Lora::setup() {
57     LoraSerial.write("AT+MODE=TEST\n");
58     // AT+TEST=RFCFG,[FREQUENCY],[SF],[BANDWIDTH],[TX PR],[RX PR],[TX POWER],[CRC],[IQ],[NET]
59     LoraSerial.write("AT+TEST=RFCFG,868,SF7,500,8,8,12,ON,OFF,OFF\n");
60     delay(100);
61 }
62
63
64 void Lora::set_sleep_mode() {
65     if (mode != 1) {
66         LoraSerial.write("AT+MODE=1");
67         set_mode(1);
68     }
69 }
70
71 void Lora::set_transmit_received_mode() {
72     if (mode != 0) {
73         LoraSerial.write("AT+MODE=0");
74         set_mode(0);
75     }
76 }
77
78 int Lora::convert_dec_to_bin(int decimal) {
79     int binary = 0, i = 1, remainder;
80
81     while (decimal != 0) {
82         remainder = decimal % 2;
83         decimal /= 2;
84         binary += remainder * i;
85         i *= 10;
86     }
87     return binary;
88 }
89
90 void Lora::convert_dec_to_bin_tab(int decimalList[], int size) {
91     for (int i = 0; i < size; i++) {
92         decimalList[i] = convert_dec_to_bin(decimalList[i]);
93     }
94 }

```

FIGURE 4.3 – Code C++ pour configurer le module LoRa en utilisant PlatformIO.

La Figure 4.3 montre un exemple de code C++ utilisé pour configurer le module LoRa. Ce code inclut les fonctions pour initialiser le module, le configurer dans différents modes, et convertir les formats de données. L'utilisation de PlatformIO facilite grandement la gestion des bibliothèques et la configuration des paramètres de compilation.

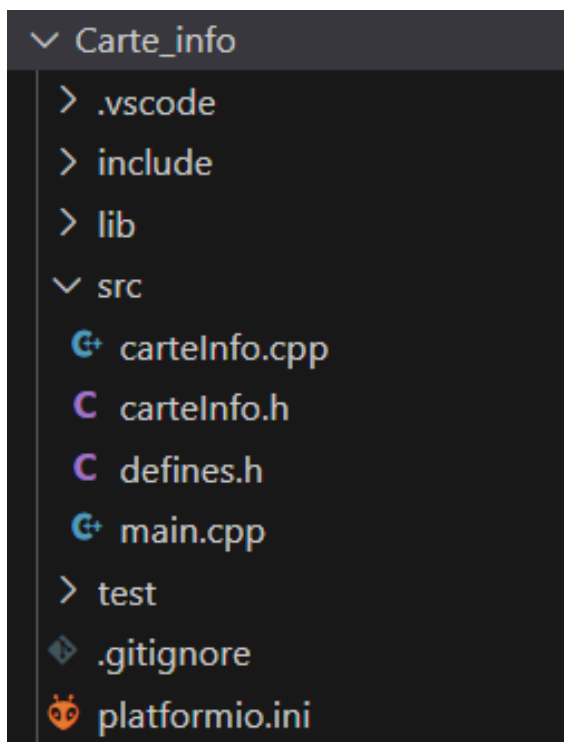


FIGURE 4.4 – Architecture du projet "Carte_info"

Pour chaque carte, le projet contient 4 fichiers. La Figure 4.4. prend comme exemple la carte Informations :

- Le fichier "defines.h" contient tous les `#include` et les `#define`.
- Le fichier "carteInfo.h" permet d'introduire la classe `CarteInfo`, ses attributs et ses méthodes.
- Le fichier "carteInfo.cpp" contient le code des différentes méthodes de la classe `CarteInfo`.
- Le fichier "main.cpp" indique l'ensemble des actions que la carte Informations doit réaliser, en appelant les méthodes de classe écrites dans "carteInfo.cpp".

4.2 Analyse des données de vol

4.2.1 Capteurs

Baromètre

Mesurer la pression ambiante est un moyen très fiable de mesurer l'altitude de la fusée par rapport au niveau de la mer. Le baromètre permet également de mesurer la température ambiante, indiquée en Figure 4.6.

