



---

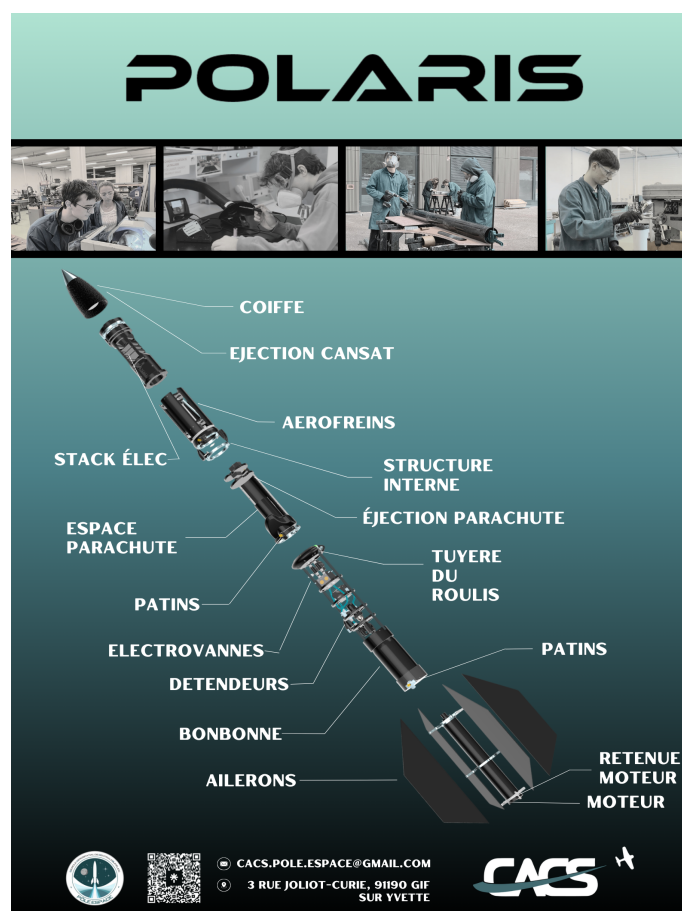
# Rapport pre-vol Polaris pre-RCE3

Fusée expérimentale avec aérofreins, cansat et contrôle de roulis

Pôle Espace du Cercle Aérospatial de CentraleSupélec

2025/2026

---



## Équipe Mécanique :

Marin Vidal (respo méca), Neil Sherman (Chef de projet), Mattéo Fortin, Luc Mariette, Julia Argence, Côme d'Aramon, Grégoire Crappé, Matthieu Le Lidec, Naïs Leyronas, Elie Dager, Emma Vassent, Julia Argence, Julien François, Loïc Ronjon, Nolan Glotin, Quentin Frugier, Rayane Tahiri, Sacha Beau, Antonin Marchant-Charnavel, Timothé Allmang

## Équipe Électronique :

Cristian Latcu (respo élec), Alessandro D'Amore, Mathilde Oria, Sami Nehas, Tristan Durain, Hyeongwon Kim, Cyprien Régis

## Équipe Software :

Ivan Sturov (respo soft), Antoine Lerolle, Gabriel Delattre, Eliott Fevret

# Table des matières

|          |                                                         |           |
|----------|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>                                     | <b>1</b>  |
| 1.1      | Naissance du projet . . . . .                           | 1         |
| 1.2      | Organisation temporelle . . . . .                       | 1         |
| 1.3      | Gestion de projet . . . . .                             | 1         |
| 1.4      | Expériences . . . . .                                   | 1         |
| <b>2</b> | <b>Structure Mécanique</b>                              | <b>2</b>  |
| 2.1      | Organisation temporelle et des ressources . . . . .     | 2         |
| 2.2      | Architecture générale . . . . .                         | 3         |
| 2.2.1    | Intégration propulsion . . . . .                        | 4         |
| 2.2.2    | Récupération . . . . .                                  | 6         |
| 2.2.3    | Ailerons . . . . .                                      | 10        |
| 2.2.4    | Coiffe . . . . .                                        | 11        |
| 2.2.5    | Structure externe (tubes) . . . . .                     | 15        |
| 2.2.6    | Contrôle de roulis . . . . .                            | 19        |
| 2.2.7    | Aérofreins . . . . .                                    | 27        |
| 2.2.8    | Stack élec . . . . .                                    | 32        |
| 2.2.9    | Structure interne . . . . .                             | 33        |
| 2.2.10   | Éjection du CanSat . . . . .                            | 35        |
| 2.2.11   | Patins . . . . .                                        | 36        |
| 2.3      | Intégration . . . . .                                   | 36        |
| 2.3.1    | Fixation des pièces . . . . .                           | 36        |
| 2.3.2    | Références en z et theta . . . . .                      | 36        |
| 2.4      | StabTraj . . . . .                                      | 37        |
| 2.5      | Sécurité . . . . .                                      | 37        |
| 2.5.1    | Portée balistique . . . . .                             | 37        |
| 2.5.2    | Protocole de vidange de la bonbonne du roulis . . . . . | 37        |
| 2.5.3    | Fichiers des composants . . . . .                       | 38        |
| 2.5.4    | Animaux et Pyrotechnique . . . . .                      | 38        |
| <b>3</b> | <b>Systèmes Électronique</b>                            | <b>39</b> |
| 3.1      | Organisation temporelle et des ressources . . . . .     | 39        |
| 3.2      | Architecture générale . . . . .                         | 40        |
| 3.3      | Cartes électroniques / <i>PCB</i> . . . . .             | 41        |
| 3.3.1    | Séquenceur . . . . .                                    | 41        |
| 3.3.2    | Expérience . . . . .                                    | 43        |
| 3.3.3    | Alimentation . . . . .                                  | 48        |
| 3.3.4    | Interface . . . . .                                     | 48        |
| 3.3.5    | BMS . . . . .                                           | 49        |
| 3.3.6    | Batteries . . . . .                                     | 51        |
| 3.4      | Câblage . . . . .                                       | 52        |
| 3.5      | Télémétrie . . . . .                                    | 53        |
| 3.5.1    | SNR . . . . .                                           | 53        |
| 3.5.2    | Cavaliers et points de tests . . . . .                  | 54        |
| <b>4</b> | <b>Soft</b>                                             | <b>55</b> |
| 4.1      | Expériences de mesure . . . . .                         | 55        |
| 4.1.1    | Définition de la chaine de télém mesure . . . . .       | 55        |
| 4.1.2    | Réalisation et évaluation des mesures . . . . .         | 55        |
| 4.1.3    | Algorithme de navigation inertielle . . . . .           | 55        |
| 4.2      | Étalonnage des capteurs . . . . .                       | 57        |
| 4.2.1    | Étalonnage du capteur de tension . . . . .              | 57        |
| 4.2.2    | Étalonnage du baromètre . . . . .                       | 58        |
| 4.3      | Algorithmes de contrôle . . . . .                       | 58        |
| 4.3.1    | Algorithme de contrôle du roulis . . . . .              | 58        |
| 4.3.2    | Algorithme de l'aérofrein . . . . .                     | 59        |
| <b>5</b> | <b>Documents annexes</b>                                | <b>60</b> |





# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Naissance du projet

Après Sirius et Pégasus, des Fusex bi-étage nominales aux C'Space 2024 et 2025 respectivement, le Pôle Espace de CentraleSupélec s'est penché sur un autre sous-système ambitieux : le contrôle de roulis. L'idée du contrôle lors du vol de la fusée a amené une autre idée : un contrôle d'altitude par aérofreins. De plus, la volonté de participer au concours CanSat pour diversifier les expériences est apparue. La combinaison des trois a créé un projet unique, tant par son envergure que par la diversité de ses expériences.

### 1.2 Organisation temporelle

Les mois de septembre et octobre ont été passés pour former la nouvelle équipe et distribuer les rôles selon les 7 sous-systèmes méca et 5 cartes élec.

La conception a duré de novembre à fin janvier, où la version 1 de la fusée est théoriquement complète. La phase de prototypage, testage, et intégration viendra évidemment à provoquer des changements de conception et continuera jusqu'à la RCE3.

L'équipe est composée d'un chef de projet ainsi que de responsables mécanique, électronique et software, chacun en charge de leur équipe. Des réunions par pôle sont organisées toutes les 2 semaines environ, tandis que les réunions d'avancement environ toutes les trois semaines. Cela permet à tout le monde de garder une vision globale du projet.

Le travail est réparti en continu, le soir notamment. Sont organisés de plus des "week-end rush" où l'équipe entière se réunit pour travailler en continu sur le projet. Une réunion d'avancement précède chaque week-end rush pour en établir les objectifs. Il existe de plus des séances de projet organisées par CentraleSupélec, qui ont lieu chaque semaine durant une demi-journée.

Un rétro-planning complet est disponible par pôle de conception dans chaque section correspondante. Vacances et révisions ont été intégrées dans le planning.

### 1.3 Gestion de projet

Les responsables de pôles ont un rôle double : un rôle technique qui leur est attribué, mais aussi l'accompagnement et l'encadrement de tous les autres sous-systèmes de leur pôle. Ils sont responsables des décisions de leur pôle et se réunissent régulièrement avec le chef de projet pour organiser l'avancement de chaque sous-système en cohérence entre eux et veiller aux grandes phases du projet ainsi que du respect du planning. Les équipes de sous-systèmes, par 2 ou 3, travaillent ensemble avec l'aide de leur responsable. Ils sont amenés régulièrement à discuter avec les sous-systèmes qui leur sont proches, et avec la globalité du projet lors des réunions. Le chef de projet et les responsables de pôles veillent à ce que tout le monde soit satisfait de leur contribution au projet, et que celui-ci leur apporte joie et bonne humeur :)

### 1.4 Expériences

Les expériences au bord de notre fusée sont :

- Un contrôle de roulis, servant à contrôler la fusée selon sa rotation
- Des aérofreins, servant à contrôler la fusée selon son altitude
- Un capteur de tension des parachutes, évaluant la présence d'un choc lorsqu'il se déploie à l'apogée
- Le déploiement et les expériences supplémentaires d'un CanSat à l'apogée, pour développer un largage et démultiplier les expériences

## Chapitre 2

# Structure Mécanique

Le projet POLARIS est une fusée mono-étage de diamètre extérieur de 145 mm pour un diamètre intérieur de 140 mm. La fusée fait une hauteur de 3m05 entre le haut de la coiffe et la base où est placée le moteur Pro 75. Elle est composée de deux types de structures : peau porteuse et structure interne, chacune sur une partie de la fusée.

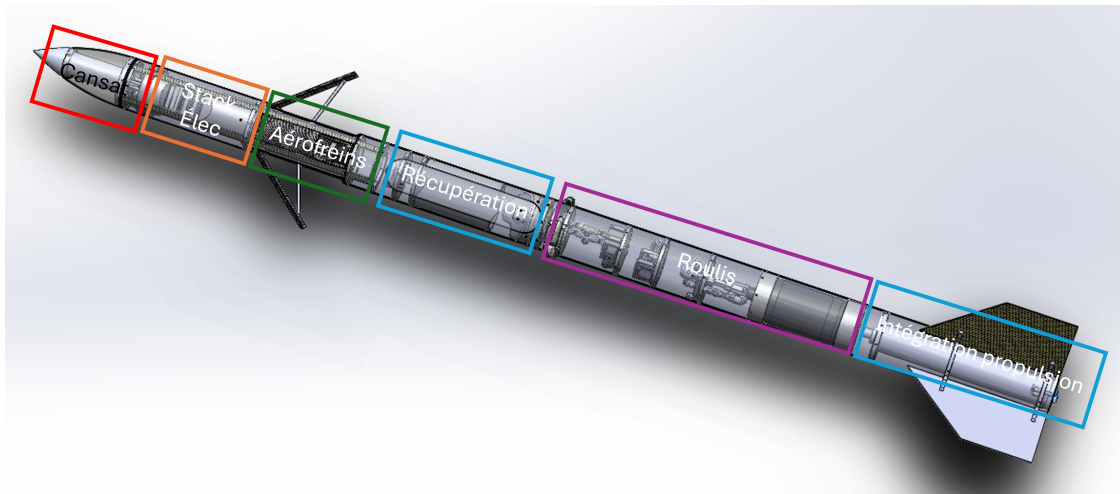


FIGURE 2.1 – Présentation des sous-systèmes sur Polaris

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. Comme expliqué précédemment, 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 début de l'année :

- Une équipe **Carbone** chargée d'expérimenter sur la fibre de carbone et de développer des protocoles
- Une équipe **Intégration Propulseur** chargée de réaliser la structure permettant d'intégrer le moteur dans la fusée
- Une équipe **Récupération** chargée de concevoir et fabriquer le mécanisme d'ouverture de la porte parachute, ainsi que de dimensionner et de fabriquer le parachute
- Une équipe **Contrôle de roulis** chargée de concevoir le système de contrôle de roulis par gaz froids
- Une équipe **Aérofreins** chargée de réaliser les aérofreins de la fusée
- Une équipe **Structure Interne** chargée de concevoir la structure interne de la fusée et de communiquer avec les sous-systèmes s'y intégrant
- Une équipe **CanSat** chargée de concevoir le système d'éjection du CanSat par le bout de la fusée.

### 2.1 Organisation temporelle et des ressources

Un rétroplanning pour la conception mécanique du projet a été réalisé, en tenant compte des réalités des teams élec et soft. De même, les vacances et les week-ends rush ont été pris en compte dans ce rétroplanning, permettant ainsi de le faire au plus près de la réalité.