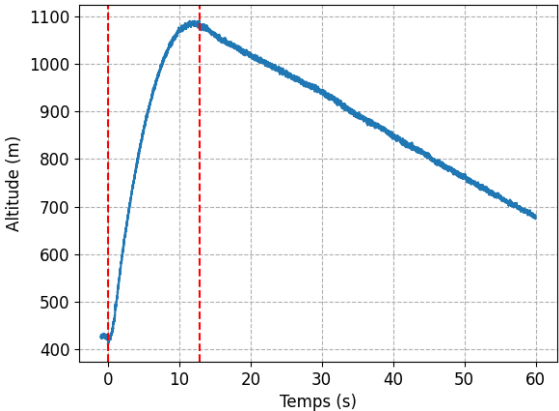


FIGURE 4.5 – Altitude par rapport au niveau de la mer

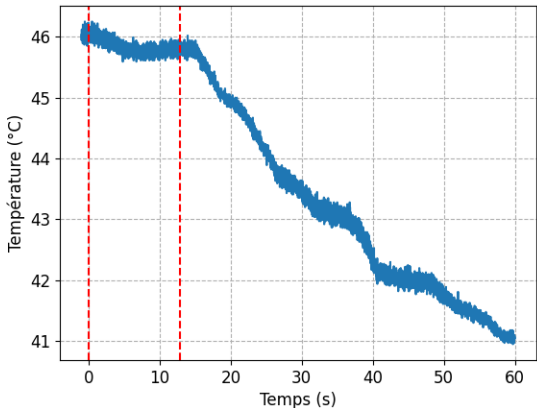


FIGURE 4.6 – Température au cours du vol

En guise d'expérience, nous avons implémenté un algorithme de détection de l'apogée, dont le but était de déployer le parachute au moment où l'apogée était atteinte, le tout dans une fenêtre temporelle qui assurait le déploiement du parachute dans le cas où l'algorithme ne fonctionnerait pas.

Le principe de l'algorithme est le suivant : à chaque mesure de pression, on compare la moyenne des n dernières mesures de pression (appelons-la M_2) à la moyenne des n mesures précédentes (appelons-la M_1). Si $M_1 < M_2$, l'apogée est détectée. Malheureusement, une erreur de code a fait que l'apogée a été détectée avant le décollage, quand la fusée était en rampe. C'est donc le fenêtrage temporel qui a permis le bon déploiement du parachute.

Afin de savoir si l'algorithme aurait fonctionné sans cette erreur de code, nous l'avons appliqué aux données de pression que nous avons récupérées. Comme indiqué en Figure 4.7, l'apogée est détectée environ 0,5 secondes avant la vraie apogée, ce qui laisse juste le temps à la porte de s'ouvrir et au parachute de se déployer. L'algorithme aurait donc très bien fonctionné.

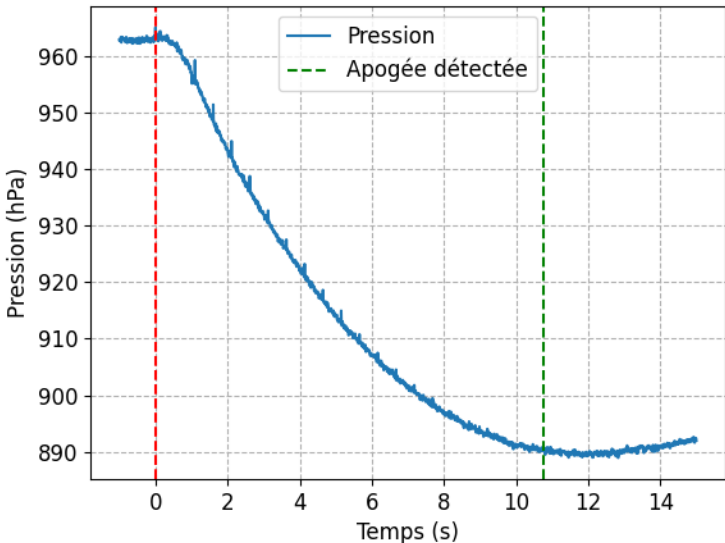


FIGURE 4.7 – Pression au cours du vol, et détection de l'apogée

Système de séparation

L'un des objectifs principaux du vol était de vérifier que le système de séparation (dont le mécanisme était contenu entièrement dans Beta, l'étage que nous avons lancé) fonctionnait correctement. Grâce à un jack accroché à la bague qui est poussée lors de la séparation, nous savons que le système de séparation s'est bel et bien enclenché.

De plus, un capteur de pression était relié au système pneumatique qui gérait la séparation et a mesuré sa pression durant le vol (Figure 4.8).

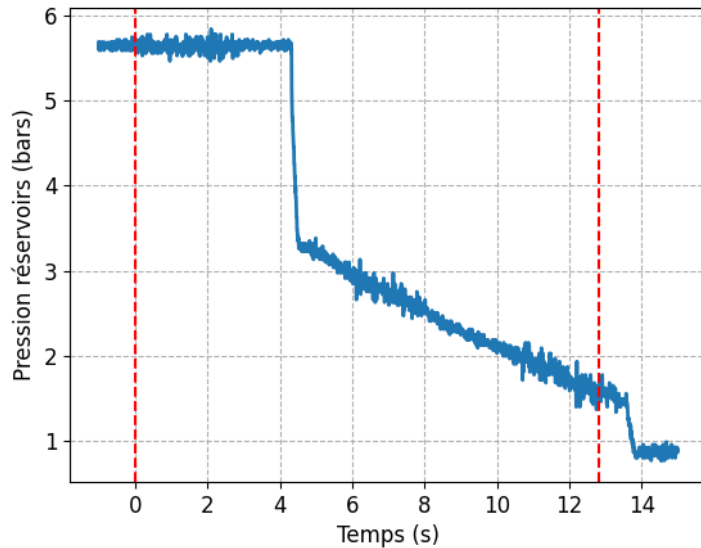


FIGURE 4.8 – Pression du système pneumatique

Les deux chutes de pression (à 4,3 secondes et à 13,5 secondes) sont dues aux deux enclenchements des vérins : le premier est la séparation, le second est dû au fait que le système re-commute automatiquement en position fermée quand la pression passe sous un certain seuil.

Ainsi, on sait que la pression du système de séparation était de 5,6 bars au moment de l'ordre de séparation. C'est largement suffisant puisque le système est capable de fonctionner au-dessus de 3 bars.

La diminution régulière de pression après la séparation est due à une fuite connue du système, qui n'a pas été corrigée car absolument pas gênante : elle ne se produit que lorsque le système est en position ouverte, c'est-à-dire après la séparation.

4.2.2 IMUs

Les IMUs de la carte expérience n'ont pas fonctionné, pour une raison encore inconnue : ils fonctionnaient en rampe, mais plus au moment du décollage. L'hypothèse la plus probable est donc qu'ils n'aient pas supporté l'accélération initiale, ce qui reste surprenant car ce modèle avait fonctionné lors du vol de la fusée de l'année précédente, PHENICS. Une autre possibilité est la chaleur, cependant le constructeur déclare que le module est opérationnel jusqu'à 105 °C, température qui a peu de chance d'avoir été atteinte.

Heureusement, les caméras contenaient aussi des IMUs dont nous avons pu récupérer les données. De plus, comme indiqué en Figures 4.11 et 4.12, le biais des gyromètres et l'accélération statique ne dérivent pas avec le temps, ce qui est une très bonne nouvelle quant à la précision des données.