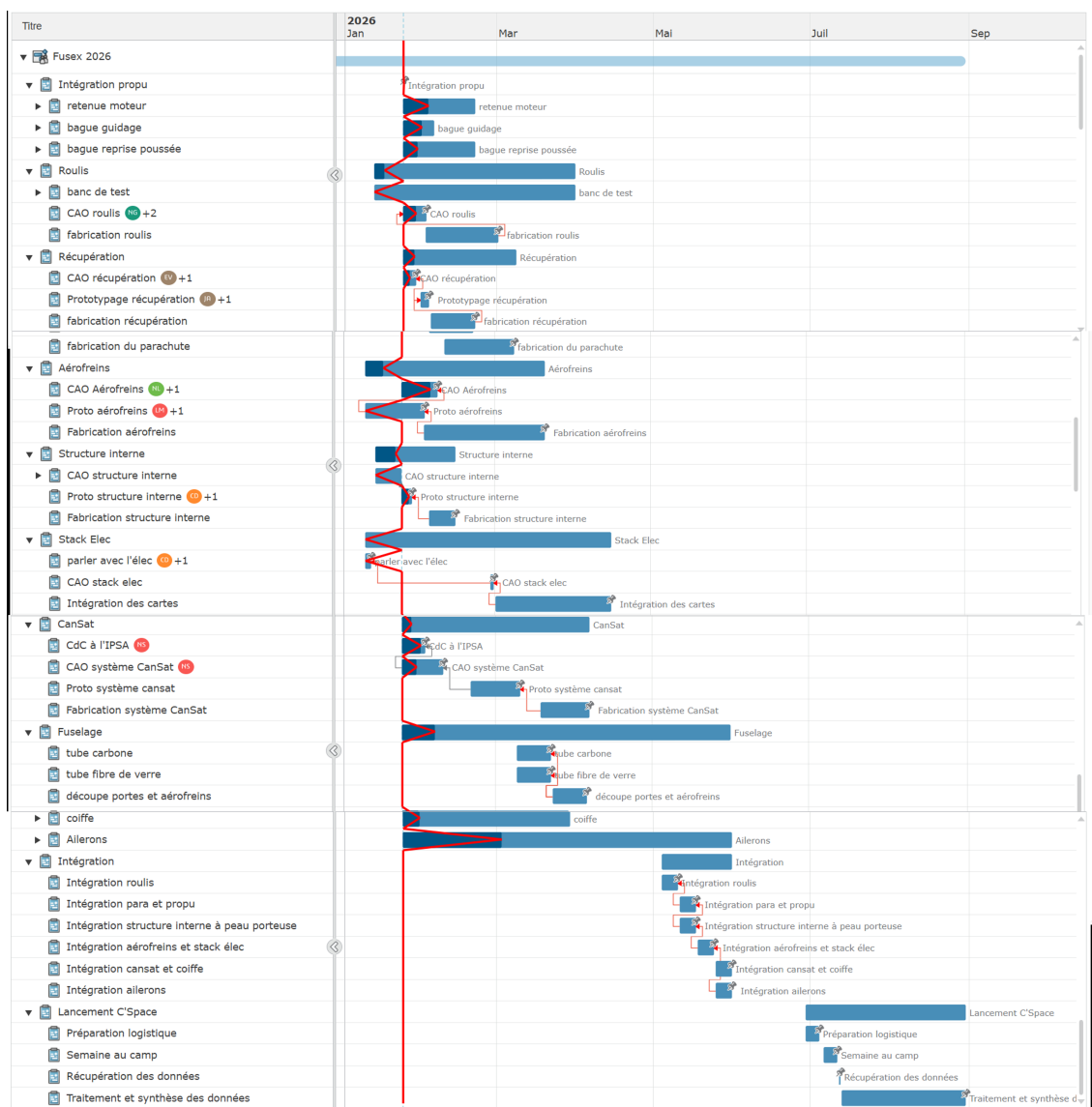


FIGURE 2.2 – Rétroplanning de la conception mécanique de la fusée

De plus, les tâches sont réparties par sous-systèmes, chaque personne étant assigné à un sous-système :

- **Carbone** avec Élie Dager, Julien François, Loïc Ronjon et Timothée Allmang
- **Intégration Propulseur** avec Mattéo Fortin et Grégoire Crappé
- **Récupération** avec Julia Argence et Emma Vassent
- **Contrôle de roulis** avec Neil Sherman, Quentin Frugier, Nolan Glotin et Antonin Marchant-Charnavel
- **Aérofreins** avec Naïs Leyronas, Luc Mariette, et Marin Vidal
- **Structure Interne** avec Côme d'Aramon et Matthieu Le Lidec
- **CanSat** avec Rayane Tahiri et Sacha Beau

## 2.2 Architecture générale

POLARIS est composée de deux parties : une peau porteuse et une structure interne (au niveau des aérofreins et de la coiffe). La fusée contient :

- un moteur
- une bague de reprise de poussée
- deux bagues de guidage dont une utilisée également comme retenue moteur
- le système de contrôle de roulis
- un parachute
- un système d'ouverture de porte

- le passage en structure interne
- les aérofreins
- un stack électronique
- une coiffe avec Cansat

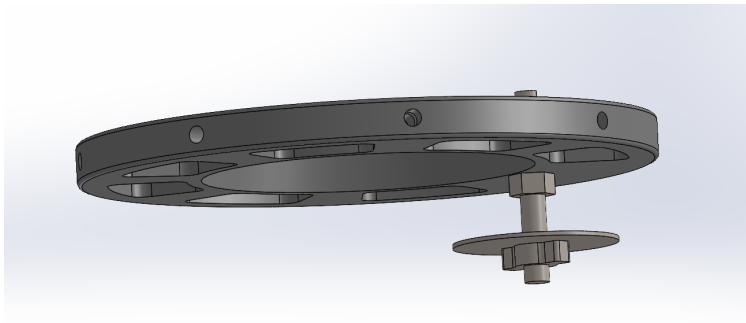
Toutes les bagues sont réalisées en aluminium 2024. Les ailerons sont prévus en carbone. Un parachute rond est prévu, afin d'obtenir une vitesse de descente de 10 m/s. Le parachute et le Cansat sont libérés à l'apogée.

### 2.2.1 Intégration propulsion

Le projet Polaris est équipé d'un Pro75. C'est un moteur fiable, et toutes les données sont disponibles dans les spécifications de propulsion.

#### Retenue moteur

**Objectif :** Moteur bloqué par un système réglable en hauteur.

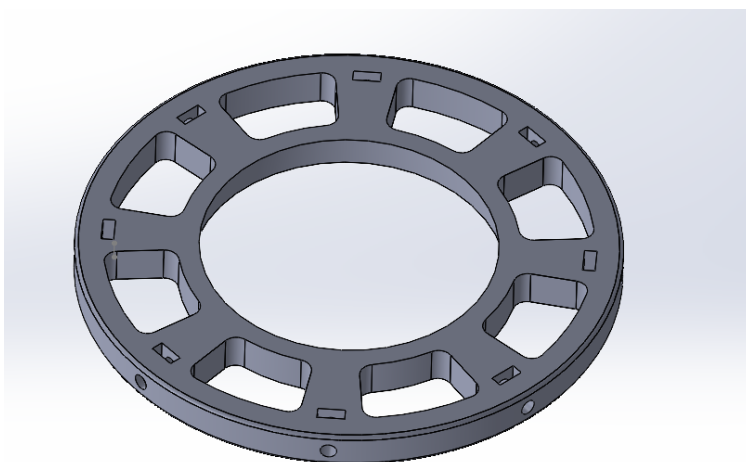


Suite aux retours de la RCE2 qui indiquaient que le système de retenue moteur pouvait être compliqué à manier avec les gants du pyrotechnicien, celui-ci a été révisé et simplifié.

Dorénavant, pour que le pyro puisse ajuster la bague de retenue en hauteur, il lui suffira de faire tourner une vis papillon présente sous une bague sur laquelle reposera le moteur.

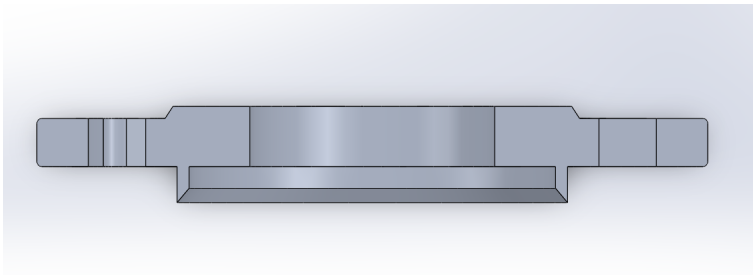
#### Bague de guidage

La bague de guidage servira aussi à fixer les équerres des ailerons. Réalisation en PETG.



On n'oublie pas le jeu fonctionnel de 1 mm. Un chanfrein a également été ajouté sur la partie intérieure de la bague pour faciliter l'intégration du moteur

Bague de reprise de poussée



**Objectif :** Réaliser la bague la plus légère possible tout en étant capable de résister aux forces requises par le cahier des charges (deux fois la force maximale exercée par le moteur, soit 2572N).

**Usinage :** Dans de l'aluminium 2024. Début à la jet d'eau dans du 20 mm, puis finition au tour. Passage à une épaisseur de 10 mm au centre.

**Etudes du comportement :** Nous avons pu étudier le comportement sous force de notre reprise de poussée via XpressStudy directement sur SolidWorks. Nous avons alors :

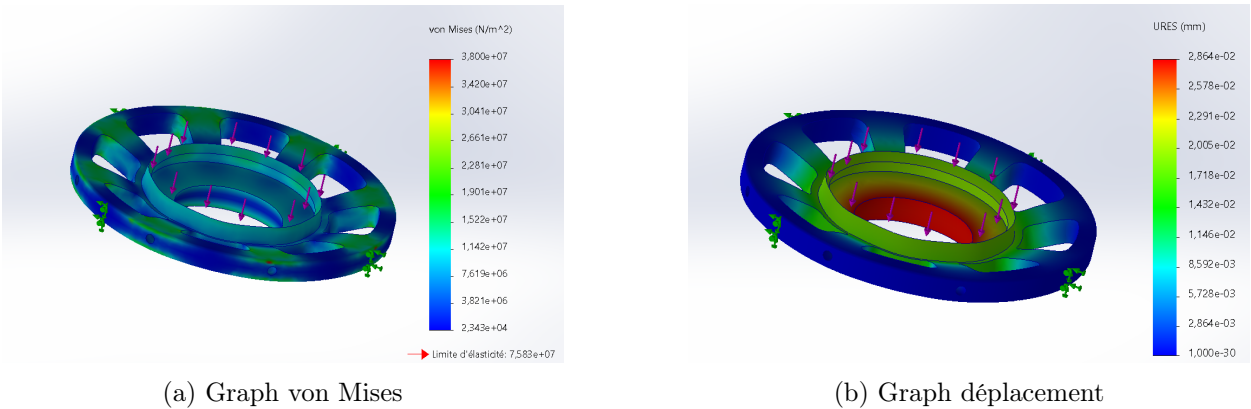


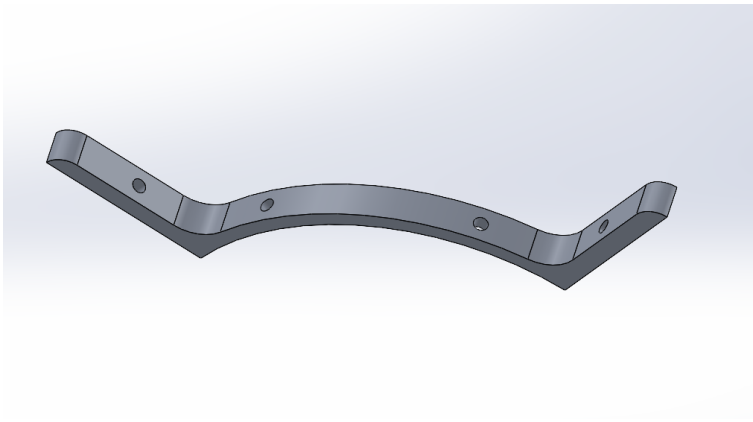
FIGURE 2.3 – Graphiques de l’étude Xpress | (à gauche) Contraintes et (à droite) déplacement

- Un déplacement maximal de 28,64  $\mu\text{m}$  au centre de la bague,
- Une contrainte maximale de 38  $\text{MN}/\text{m}^2$ , loin de la limite d’élasticité de 75,83  $\text{MN}/\text{m}^2$ ,
- Un coefficient de sécurité égal à 2 (par rapport à 2572 N).

Nos vis supportent environ 375 N par unité en cisaillement, la somme des huit supportant 3000 N, bien supérieur au cahier des charges qui requiert 2572 N au total. Par rapport à la RCE2, la bague fut amincie légèrement mais épaissie au centre où la contrainte est plus forte. Un chanfrein plus direct a aussi été ajouté pour faciliter d’avantage l’insertion du pro75 dans la fusée.

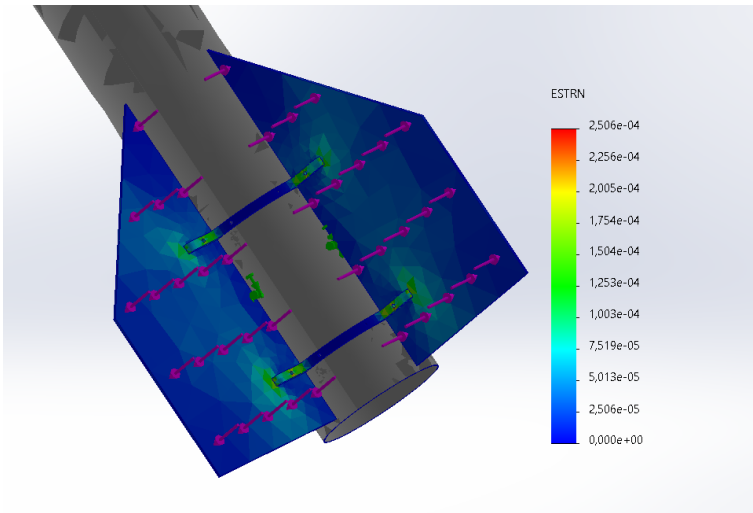
Équerres

**Objectif :** Réaliser des équerres légères et suffisamment résistante pour maintenir les ailerons droit.



Le choix de réaliser des équerres en forme de quarts de cercle permette une meilleure intégration. Il pourra notamment être possible de fixer tous les ailerons entre eux avec les équerres, avant des les enfiler sur le tube de la fusée.

Des simulations ont été réalisé afin de vérifier la solidité des équerres. On observe que les équerres supportent bien une force de 150 N appliquée sur les ailerons.



### 2.2.2 Récupération

La récupération s’occupe de l’élaboration du système d’éjection du parachute et de la conception du parachute. L’enjeu est le bon déploiement de ce dernier et sa libération au moment voulu pour assurer une descente sûre et contrôlée de la fusée. Pour l’ensemble des pièces imprimées pour la récupération, nous avons choisit un remplissage de 20% avec du filament en PETG.

#### Système d’ouverture porte

**Objectifs :** Le système d’ouverture de la porte est crucial pour la validation du lancement de la fusée. Il fait partie de la chaîne de récupération. Sans lui, pas de lancement.

Système de herse (double goupille) relevé par le servomoteur. Pour Pegasus, le système est déjà très mature (double nominal), même s’il restait un peu d’optimisation sur une pièce qui avait tendance à casser, surtout si le set-up n’était pas correct au moment de fermer la porte. Nous avons renforcé la pièce en lui donnant une forme triangulaire qui supporte mieux les efforts reçus sur les côtés.

Le système d’ouverture de la porte 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 et ne pas relâcher un déchet, ce qui est interdit par le cahier des charges.

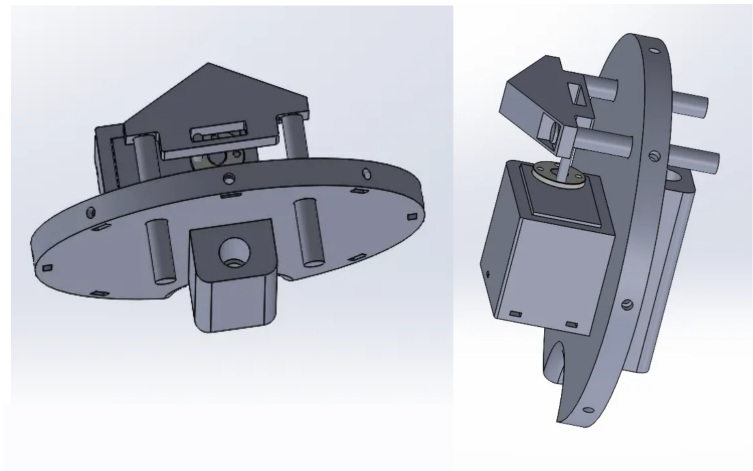


FIGURE 2.4 – Système d’ouverture de la porte sans bélier

Le parachute fait partie de la chaîne de récupération de la fusée. C’est un des points cruciaux pour le succès du lancement.

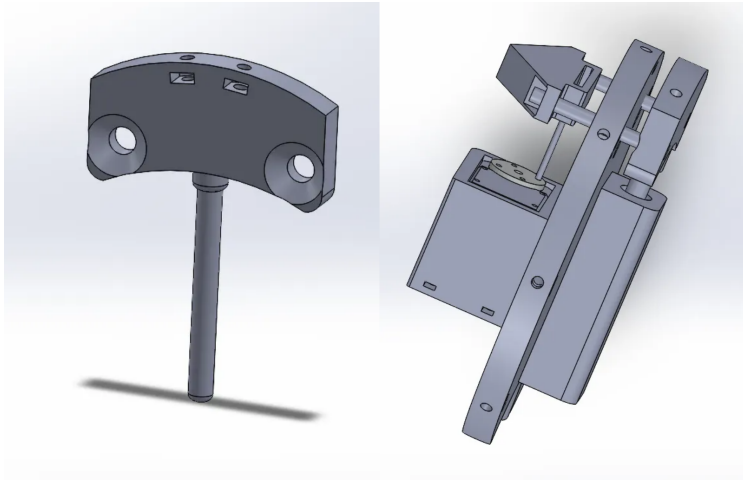


FIGURE 2.5 – Système d'ouverture de la porte avec bélier

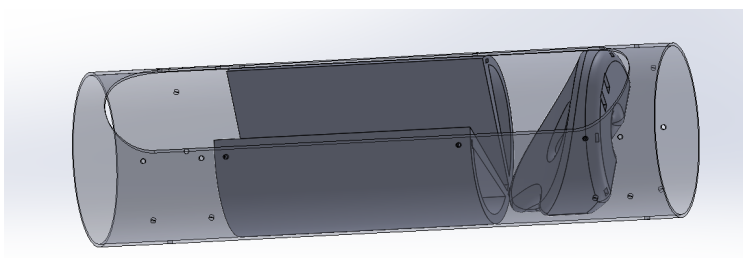
### Casing parachute

**Objectifs :** Le but est de créer une enveloppe dans laquelle se logent la voilure et les suspentes du parachute. Cela permet de guider le parachute lors de la sortie et de garantir qu'il ne s'accroche nulle part.

Le diamètre étant trop grand, le parachute flotterait à l'intérieur. On va donc réduire cet espace à l'aide d'une case parachute. Elle comportera une pièce principale dotée de pentes et également une bague dont la fonction principale est le calage de la porte mais qui aidera à l'orientation du parachute vers la sortie .

Cette pièce sera principalement réalisée en impression 3D, car les efforts mécaniques sont quasiment nuls. La pente parachute devra être intégrée à cette pièce : elle sert à faire descendre le parachute hors de la fusée, afin qu'il ne reste pas coincé. Il faudra prévoir, a priori, une petite bague en métal en dessous pour ancrer le parachute à la fusée. La case comporte également de petits supports pour la porte afin de garantir une bonne étanchéité, tout en veillant à ne pas réduire trop l'ouverture pour le parachute.

Pour que le parachute sorte correctement, il est recommandé d'utiliser des techniques de démoulage, typiquement des angles de dépouille. En pratique, le casing doit ressembler à un U avec des angles sur les parois. Comme le parachute est bien comprimé et cherche à se détendre, il pousse sur les parois, et les angles facilitent sa sortie spontanée. Des élastiques sont également très utiles pour le propulser davantage.



Un point important qui vient avec le casing est le pliage du parachute. Au C'Space de l'an dernier, des professionnels de chez ArianeGroup, qui venaient lancer la fusée Diamant, nous ont appris à le faire, et nous avons obtenu une super vidéo, que l'on peut visionner à tout moment pour apprendre la bonne technique.

### Accroche parachute

Lorsque le parachute est déployé, il va subir de grands efforts. Pour éviter qu'il s'arrache, il faut premièrement bien l'avoir conçu, et ensuite avoir une pièce assez solide sur laquelle le fixer.  
**Usinage :** pièce en aluminium usinée à la découpe jet d'eau.



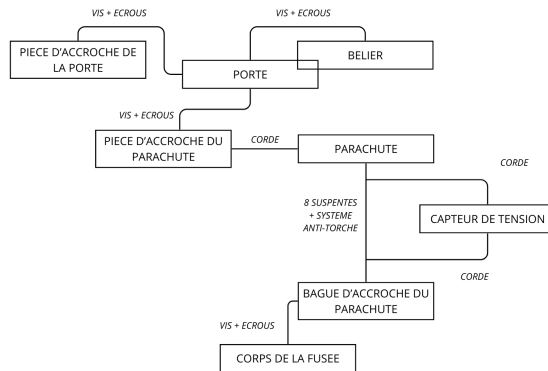
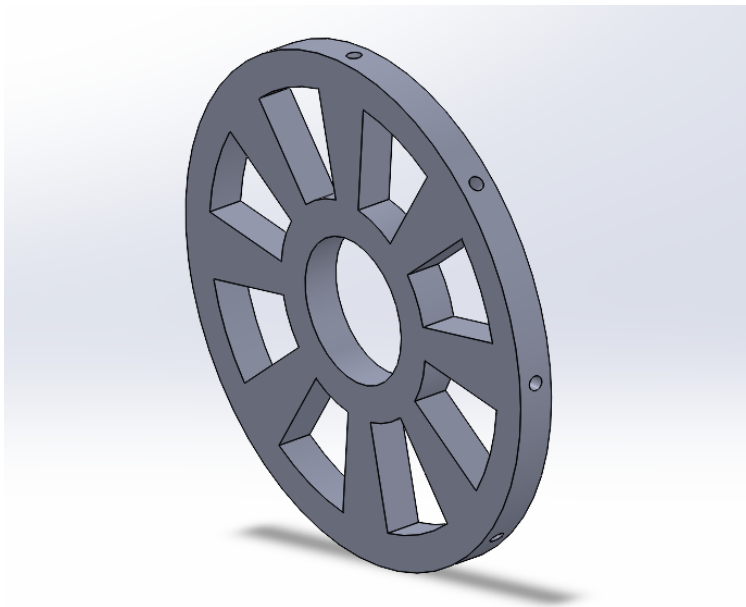


FIGURE 2.6 – Diagramme de fixation du parachute à la fusée



Pour cette pièce, il faut faire attention. Il faut qu'elle soit suffisamment solide pour tenir le choc d'ouverture des paras, et il faut également faire attention à ce qu'elle ne soit pas tranchante. En effet, il vaut mieux éviter qu'une pièce en métal coupe la corde du para. On limera toutes les arêtes tranchantes des bagues de reprise de poussée afin de s'en assurer.

## Parachute

**Objectifs :** Il faut dimensionner le parachute de sorte qu'il garantisse une vitesse de descente de 8 m/s.

En effet, le C'Space impose une vitesse de descente comprise entre 5 et 15 m/s. 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, nous pouvons calculer la vitesse finale, ainsi que l'effort exercé sur le parachute.

On souhaite également repérer la fusée lorsqu'elle descend pour pouvoir la récupérer une fois qu'elle a atterri. Nous choisirons donc une couleur voyante pour la toile qui ne se confond pas avec la couleur du ciel, des nuages ou celle des feuilles / arbres.

La vitesse de descente de la fusée est donnée par la formule suivante :

$$v_d = \sqrt{\frac{2 M g}{\rho_0 C_x S}}$$

Où :

- $M$  : la masse de la fusée en kilogrammes avec un propulseur vide ,  $M = 16,5$  kg
- $S$  : la surface du parachute déployé
- $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
- $\rho_0 = 1,3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

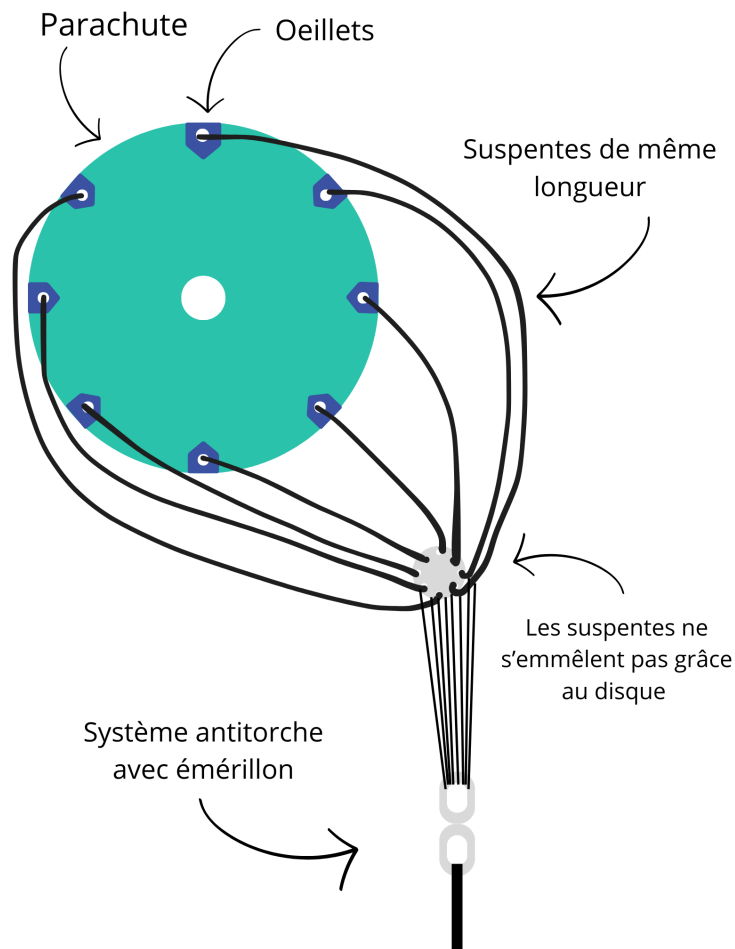


FIGURE 2.7 – Schéma du parachute

- $C_x = 1$

La surface du parachute en fonction de la vitesse de descente est donc :

$$S = \frac{2 M g}{\rho_0 C_x v_d^2}$$

Et pour avoir pour avoir  $v_d = 9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , il faut une surface du parachute  $S = 3,07 \text{ m}^2$

Nous avons opté pour le format circulaire. Le parachute sera tenu par 8 suspentes de longueur égale devant supporter chacune une force égale. Les calculs doivent être fait en supposant que seules 75% des suspentes fonctionneront à l'ouverture, on obtient donc les calculs suivants :

$$\frac{2 \times 2 \times F}{\text{Nombre de suspentes}} = \frac{2 \times 2 \times 2852.6}{6} = 1901.7N$$

avec F, la force maximale à l'ouverture :

$$F = 0.5 \times 1.3 \times \text{Surface} \times V_{\text{apogee}}^2 = 0.5 \times 1.3 \times 4.03 \times 33^2 = 2852.6N$$

La référence des suspentes retenues est ci-dessous : <https://www.franceparacord.com/products/paracord-550-black-2> Ce sont des suspentes utilisées par l'armée américaine résistant à 1920N en traction.