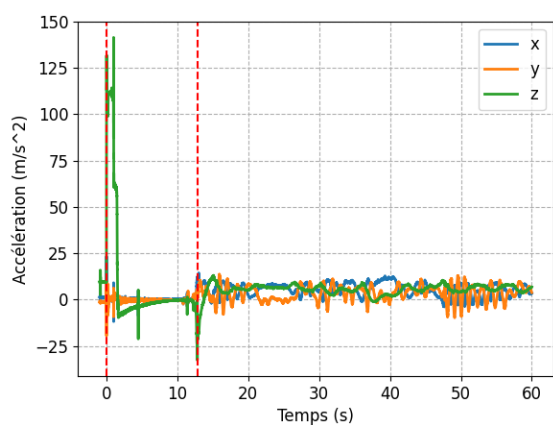


FIGURE 4.9 – Accélération au cours du vol

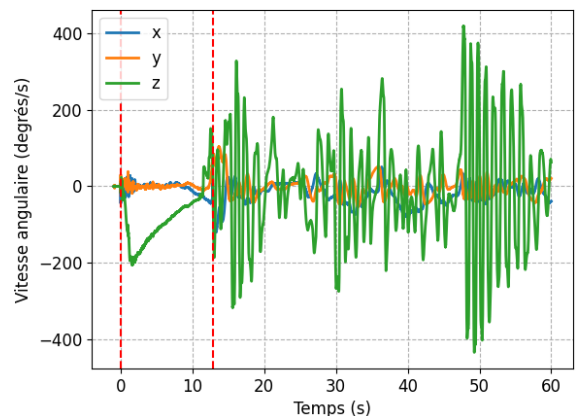


FIGURE 4.10 – Vitesse angulaire au cours du vol

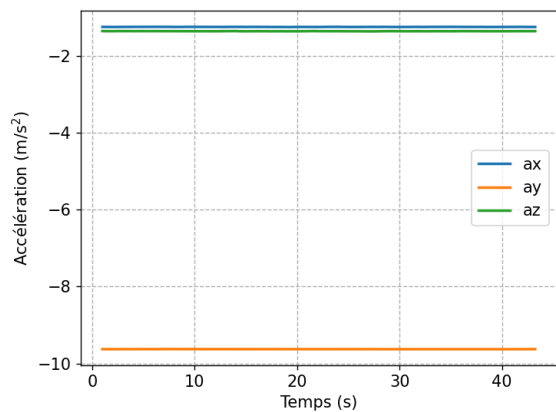


FIGURE 4.11 – Moyenne glissante de l'accélération statique

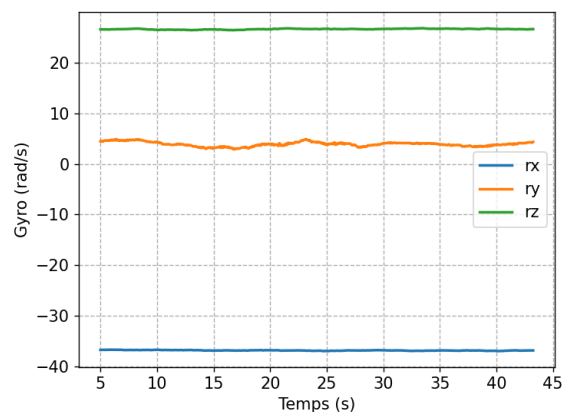


FIGURE 4.12 – Moyenne glissante du biais des gyromètres

Résultats de l'intégration

A partir des données d'accélération et de vitesse angulaire des IMUs, on peut obtenir la position, la vitesse et l'attitude de la fusée à tout instant.

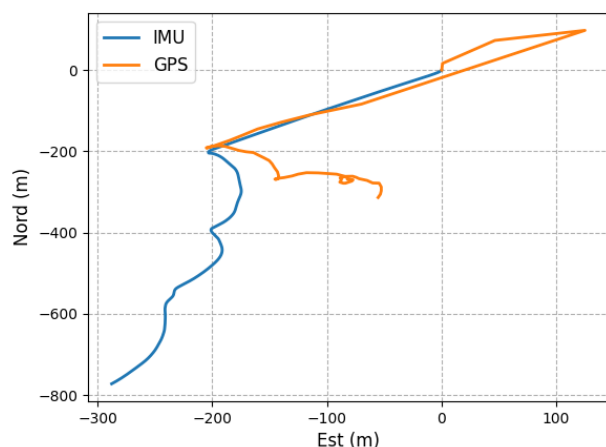


FIGURE 4.13 – Trajectoire de la fusée dans le plan (Nord,Est)

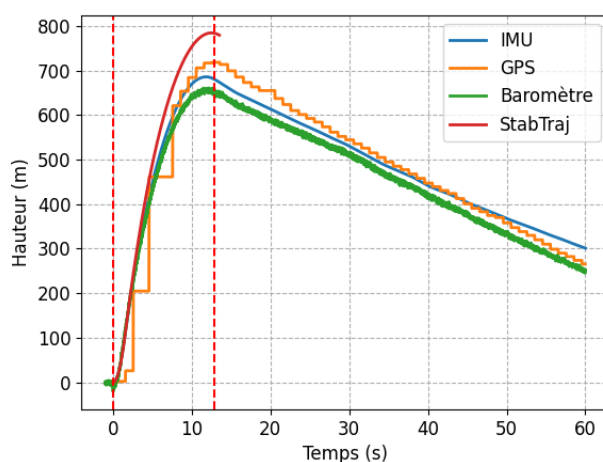


FIGURE 4.14 – Altitude en fonction du temps

La figure 4.13 permet de conclure que le calcul de la position dans le plan du sol est en accord avec le GPS avant le déploiement du parachute (ligne droite bleue sur la figure). Ensuite, la position obtenue grâce aux IMUs dérive à cause des intégrations successives.

On peut aussi remarquer que les données GPS (courbe orange) ne s'accordent pas avec les IMUs au début du vol, c'est parce que le GPS n'est pas fait pour fonctionner efficacement lors de fortes accélérations.

La Figure 4.14 montre les limites du GPS et des IMUs quant au calcul de l'altitude. Le baromètre est en effet le moyen le plus fiable de mesurer l'altitude. Les IMUs s'écartent des données du baromètre avec le temps à cause de la superposition des erreurs lors des intégrations successives. Le GPS, quant à lui, n'est pas aussi fiable que le baromètre pour la raison évoquée précédemment : il n'a pas été conçu pour fonctionner à des accélérations aussi élevées.

Sirius a donc atteint une hauteur d'environ 680 mètres. C'est plus faible que les 784 mètres prédits par le StabTraj, cela est certainement dû à la défaillance du moteur.

Sa vitesse maximale a été 125 m/s, atteinte après 1,6 secondes de poussée. Les courbes de vitesse de la Figure 4.15 sont confirmées par les données du GPS et du baromètre, comme indiqué aux Figures 4.16 et 4.17.