La référence de la ligne de suspension est <https://www.franceparacord.com/products/paracord-750-electric-blue> De même, cette corde résiste à 3400N. Les cordes utilisées sont donc compatibles avec les chocs endurés, en prenant en compte le coefficient de sécurité.

Les trous permettant la liaison entre les suspentes et le parachute seront renforcés par des œillets. La présence du trou dans le parachute permet un écoulement d'air stable autour de ce dernier qui stabilise son axe.

La sangle est relié à une bague d'aluminium de 10mm d'épaisseur conçu pour résister au choc d'ouverture. L'émérillon a aussi été choisi en ce sens.

**Réalisation :** Nous avons cousu le parachute avec du fil en polyester à haute ténacité (<https://www.lefildevosidees.com/132-144-fil-a-coudre-materiaux-souples-coutures-fines.html#>

/30-conditionnement-cone\_5000m). Le rayon extérieur du parachute est de 1 m et le rayon intérieur est de 20 cm :



FIGURE 2.8 – Photo du parachute

Le système d'éjection est muni de deux élastiques permettant la bonne éjection du parachute :



FIGURE 2.9 – Photo du système d'éjection

### 2.2.3 Ailerons

On utilise des plaques de carbone de 3 mm, qui supportent même les gros efforts.  
Données :

- Matière : Carbone
- Masse : 482g
- Surface : 85469 mm<sup>2</sup>

Selon le CdC, ceux-ci sont censé résister à une force longitudinale de 84N, et ne forlmer une flèche de seulement 10° sous 205N transversalement.

Nous utiliserons des équerres en aluminium. Leur fabrication se fait très bien à la jet d'eau et à l'usinage avec guides et perceuse à colonne. Nous tarauderons directement l'équerre (attention : ne tarauder qu'un seul côté sur les deux, sinon cela ne sert à rien).

Les équerres seront réalisées de sorte à constituer un bloc aileron que l'on glisse sur le tube et que l'on fixe avec huit vis, ce qui simplifiera grandement le montage.

De plus, la position précise de ces ailerons est une fonction du centre de masse, qui ne peut être déterminé que lorsque la structure interne et le tube seront entièrement finis. Pour cette raison, la fixation et la forme des ailerons sera l'une des dernières étapes de l'intégration sur le corps externe de la fusée.

Maintenant que toutes les pièces ont été usinées, nous sommes capable de déterminer le centre de masse et donc la position et la forme des ailerons afin d'assurer la stabilité de notre fusée.

Nous réalisons nos ailerons provisoires en aluminium que nous découpons à la CNC 2 axes.

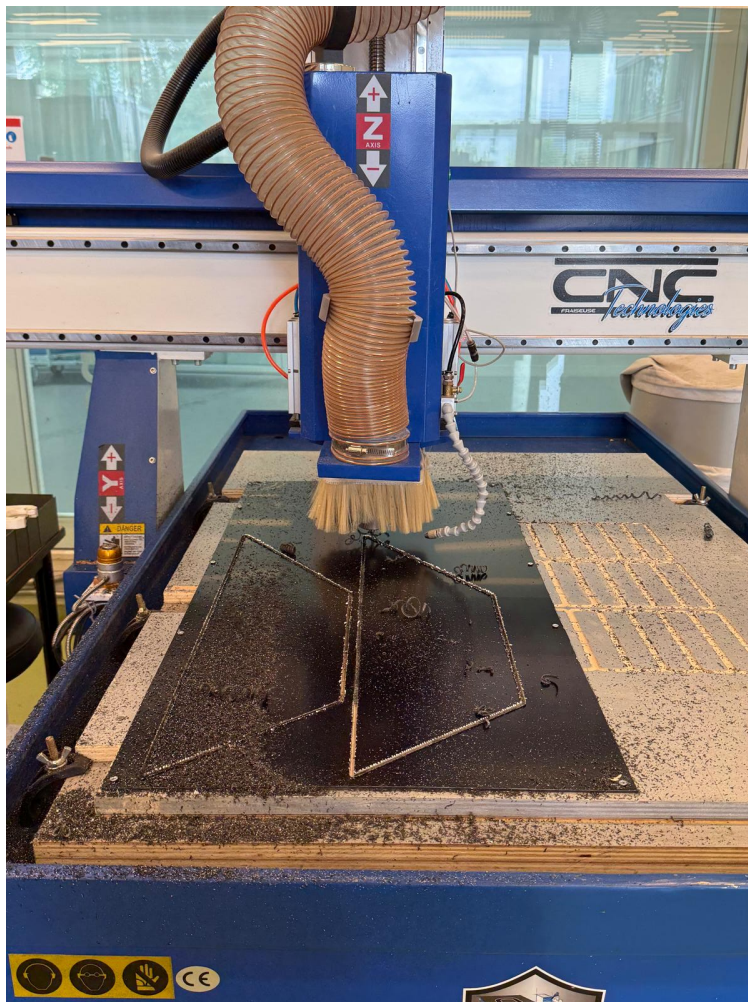


FIGURE 2.10 – Photo de la découpe des ailerons

#### 2.2.4 Coiffe

La coiffe accueille le CanSat. Après recherche, nous avons retenu pour forme l'ogive tangentielle. Il s'agit du meilleur compromis entre l'aérodynamisme et la faisabilité.

Nous avons cependant besoin que le Cansat traverse la coiffe. Pour cette raison et pour des question de réalisation, nous avons décidé de couper la coiffe à partir d'une certaine distance et de remplacer la pointe par une pointe usinée en aluminium et solidaire du Cansat. Contrairement à l'année dernière où elle était imprimée en PETG, nous avons cette année comme ambition de l'usiner en fibre de verre. Ce matériau est plus rigide et plus lisse ce qui diminue la traînée. De plus, il est plus résistant à la température contrairement au PETG qui commence à se ramollir à partir de 80°C.



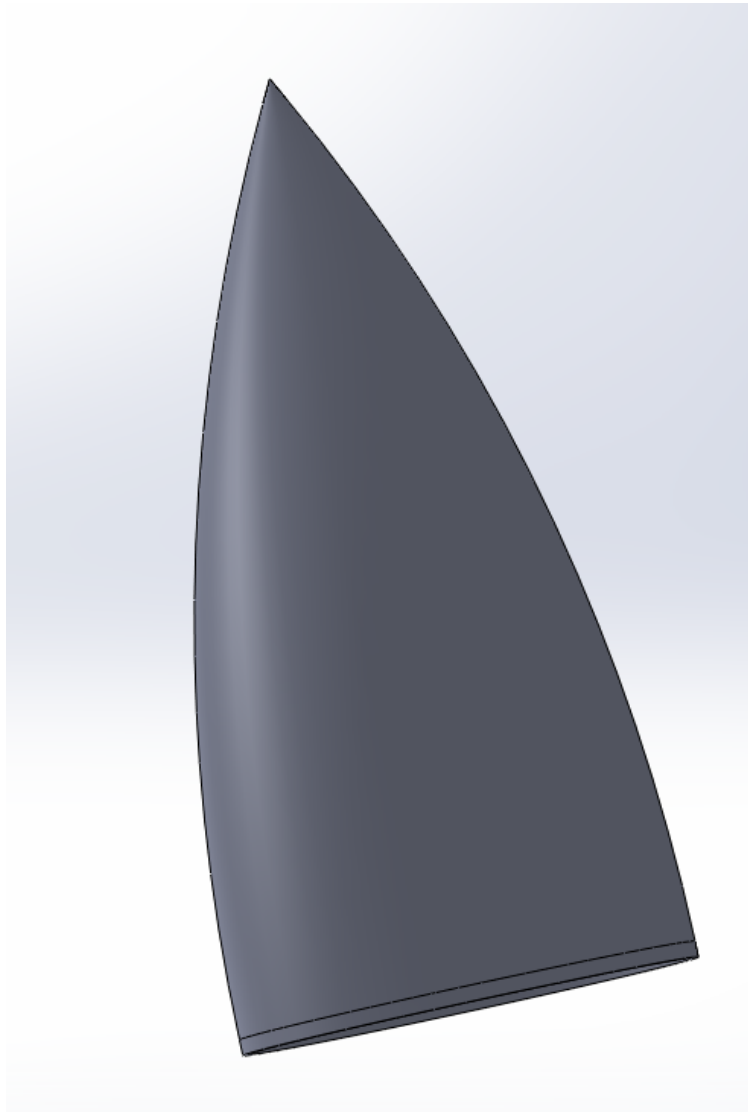


FIGURE 2.11 – Image en CAO de la coiffe

Afin d’avoir un rendu de qualité maximale et avec une surface la plus lisse possible, nous avons opté pour un moulage sous vide.

Le moulage sous vide ou par dépression ou « au sac » est un procédé de mise en forme par moulage de pièces en matériaux composites.

Le mode opératoire est le même que le moulage au contact sauf que la stratification est mise sous vide par la suite à l’aide de consommables drainants, d’une bâche étanche, de joints, de tuyaux et d’une pompe à vide. On obtient alors un composite de meilleure qualité qu’avec le moulage au contact, dans lequel le taux de fibre est supérieur car l’excès de résine est aspiré par la dépression créée lors de la mise sous vide. On obtient un résultat final avec une qualité de surface supérieure.

Mode opératoire pour la coiffe

Dans un premier temps, nous appliquons de manière uniforme un agent démoulant liquide sur le moule interne.

Le moule interne est présenté ci-dessous.

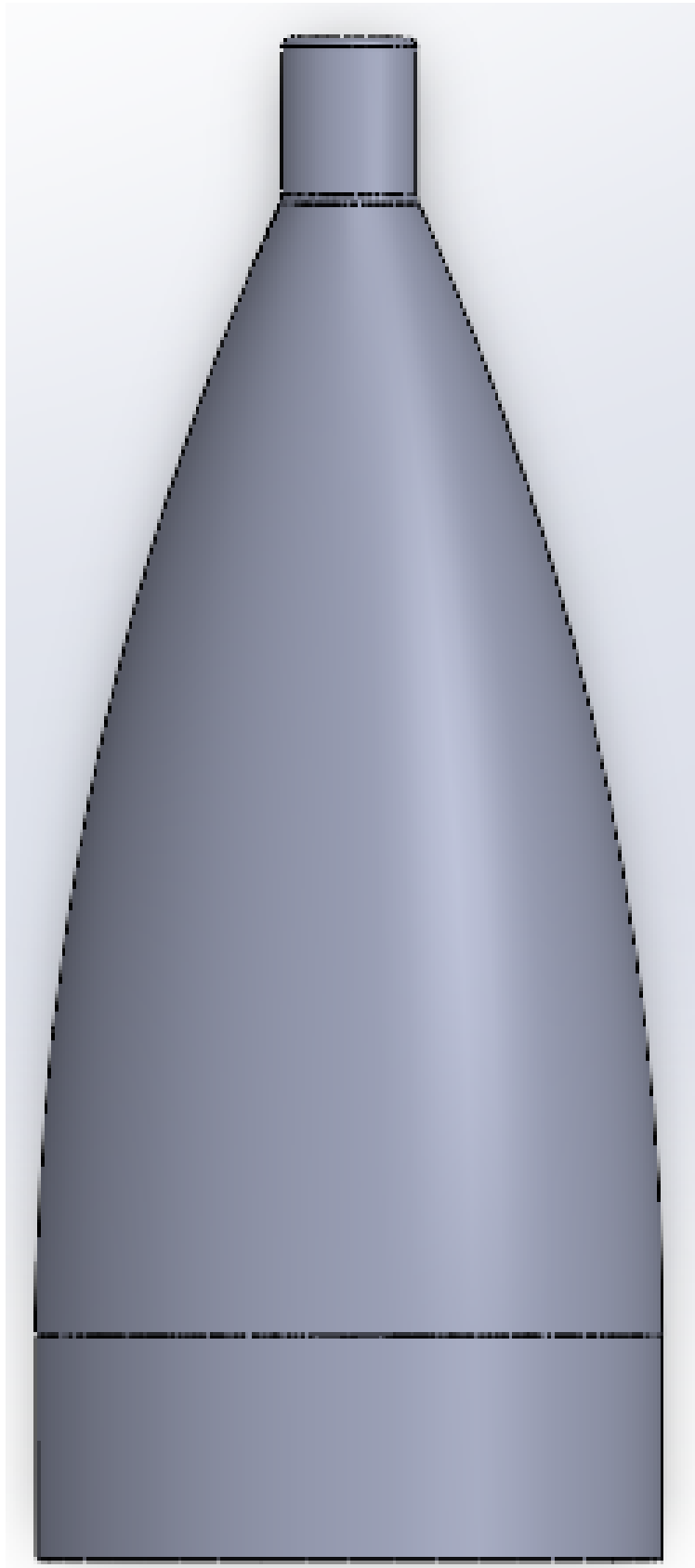


FIGURE 2.12 – Image en CAO du moule interne de la coiffe

Dans un deuxième temps, nous enfilons un manchon de fibre de verre tissée avec un motif en taffetas. Choisir ce type de tissus permet d’avoir une bonne isotropie et nous permet de réduire les coûts.

Dans un troisième temps, nous appliquons de la résine époxy uniformément à l’aide d’un pinceau. Nous ajoutons trois épaisseurs de fibre de verre.

Nous allons ensuite mettre le moule et les trois épaisseurs de fil dans un sac et utiliser la technique de moulage sous vide décrite précédemment.

Dans un quatrième temps, nous démoulons ce moule interne puis nous rajoutons deux épaisseurs de fibre de verre. Si nous faisons les 5 en même temps, le moule interne est trop comprimé et rend le démoulage impossible. Après ajout des deux dernières couches, nous répétons le procédé de moulage sous vide.

Si besoin, nous ponçons l’excédant d’époxy.



FIGURE 2.13 – Photo du ponçage

Cette méthode n’a pas aboutit à cause d’un manque de matériau. Nous n’avons pas réussi à trouver des manchons de fibre de verre ni même de carbone dans les dimensions souhaitées.

La seconde option consistant à juste enrouler un tissu classique de fibre de verre autour de notre moule ne nous paraissait pas être concluante car cela aurait pu induire une rotation parasite à la fusée.

La troisième idée consistait à faire un patron de la forme de coiffe en 2D puis de l’aposer sur notre moule. Cela n’a pas fonctionné à cause de la forme particulière de la coiffe. Nous avons aussi la crainte d’avoir trop de problème du au effets de bord et aux découpes lors de la réalisation finale.

Nous avons donc opté pour la même méthode que l’année dernière qui est d’imprimer une coiffe en PETG. La forme reste celle prévue initialement l’ogive tangentielle.

Nous avons séparé sur la CAO la partie haute qui sera usiné en alluminium et sera solidaire du cansat et la partie basse. La partie basse possède un petit renflement dans lequel il sera possible d’insérer la peau aérodynamique en fibre en verre et de la visser pour une meilleure étanchéité.

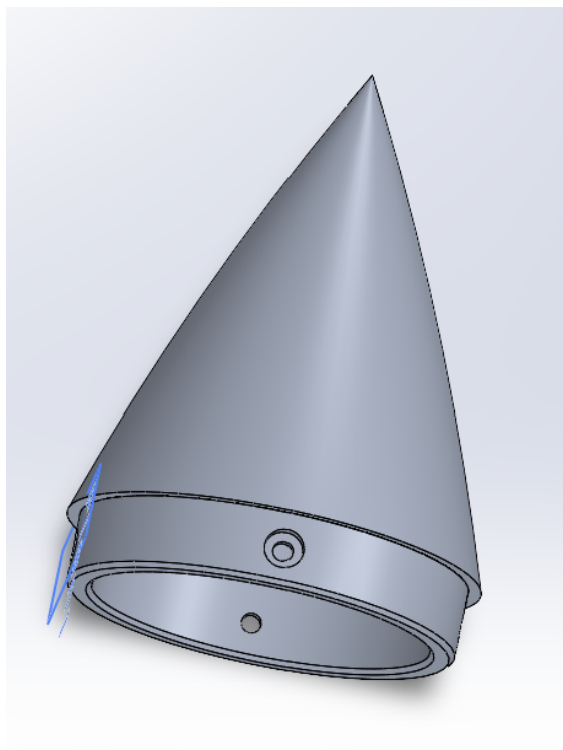


FIGURE 2.14 – CAO de la partie haute de la coiffe

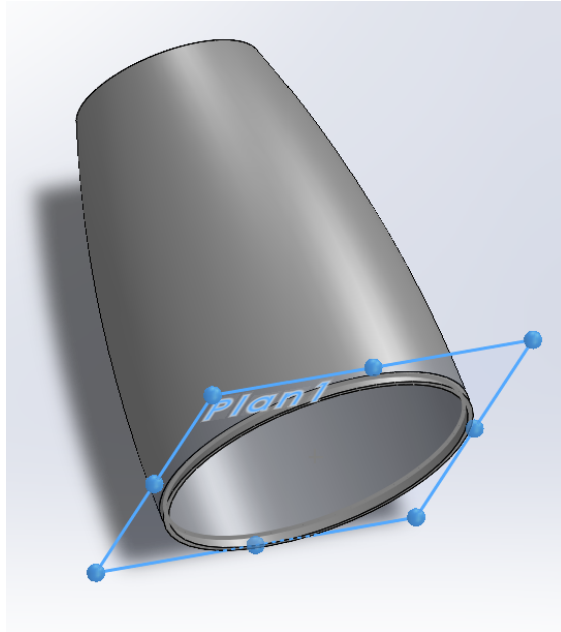


FIGURE 2.15 – CAO de la partie basse de la coiffe

### 2.2.5 Structure externe (tubes)

La méthode et le protocole de fabrication des tubes en carbone sont très complexes ; mais maîtrisés par le Pôle Espace depuis plusieurs années.



FIGURE 2.16 – Photo d'un prototype de tube en fibre de verre

L'objectif est la conception et l'usinage du corps de la fusée. Cette structure externe doit vérifier plusieurs critères, à savoir : aérodynamisme, légèreté et une forte résistance. En effet, pour vérifier



un test de flèche ou un vol efficace, la fusée doit pouvoir résister à des contraintes de poids et de rigidité.

Le tube en carbone fera donc 140mm de diamètre interne, avec 5 couches de fibre de carbone, ce qui fera 145mm de diamètre extérieur.

L'usinage du corps de la fusée repose sur une variété de matériaux. Entre autres, nous utilisons du composite et de l'époxy. Les couches de carbone forment une grande partie du tube, seule la partie supérieure sera usinée en fibre de verre pour permettre la communication avec l'élec. En effet, la fibre de carbone est conductrice ce qui empêche le passage des ondes électromagnétiques (phénomène de cage de Faraday), contrairement à la fibre de verre qui est isolante. Nous effectuons ce processus de moulage en deux temps ce qui permet une meilleure adhérence des matériaux.

L'usinage des tubes en fibre de carbone et en fibre de verre est réalisé à partir du même procédé.

On part d'un moule intérieur (i.e un tube en PVC dont le diamètre extérieur correspond au diamètre intérieur du tube que l'on souhaite réaliser) et on le recouvre d'un agent de démoulage solide, ensuite on recouvre le tout d'une première couche d'époxy (mélange de résine époxy et de solidifiant), puis on commence à enrouler le tube avec la fibre que l'on utilise pour le tube, en s'assurant de bien la recouvrir d'époxy à chaque endroit.

De surcroît on s'assure lors de l'enroulage de la fibre de carbone sur le moule qu'aucune bulle d'air ne s'infiltre durant le procédé pour ne pas avoir de faiblesse dans la structure. Lorsque l'on a réalisé 3 couches, on met en pause le procédé et on laisse le tube reposé pendant 24h tout en faisant tourné le tube sur lui même, sur son axe de la hauteur, pour éviter la formation d'irrégularité (cette étape est réalisé pour éviter que trop de couche soit réalisé en même temps et donc de réduire le phénomène de compression des fibres sur le tube lors du séchage qui peut être à l'origine d'une impossibilité de démouler le tube).

On finit le tube en réalisant les couches supérieures, enfin lorsque l'on a enroulé 5 couches de fibres autour du moule, on enroule autour de notre tube un ruban thermorétractable que l'on chauffe pour enlever l'excès de résine dans le tube en construction et on laisse sécher le tube tout en le faisant tourné régulièrement.

Après avoir laissé sécher pendant plusieurs heure que le tube durcisse, on le démoule en retirant le ruban thermorétractable et en enlevant le tube du moule simplement grâce à l'agent démoulant, on termine la réalisation du tube en limant et ponçant les irrégularités apparentes et les bords.



FIGURE 2.17 – Photo du procédé d'usinage du tube

Ces choix sont pertinents puisque le carbone est particulièrement connu pour sa faible masse mais peut causer des interférences au niveau du stack électronique car il crée une cage de Faraday.

Ainsi, nous utilisons de la fibre de verre dans cette zone pour palier à ce problème. Nous ajoutons uniquement 2 couches de fibre de verre car à ce niveau, les contraintes sont faibles et demandent donc une plus faible résistance. Le motif du tissus de nos fibre est le taffetas. Choisir ce type de motif permet d'avoir une bonne isotropie du rendu final.

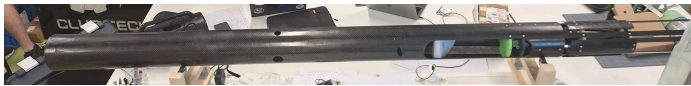


FIGURE 2.18 – Photo du tube final percé et troué

Voici le tube final, percé et troué pour l'intégration des différents systèmes.

Le tube en fibre de verre a également été achevé percé et troué selon le modèle de la CAO suivante.

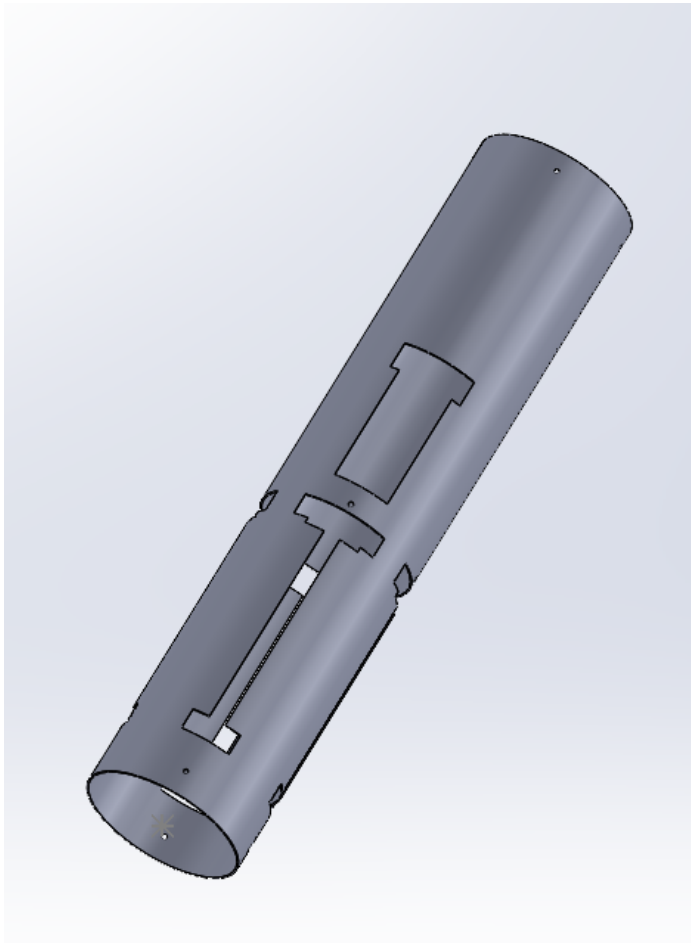


FIGURE 2.19 – CAO du tube en fibre de verre

Ce qui donne comme résultat une fois terminé et les systèmes intégrés :



FIGURE 2.20 – Photo du tube en fibre de verre post-intégration

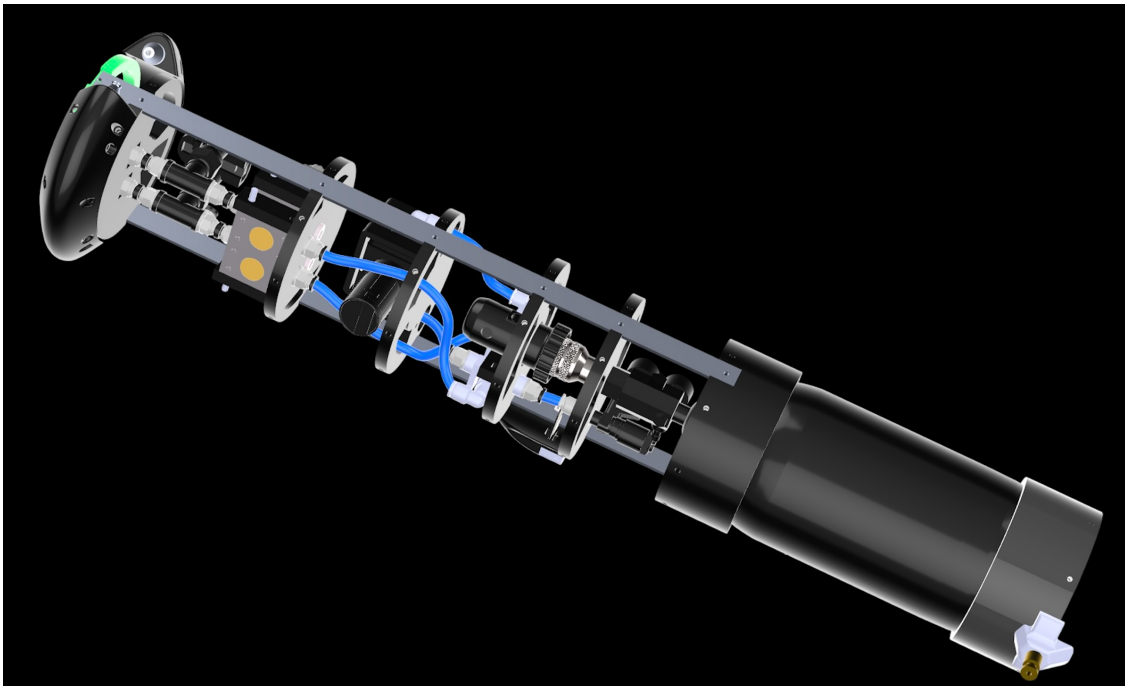
Le tube en fibre de verre n'étant qu'une peau aérodynamique, elle ne comporte que trois épaisseurs contre cinq pour le tube en fibre de carbone. Cette différence d'épaisseur a pour conséquence, une variation brutale du diamètre de la fusée en son centre ce qui peut mener à un coefficient de trainé plus grand et à des problèmes aérodynamiques.