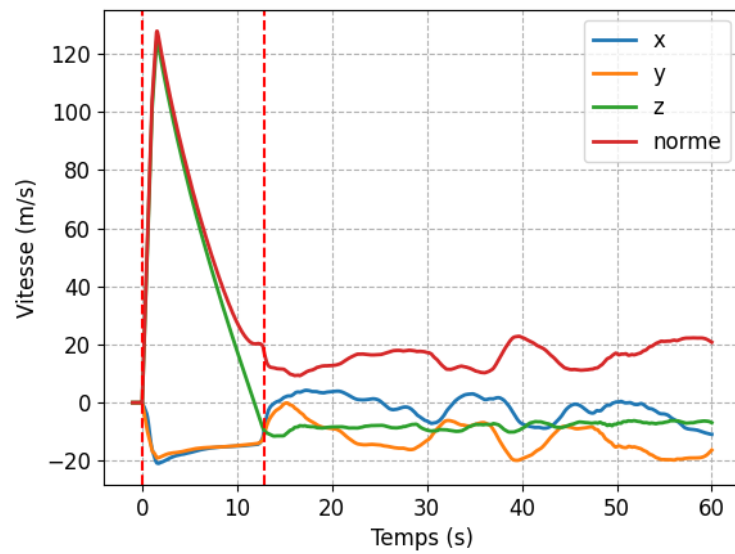


FIGURE 4.15 – Vitesse au cours du vol

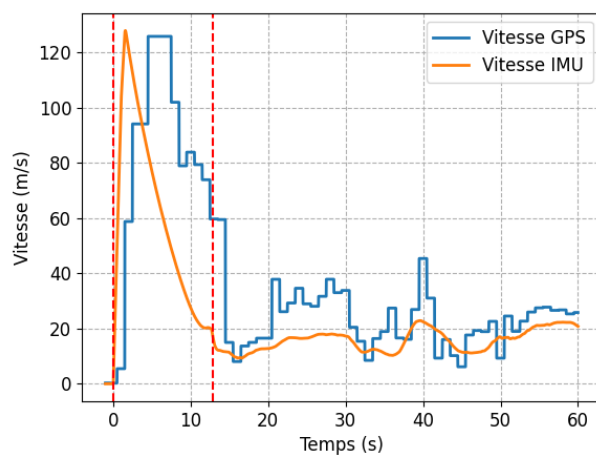


FIGURE 4.16 – Norme de la vitesse

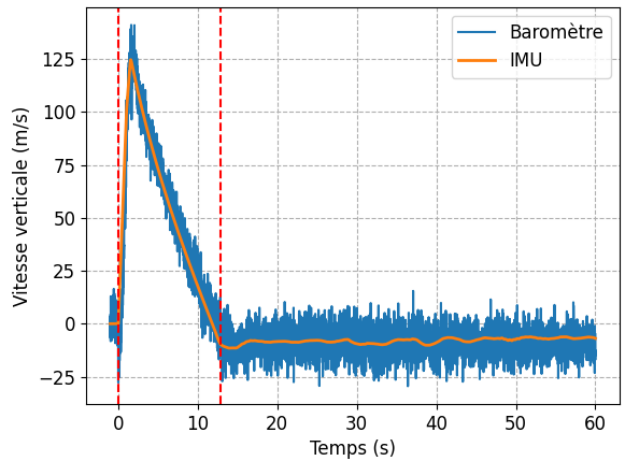


FIGURE 4.17 – Vitesse verticale

Dans une fusée bi-étage, les IMUs sont un système critique puisqu'ils permettent d'obtenir l'attitude (assiette et azimuth) de la fusée : si elle est trop éloignée des prévisions du StabTraj après la séparation, l'ordre d'allumage du second moteur n'est pas envoyé. Il est donc important de vérifier que l'attitude de SIRIUS n'a pas trop varié au cours du vol.

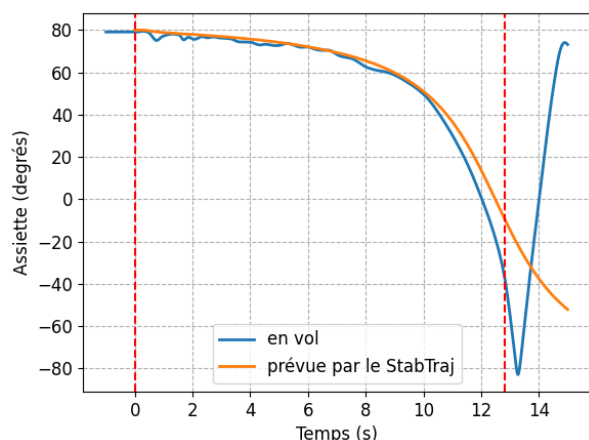


FIGURE 4.18 – Assiette avant le déploiement du parachute

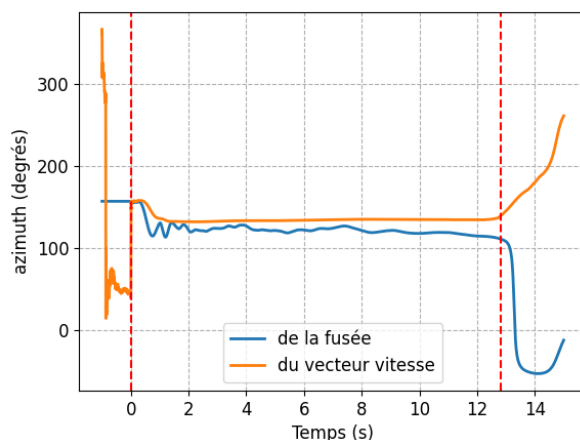


FIGURE 4.19 – Azimuth avant le déploiement du parachute

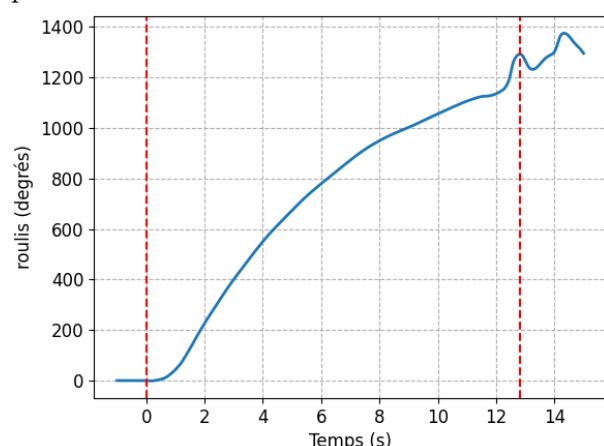


FIGURE 4.20 – Roulis avant le déploiement du parachute

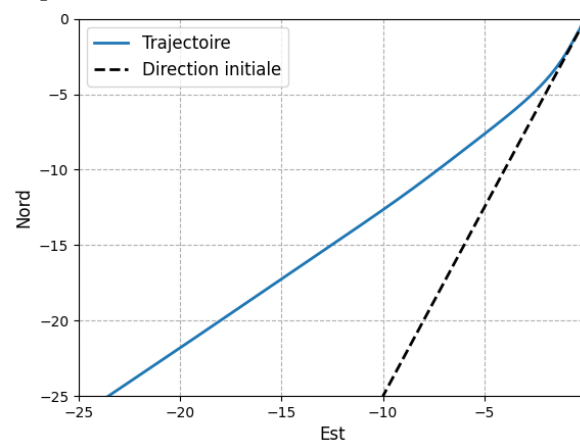


FIGURE 4.21 – Déviation de la trajectoire au moment du décollage dans le plan du sol

L'assiette reste en accord avec le StabTraj largement assez longtemps pour permettre l'allumage du second moteur. La différence en fin de vol est certainement due à une défaillance du moteur qui a légèrement réduit l'altitude maximale, d'où le fait que l'assiette chute un peu plus vite que prévu. En revanche, l'azimuth diminue de 40° en sortie de rampe (comme visible en Figures 4.19 et 4.21), ce qui laisse peu de marge par rapport à la variation maximale de $\pm 45^\circ$ imposée par le cahier des charges. De plus, sur un vol biétage, la fusée aurait été plus longue et aurait peut-être dévié encore plus en sortie de rampe, ainsi qu'au moment de la séparation.