Pour résoudre ce problème, nous avons réalisé une bague de jonction des deux tubes afin d'avoir une transition plus fluide et ne créant pas de rupture du point de vue du flux d'air. La CAO de cette dernière est la suivante.



FIGURE 2.21 – CAO de la bague de jonction des deux tubes

### 2.2.6 Contrôle de roulis



Le contrôle de roulis est un nouveau système complexe dans Polaris que le Pôle Espace n'a encore jamais abordé. Cette année, on a décidé de le faire par expulsion de gaz froid.

Cela permet d'éviter des problèmes de saturation qu'on pourrait rencontrer avec une roue inertielle en phase atmosphérique.

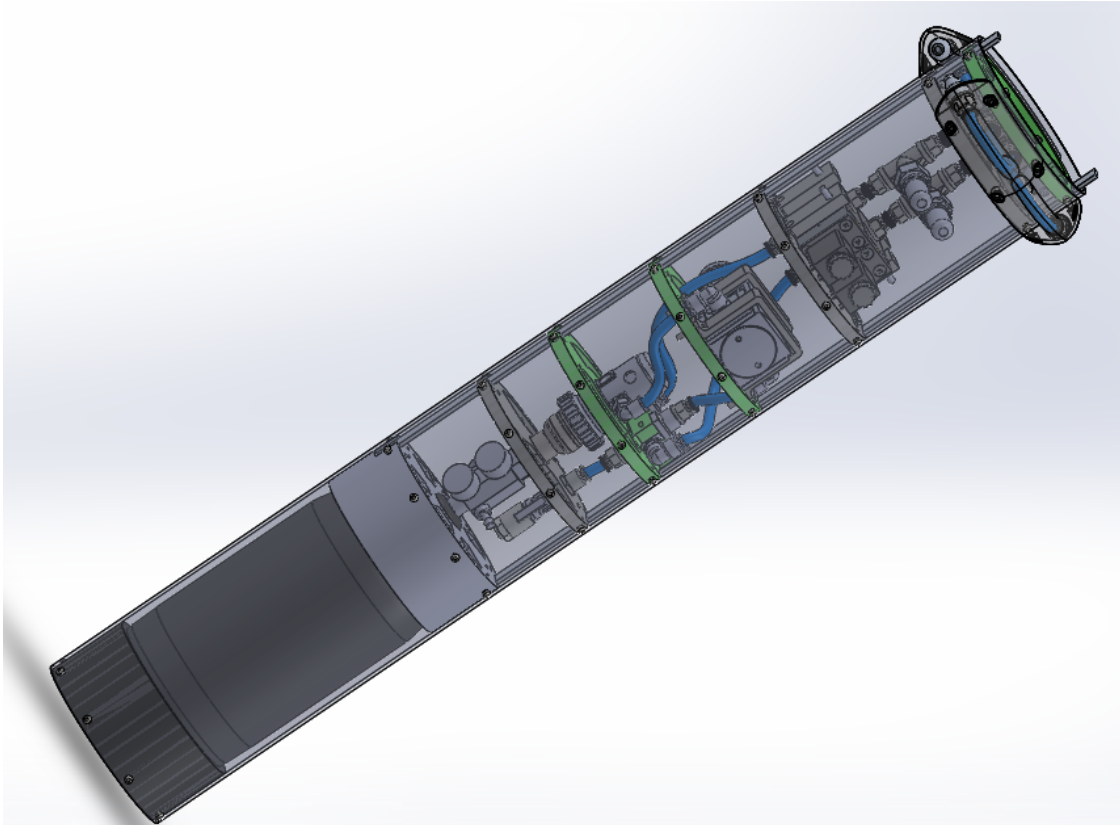
Le système pneumatique est composé de plusieurs parties :

- ⇒ Une partie haute pression (montant à 150 bars, dérogation acceptée par commission technique) qui sert à stocker l'air, remplir le système ainsi que le détendre jusqu'à 8.5 bars.
- ⇒ Une partie basse pression, un réseau à 10 bar avec deuxième détendeur réglable et un jeu de distributeurs et de RCS pour contrôler le roulis.

Ce système a été placé proche du centre de gravité pour éviter un contrôle de tangage/assiette non voulu, dû au fait que l'alignement ne sera jamais parfait.

L'idée est la suivante : une bonbonne de gaz froid ne dépassant pas  $P = 150$  bars est reliée d'abord à un système de remplissage par compresseur, puis à des raccords menant à un premier étage de plongée permettant de détendre le gaz de 150 bars à 8,5 bars (sortie moyenne pression).

Des pneumatiques sortent ainsi dans un deuxième étage de pression d'entrée inférieure à 16 bars modulables : la sortie, entre 0 et 10 bars, est donc la pression d'entrée des tuyères. Les pneumatiques se divisent alors en deux, un par sens de rotation (horaire et anti-horaire). Ceux-ci sont reliés à une électrovanne chacun, permettant l'ouverture-fermeture du débit de gaz froid. Il y a ensuite de nouveau une division par deux, pour relier à deux tuyères par direction, donnant 4 tuyères en tout disposées à 90 degrés autour du centre de masse de la fusée pour ne pas le changer et conserver la stabilité. Les tuyères, éjectant le gaz tangentiellement à la fusée, permettent une rotation de celle-ci, et ainsi un contrôle du roulis. Les tuyères sont maintenues par un soutien extérieur à la fusée.



Pour faciliter l'intégration, notamment au niveau des flexibles qui ne doivent faire d'angle au risque de changer le débit, nous avons opté pour un système de longerons, qui permettent d'assembler et modifier le contrôle de roulis à l'extérieur de la fusée puis simplement de le glisser dedans.

### Ordre de modélisation

Pour déterminer la pression nécessaire dans notre bonbonne, nous avons procédé dans l'ordre suivant. D'abord, un état de l'art du roulis nous fournit la vitesse angulaire usuelle des fusées au C'Space. Nous en déduisons la poussée dans chaque tuyère via le théorème du moment cinétique, ce qui impose un débit dans la tuyère car  $F = D_m v_{sortie}$ , ce qui impose un débit en sortie de bonbonne, qui à son tour impose une certaine masse si on impose un fonctionnement pendant 14s, ce qui, par la loi des gaz parfaits, impose finalement une pression de bonbonne.

### Calculs de Couple

Pour dimensionner le contrôle de roulis, nous nous sommes basés sur les études de roulis qui ont déjà été faites au C'Space pour en déduire un couple résiduel lié aux ailerons pour avoir un système capable de contrer ce roulis. Après conversation avec différentes équipes, nous avons décidé de considérer une vitesse angulaire  $\Omega$  de roulis naturel de la fusée de 7rad/s. C'est une vitesse élevée qui nous mène à surdimensionner le système, mais nous pourrions toujours diminuer la poussée en changeant la pression d'entrée ou le diamètre du col de la buse si nous réalisons qu'il nous faut une poussée plus petite.

Considérant une accélération constante, une inertie calculée  $J$  via Solidworks et un temps de propulsion du moteur  $t_{propu}$  de 4.5s, on peut en déduire un couple résiduel  $C_{perturbation}$  de la fusée. On considère une perturbation uniforme et une vitesse angulaire atteinte après un certain temps.

Ensuite, si nous supposons que le temps de rétablissement de la fusée  $t_{stab}$ , soit le temps nécessaire à la stabilisation du roulis, est d'environ 1.1s, nous pouvons calculer le couple de la fusée  $C_{fusee}$  induit par cette stabilisation. Le couple que le roulis  $C_{roulis}$  doit créer pour contrôler cette rotation étant la somme des deux autres, nous pouvons en déduire la poussée théorique nécessaire dans chaque tuyère, en supposant le bras de levier  $L = 8cm$  (distance entre l'axe de la fusée et la tuyère)



connu. En effet, puisque l'on a deux directions et deux tuyères par direction,  $C_{roulis} = 2F_{tuyere}L$ . On obtient alors

$$2F_{tuyere}L = C_{roulis} = C_{perturbation} + C_{fusee} = \frac{\Omega J}{t_{propu}} + \frac{\Omega J}{t_{stabilisation}}$$

On en déduit alors la force théorique nécessaire. L'application numérique donne 3,81N par tuyère. Nous avons choisis d'aller un peu au-dessus pour être surs, soit un choix de 4,32N. Ci-dessous un Excel avec les résultats théoriques de couple et de poussée nécessaires dans la colonne 'Modèles de Force'. Les résultats sont présentés dans la colonne 'Tuyère'.

| Tuyère              |                        |         | Modèles de Force                   |                                    |         | Bonbonne                  |         | Roulis Opérationnel                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |
|---------------------|------------------------|---------|------------------------------------|------------------------------------|---------|---------------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Catégorie           | Grandeur               | Valeur  | Variables d'entrée th              | $\Omega_{theorique}(\text{rad/s})$ | 7,000   | m_b(kg/s, debit bonbonne) | 0,021   |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
| Constantes          | $\rho(\text{kg/m}^3)$  | 1,290   | $t_{propu}(\text{s})$              | 4,500                              |         | D_bonbonne(cm)            | 13,200  | <div>OUI</div>                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |
|                     | $\gamma(\text{cp/cv})$ | 1,400   | $t_{stabilisation_{th}}(\text{s})$ | 1,100                              |         | H_bonbonne(cm)            | 48,500  |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     | R(cste gaz)            | 8,314   |                                    |                                    |         | V_calculé_cubel(L)        | 6,637   |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     | M_air(kg/mol)          | 0,029   |                                    |                                    |         | V_bonbonne(L)             | 2,500   |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     | r(cste spécifique)     | 286,690 |                                    |                                    |         | P(bars)                   | 100,000 |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     | Pa(bars, ambiante)     | 1,000   |                                    |                                    |         | T_vol(s)                  | 14,153  |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
| Variables d'entrée  | P_amont(bars)          | 3,500   | 1er Modèle                         | T(s)                               | 0,500   | Temps                     |         | <div>Pression Electrovanne OK</div> <div>OUI</div>                                                                                                                                                                                                                                   |  |
|                     | D*(mm)                 | 4,000   |                                    | a(rad/s2)                          | 14,000  |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     | M(Mach sortie)         | 1,000   |                                    | J(kg.m2)                           | 0,077   |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
| Calculs de sortie   |                        |         |                                    | C(N.m)                             | 1,078   | Electrovanne              |         | <div>Tuyère amorcée</div> <div>OUI</div> <div>Force compatible</div> <div>OUI</div> <div>Débit Electrovanne compatible</div> <div>OUI</div> <div>Temps vol_bonbonne OK</div> <div>OUI</div> <div>Temps roulis activé tot</div> <div>OUI</div> <div>Ivan Content</div> <div>OUI</div> |  |
|                     | A*(mm2, surface col)   | 12,566  |                                    | Bras_levier(m)                     | 0,080   |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     | c(m/s, vitesse son)    | 316,767 | 2e Modèle                          | F_theorique_1(N)                   | 6,738   |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     | v_sortie(m/s, vitesse) | 316,767 |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     | T_sortie(K)            | 250,000 |                                    | Surface ailerons (m2)              | 0,060   |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     | P_sortie(bars)         | 1,849   |                                    | Vitesse fusée (m/s)                | 150,000 |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
| Variables de sortie | A_sortie(mm2, surface) | 12,566  |                                    | Cx                                 | 1,000   | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    | angle_aileron(degrés)              | 1,000   |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    | Force(N)                           | 60,767  |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
| Rapports carac      | D_sortie(mm)           | 4,000   | 3e Modèle (Retenu)                 | Bras_levier(m)                     | 0,170   | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     | mp_tuyere(kg/s)        | 0,01027 |                                    | Couple_total(N.m)                  | 10,334  |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     | F_tuyere(N)            | 4,320   |                                    | F_theorique_2(N)                   | 64,586  |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    | a_reel(rad/s2)                     | 134,204 | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         | Electrovanne              |         | 0.865                                                                                                                                                                                                                                                                                |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
|                     |                        |         |                                    |                                    |         |                           |         |                                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |



## Dimensionnement de la bonbonne

La poussée créée par les tuyères impose un débit en sortie, et, en supposant l'écoulement stationnaire, cela impose un débit double dans l'électrovanne, qui est le même qu'en sortie de bonbonne. On peut ainsi calculer, via la loi des gaz parfaits, le temps de vol dans le cas dégénéré où les tuyères sont activées pendant la totalité du vol. En effet,

$$t = \frac{P_{bonbonne} V_{bonbonne} M_{air}}{2 D_m R T_{bonbonne}}$$

On souhaite trouver une bonbonne pour que ce temps soit supérieur au temps de vol total théorique sans le temps de propulsion avec de la marge, soit 14s.

## Conclusion pour la pression de la bonbonne

Si nous estimons à 4,5s le temps de propulsion et 16s le vol total, nous avons besoin à minima de 11.5s d'activation. Nous préférons passer alors à 14s pour être sûr de disposer d'assez de fluide. Une pression de 100 bars suffit alors. Cependant, le Cahier des Charges précise qu'il faut un facteur de sécurité de 2, donc une bonbonne de 200 bars. La bonbonne la plus pratique que nous avons trouvé fait 2.5L pour 300 bars, ce qui amène avec le facteur 2 à demander une dérogation pour une pression de 150 bars, ce qui a été fait. Cependant, cette pression est uniquement localisée dans la bonbonne, les raccords et le premier détendeur. La suite du système pneumatique ainsi que la fusée en général ne dépasse jamais 10 bars. Le système a été testé et ne présente aucune fuite.

## Assemblage du contrôle de roulis

Nous expliquons ici plus en détail l'assemblage Solidworks du contrôle de roulis.

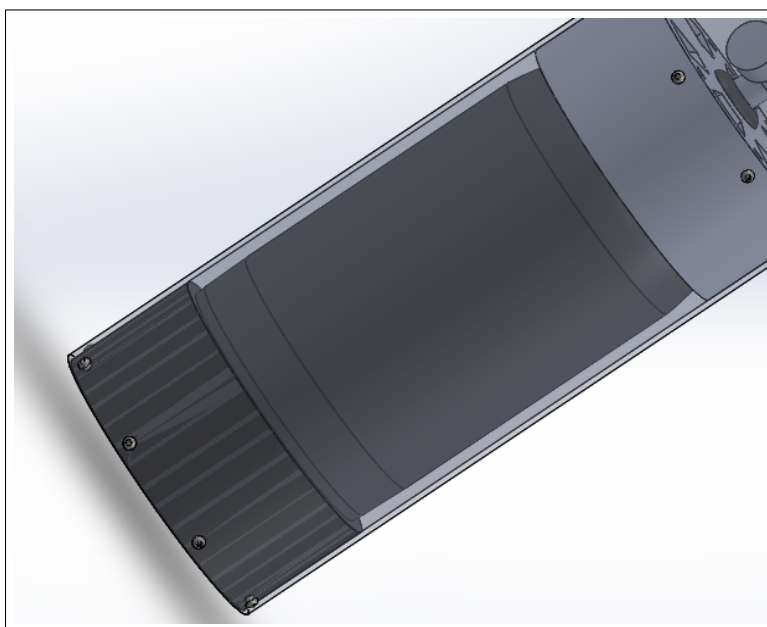


FIGURE 2.24 – Bonbonne

Nous commençons par la bonbonne, modélisée dans solidworks et tenue par deux bagues en haut et en bas. La bonbonne fait 129mm de diamètre, donc de par et d'autre les bagues sont fines, ce pourquoi elles sont larges en haut et en bas pour assurer qu'elles tiennent les chocs.

La bonbonne est ensuite reliée à un remplisseur que l'on voit dans la photo ci-dessus. Un mamelon 8mm y est attaché, qui sert pour le connecteur femelle du compresseur. On voit de même deux manomètres sur ce remplisseur. Celles-ci mesurent les pressions de sortie de la bonbonne, et de sortie du remplisseur, qui peut techniquement agir comme régulateur de pression. La technologie (utilisant une clé pour régler la pression) n'étant pas très précise, nous avons préféré la garder normalement ouverte pour détendre ensuite. La trappe pneumatique englobera l'écrou permettant l'ouverture et la fermeture du remplisseur, le mamelon 8mm permettant le remplissage du système, et le robinet à boisseau sphérique servant de vidange manuelle de tout le système.. Une autre trappe, circulaire, permettra de voir le manomètre bas (une mesure de pression de la bonbonne doit être visible).

Le principe est le suivant : L'air sort du remplisseur et rentre dans le premier étage, le détendeur 1. On voit alors un coude sortir de la sortie moyenne pression de 8,5 bars : elle monte dans le détendeur 2 que nous détaillerons ci-après, pour redescendre dans la croix que nous voyons ici. la croix à deux sorties qui sont des coudes pointés vers le haut : ceux-ci représentent la séparation

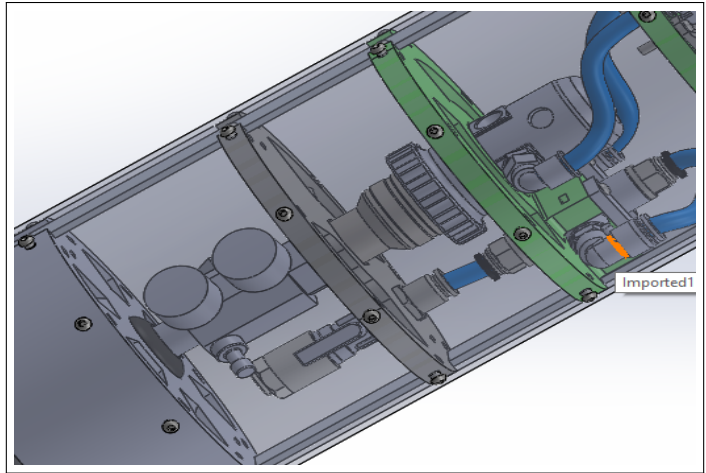


FIGURE 2.25 – Remplisseur et vidange

en deux direction, un pour le sens de rotation horaire, et un pour le sens de rotation anti-horaire. Ils mènent directement aux distributeurs. L'autre est la sortie de vidange. On la voit ici connectée à une trappe manuelle mécanique à boisseau sphérique, puis un silencieux. Les distributeurs étant normalement fermés, tourner le robinet permet une vidange totale du gaz à tout instant, et ce dans le silencieux pour réduire le bruit.

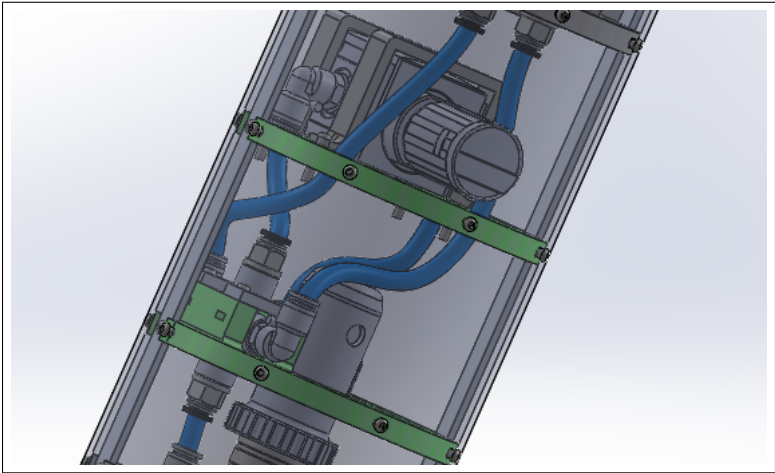


FIGURE 2.26 – Détendeurs

Nous voyons ici la bague tenant le second détendeur. Il a ainsi une entrée via un coude, et une sortie de l'autre côté qui redescend dans la croix comme expliqué précédemment. Le détendeur est maintenu par des arches pour assurer qu'il ne bougera pas.

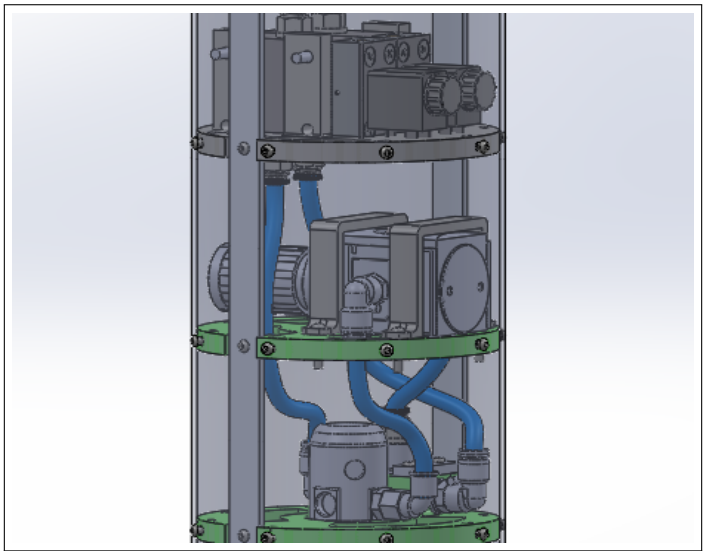


FIGURE 2.27 – Distributeurs

Nous voyons maintenant les deux distributeurs. Les coudes verticaux précédents rentrent dans chacun des distributeurs (l'autre entrée est bouchée) et sortent dans l'autre sens. Les distributeurs sont maintenus par 4 languettes par laquelle nous pouvons passer des tiges filetées et des écrous pour la fixer en place.

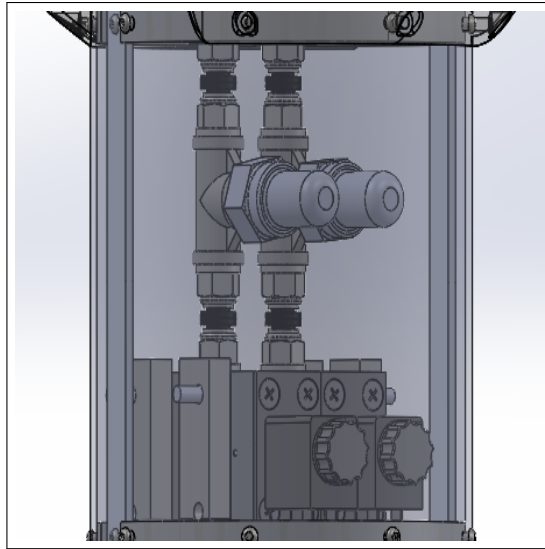


FIGURE 2.28 – Capteurs de pression

Il y a de plus un emplacement prévu pour deux capteurs de pression, un pour le sens horaire et un pour le sens anti-horaire. Cela permet, dans la phase de test, d'assurer que les deux rotations ont la même force en entrée ou de voir si il y a une dissymétrie dans le roulis à supprimer. Enfin, dans l'analyse des données, on pourra directement le relier à la force de poussée et ainsi au roulis mesuré par les IMUs, comparer, et voir si il y a un problème ou alors la réussite de l'expérience. Ses capteurs sont reliés à la carte Expérience. Il rencontre ensuite un Té horizontal qui divise les tés en

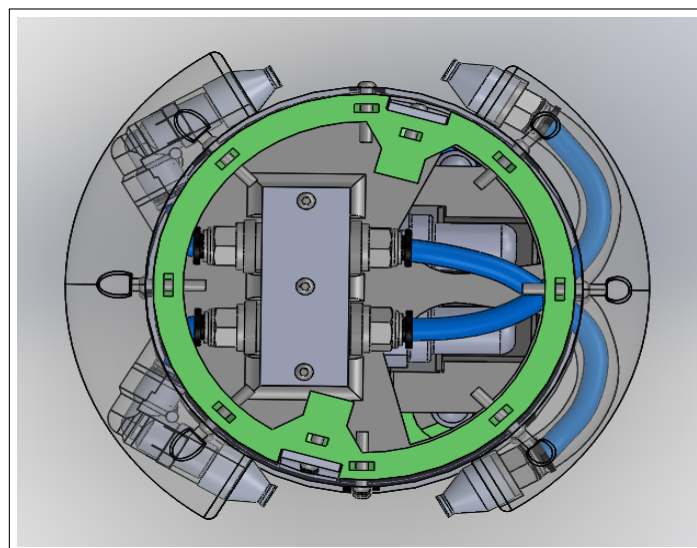


FIGURE 2.29 – Tuyères et Éjection du gaz

deux pour avoir deux tuyères par sens de rotation disposées à 90 degrés. Un système de fixation, assure que les flexibles puissent se tordre et rentrer dans la buse, qui est fixée et ne peut bouger. On à alors une éjection tangentielle selon les deux sens de rotation, contrôlables par la tension envoyée dans les distributeurs qui s'ouvrent ou se ferment selon le code déterminée par l'équipe Software. Au vu de la non égalité des distances entre les sorties des Tés, nous avons deux modèles de soutien-tuyères : l'un prenant en son sein des coudes, et l'autre uniquement un push-in. La taille des tuyères est ainsi différente dans les deux sens, pour permettre une éjection dans un même sens de rotation parfaitement dans le même plan.