L'explication la plus raisonnable est l'effet du vent. Elle semble confirmée par la courbe d'azimuth du vecteur vitesse (courbe orange de la Figure 4.19) : l'azimuth du vecteur vitesse est toujours supérieur à celui de la fusée, ce qui signifie que cette dernière pointe un peu à côté de son axe de déplacement. De plus, les vidéos du décollage montrent que le vent allait dans le sens opposé à la déviation de l'azimuth.

On peut malgré tout espérer que l'effet du vent aurait été moins important sur un vol biétage, car la rampe aurait alors été rallongée de 2 mètres, permettant à la fusée de sortir de rampe à une vitesse plus élevée.

L'intégration des IMUs permet aussi d'obtenir le roulis de la fusée (Figure 4.20). Il vaut 1130° avant le déploiement du parachute, SIRIUS a donc fait environ 3 tours sur elle-même.

4.2.3 Analyse de la défaillance moteur

Le moteur de SIRIUS a rencontré un problème lors de son allumage : des morceaux de la tuyère se sont détachés. Il est donc intéressant de comparer les performances de ce moteur à celles attendues par le StabTraj. En figure 4.22, on remarque que la fusée a d'abord accéléré légèrement plus que prévu, mais pendant moins longtemps. Au bout d'une seconde, la propulsion s'est arrêtée pour reprendre immédiatement, mais moins puissante : c'est le "palier" qu'on observe entre 1 s et 1,5 s.

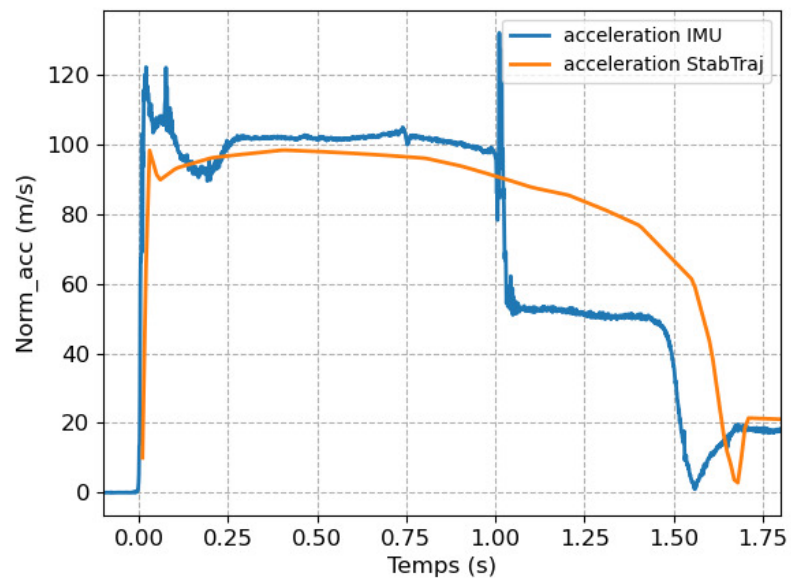


FIGURE 4.22 – Accélération au cours du vol

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Jean CHOPPIN DE JANVRY, Thomas GAMELIN, Matthieu PRIGENT, Coralie SOURGEN, Bastien JACQUES et Anas HIMMI. Leur travail préliminaire, ainsi que le partage généreux de leurs connaissances et de leur expertise, ont été inestimables pour la réussite de ce projet. Leur engagement et leur collaboration ont permis de poser des bases solides et de franchir les premières étapes cruciales avec succès.

Nous remercions également les bénévoles de Planète Sciences qui ont pu nous guider et nous conseiller au cours de l'année et plus généralement nous voulons remercier l'ensemble des membres de l'organisation du C'Space pour la semaine absolument inoubliable que nous avons vécu.

Nous souhaitons également remercier chaleureusement Raul DE LACERDA, Anthony KOLAR, Laurent CABARET et Frederic PETITJEAN pour leur savoir-faire et leur encadrement tout au long du projet. Leur soutien constant, leurs conseils avisés et leur expérience précieuse ont été des éléments déterminants pour la progression et la concrétisation à venir de nos objectifs. Leur dévouement et leur capacité à guider l'équipe avec compétence et bienveillance ont été essentiels à chaque étape du développement.

Enfin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance envers ArianeGroup et Archery pour leur soutien financier. Leur investissement et leur confiance ont permis de donner vie à ce projet. Sans leur aide précieuse, nous n'aurions pas pu bénéficier des ressources nécessaires pour mener à bien nos recherches et nos travaux. Leur contribution a été indispensable à la réalisation de notre projet.

Bibliographie

- [1] Planete Science CNES. Cahier des charges fusees experimentales bi etage. *https://www.planete-sciences.org/espace/IMG/pdf/cahier_des_charges_fusex_bi-etage_v1.1_-2.pdf*.
- [2] Planete Science CNES. Cahier des charges fusées experimentales mono étage. *https://www.planete-sciences.org/espace/IMG/pdf/cahier_des_charges_fusex_mono-etage_v3.1_-2.pdf*.
- [3] Planete Science CNES. Cahier des charges propulseurs c'space. *https://www.planete-sciences.org/espace/IMG/pdf/cahierpropulseursv17_mars2021.pdf*.