## Conformité au cahier des charges

- Le gaz est de l'air, donc non inflammable. Il sera monté à la pression demandée via un compresseur dont la fiche technique est incluse dans le dossier 'Composants pneumatiques'
- Facteur de sécurité de 2 :
  - Compresseur : Il peut comprimer jusqu'à 300 bars, donc nous sommes à un facteur 3 de la pression que nous mettrons dans notre bonbonne
  - Bonbonne : Elle peut accueillir 300 bars alors que nous avons besoin que de 100
  - Le remplisseur est dimensionné pour 300 bars
  - Étage 1 : le premier étage peut accueillir 300 bars mais n'en aura pas plus de 100
  - Étage 2 : L'entrée maximale du deuxième étage est 16 bars, la sortie du premier étage est 8,5 bars. Il y a de plus des pertes de charge dans le raccord, le facteur 2 sera donc quasiment respecté.
  - Distributeurs : Les distributeurs peuvent accepter 10 bars, alors que nous avons besoin que de 3.5 bars en sortie.
  - Les flexibles peuvent accueillir jusqu'à 500 bars
  - Les autres composants tels que les raccords pneumatiques mâles, femelles, la croix, le silencieux, ou la vanne de sécurité ont toutes des pressions conformes
  - La température est largement conforme
- Preuve d'une mesure de pression : Comme indiqué ci-dessus, il y a un baromètre physique lisant la pression de sortie de la bonbonne, et ce accessible via la trappe pneumatique qui sert aussi à remplir la bonbonne. Il y a aussi des capteurs de pressions 10 bars en entrée des tuyères pour pouvoir avoir une mesure continue des deux directions, dans l'optique de pouvoir relier la pression d'entrée à la mesure du roulis faite par l'IMU détaillée dans les autres chapitres.
- Non activation lors de la propulsion : Le code du roulis indique un temps minimal de 5,5s avant activation (4,5s de propulsion et une seconde de marge)
- Absence de tangage et de lacet : Les tuyères tangentielles empêchent le tangage et le lacet. Elles sont maintenues mécaniquement en place ce qui assure une poussée strictement dans le plan perpendiculaire à l'axe de la fusée. De plus, les distributeurs sont normalement fermés, et un seul ne peut s'activer à la fois, assurant ainsi la rotation dans un seul sens à tout moment
- On n'a aucune éjection hormis celles de l'air à l'extérieur de la fusée. La vanne qui permet la vidange mécanique en cas de problèmes est liée à un silencieux, la pression ne dépassant pas 6 bars, sans aucune éjection
- Purge totale mécanique : Comme précisé ci-dessus, la sortie du deuxième détendeur est reliée à une croix. 2 des autres sorties de la croix sont reliées à un distributeur chacun, une par direction. La dernière sortie est celle de la vidange, reliée à une valve "ball-valve" accessible via la trappe pneumatique. Les vannes sont normalement fermées, donc on peut à tout moment ouvrir la vanne et l'air ne sortira que par cette vidange. Le système est mécanique et accessible à tout moment
- Il y a la documentation technique de tout les composants pneumatiques dans le dossier 'Composants pneumatiques'
- Les actionneurs, ici les distributeurs, sont couplés : un seul ne peut s'activer en même temps dans notre code, et de manière électrique le signal est envoyé qu'à un seul distributeur en même temps
- L'étalonnage des capteurs de pression et de la mesure du roulis est détaillé dans la partie Software. Pour l'étalonnage du roulis, nous avons prévu un banc de test qui sera détaillé ci-dessous. L'idée est de trouver exactement le bon diamètre du col de tuyère et pression de sortie du deuxième détendeur pour amorcer la tuyère et permettre la poussée que l'on souhaite. On va alors faire tourner la fusée manuellement, et voir comment le code s'adapte. Si c'est la version PID, on changera les coefficients. Sinon, on changera la fenêtre des rotations gauches et droites. On aura alors un code testé et des tuyères amorcées pouvant simuler un vol complet
- Le document de dérogation de pression a été envoyé sur SCAE
- La chronologie du remplissage est dans la section "Sécurité" de ce document

### Banc de Test

Nous avons réalisé un banc de test pour pouvoir tester le roulis.



FIGURE 2.30 – Banc de test roulis

Le but est de laisser une libre rotation de la fusée avec le moins de frottements possible. L'idée est la suivante : Une bague en bois est vissé sur un poteau et s'encastre dans la bague de retenue moteur. Cela permet de fixer la fusée par le bas ce qui fait qu'elle ne peut translater verticalement.

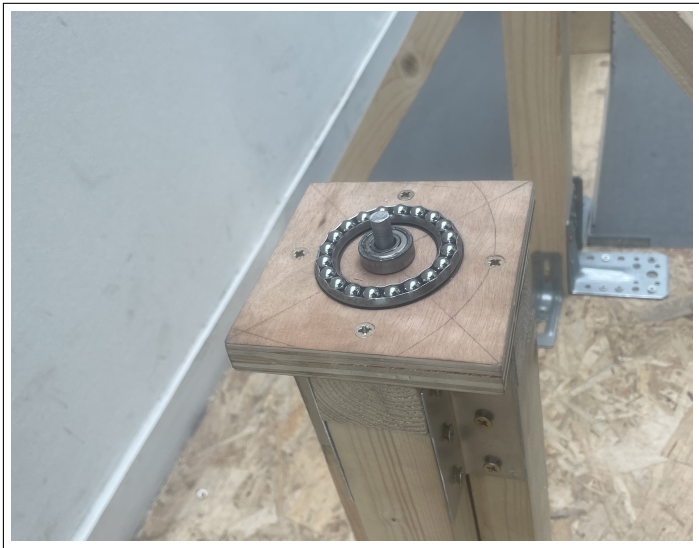


FIGURE 2.31 – Poteau avec roulement

Cette bague de rotation, réalisée sur une CNC 2 axes, accueille un roulement à bille qui permet la rotation de la fusée. Le poteau contient une tige en aluminium qui s'encastre dans la bague de rotation, qui contient un roulement à billes pour limiter les frottements. Cela permet d'empêcher les translations latérales. La fusée est alors fixée et peut tourner.

Cependant, la fusée faisant trois mètres et la bague de rotation ne pouvant jamais être parfaitement centrée, il faut faire en sorte que la fusée ne fait pas de mouvement de précession et ne tourne trop au niveau de la coiffe, et aussi qu'elle ne puisse pas tomber. Ainsi, des roulettes, attachées à des suspensions, permettent de maintenir la fusée sans frottement tout en lui permettant de tourner. La cage contenant les roulettes peut s'ouvrir facilement comme vu ci-dessous, et est maintenue par deux grosses poutres. Pour limiter les vibrations, les poutres du banc de test sont maintenues par des équerres et surtout des potences qui limitent les vibrations dans le plan horizontal.

On peut alors librement poser la fusée sur le banc de test et la faire tourner pour tester le code du contrôle de roulis.



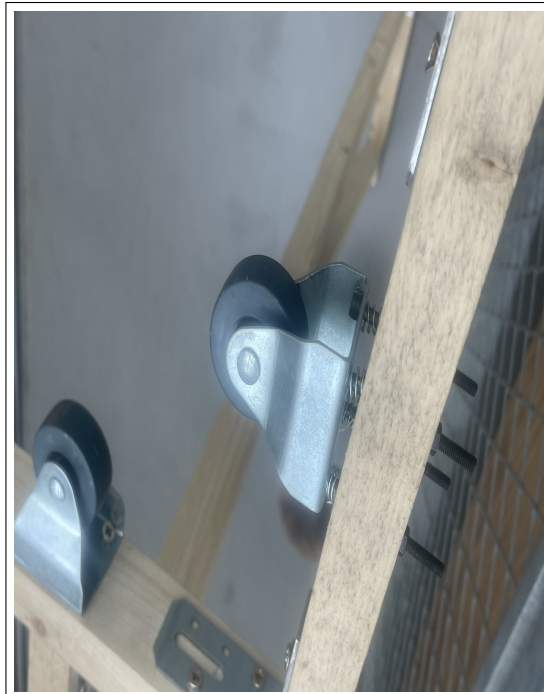


FIGURE 2.32 – Roulette avec suspension



FIGURE 2.33 – Potences limitant les vibrations

### 2.2.7 Aérofreins

Le but des aérofreins ne sera pas uniquement de freiner la fusée mais bien le contrôle d'altitude.

La solution retenue pour ce système est d'ouvrir la peau de la fusée pour réellement maximiser la surface exposée à l'air et augmenter la traînée. Pour ouvrir cette peau, on utilise le même principe qu'un cric, avec un système vis-écrou et un jeu de bielles qui va relever les aérofreins.

#### Forme des aérofreins

À partir de la documentation scientifique disponible, plusieurs concepts initiaux d'aérofreins pouvaient être envisagés. Pour orienter notre choix, nous avons réalisé différentes modélisations CAO représentant grossièrement chaque design, puis mené des simulations d'écoulement autour de ces géométries afin d'estimer le coefficient de traînée ( $C_d$ ) de la fusée avec les aérofreins en position ouverte. Nous avons ensuite simulé l'évolution de l'apogée en fonction du  $C_d$  à l'aide d'un code Python chargé de résoudre l'équation différentielle du mouvement de la fusée. Parmi les configurations testées, la forme tubulaire s'est révélée la plus performante : elle génère un  $C_d$  plus élevé  $C_d = 0.4$  et offre une surface projetée maximale :  $1.9 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ , deux critères essentiels pour réduire efficacement l'apogée. Nous avons donc retenu le design tubulaire pour la suite de la



conception.

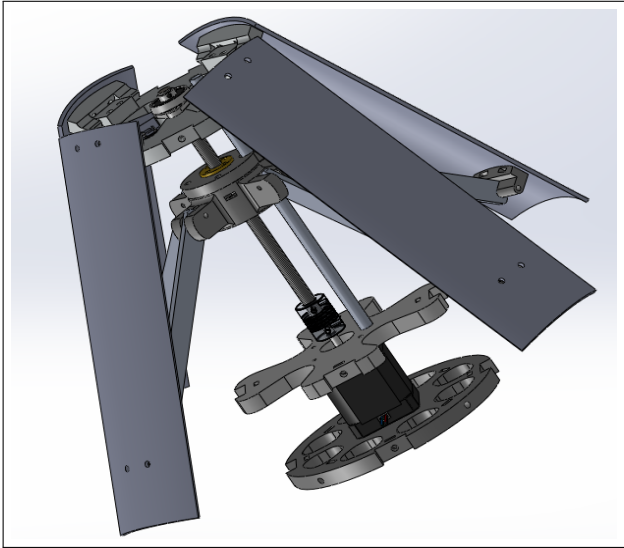
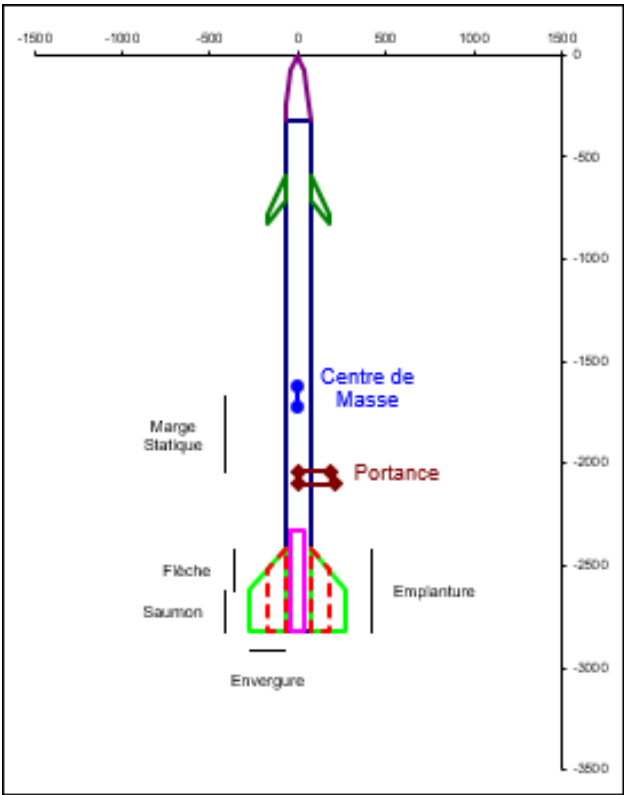


FIGURE 2.34 – CAO des Aérofreins

Le système vis-écrou transforme la rotation du stepper NEMA 17HE19-2004S en translation. Si on ouvre les aérofreins au maximum après la fin de propulsion, l'apogée estimée est environ 200m en dessous de l'apogée théorique. Le choix de ce système d'ouverture a été guidé tout d'abord par la nécessité de commander l'ouverture des 4 tuiles à l'aide d'un seul système permettant d'assurer la stabilité de la fusée en cas de dysfonctionnement de l'actionneur. Nous avons également choisi le positionnement des bielles sur les tuiles (fixations en bas) afin de minimiser l'encombrement à l'intérieur de la peau lors de la fermeture des aérofreins. Il fallait également assurer que la caissette de translation soit contrainte en rotation d'où la nécessité de la tige en métal à côté de la vis verticale. Ainsi, lorsque le stepper tourne, un adaptateur de diamètre fait tourner la vis infini, montant la caissette, qui est reliée aux bielles elles-même liées aux aérofreins. Ils s'ouvrent alors. Une bague en aluminium avec des charnières faites à la fraiseuse pour plus de précision permet l'ouverture de chaque tuile. Un codeur magnétique permet de connaître précisément la position du stepper pour connaître la rotation du stepper et donc la position des aérofreins. Celui-ci est intégré dans la bague du dessous.

Une modélisation sur StabTraj avec un deuxième jeu d'ailerons a été réalisé, permettant de démontrer que la fusée reste stable aérofreins ouverts.



Nous avons tout de même déterminé le centre de pression de la fusée lorsque les aérofreins sont

ouverts au maximum. Les formules sont les suivantes :

$$X_{CP} = \frac{F_y M_z - F_z M_y}{F_y^2 + F_z^2}$$

car

$$\vec{M} = \vec{r}_{CP} \times \vec{F}$$

On obtient les couples et forces nécessaires au calcul de  $X_{CP}$  par simulation sur le module Flow Simulation de Solidworks. On obtient  $X_{CP} = 2.248\text{m}$  à partir de la pointe de la coiffe, donc bien en dessous du centre de masse prévu à  $1.724\text{m}$ . La fusée est donc stable même aérofreins ouverts.

Une simulation sur le module Flow Simulation sur Solidworks a permis de calculer une force maximale de  $200\text{N}$  par aérofrein, ce qui nous a permis de choisir le stepper adapté.

Les matériaux utilisés pour la construction sont les suivants :

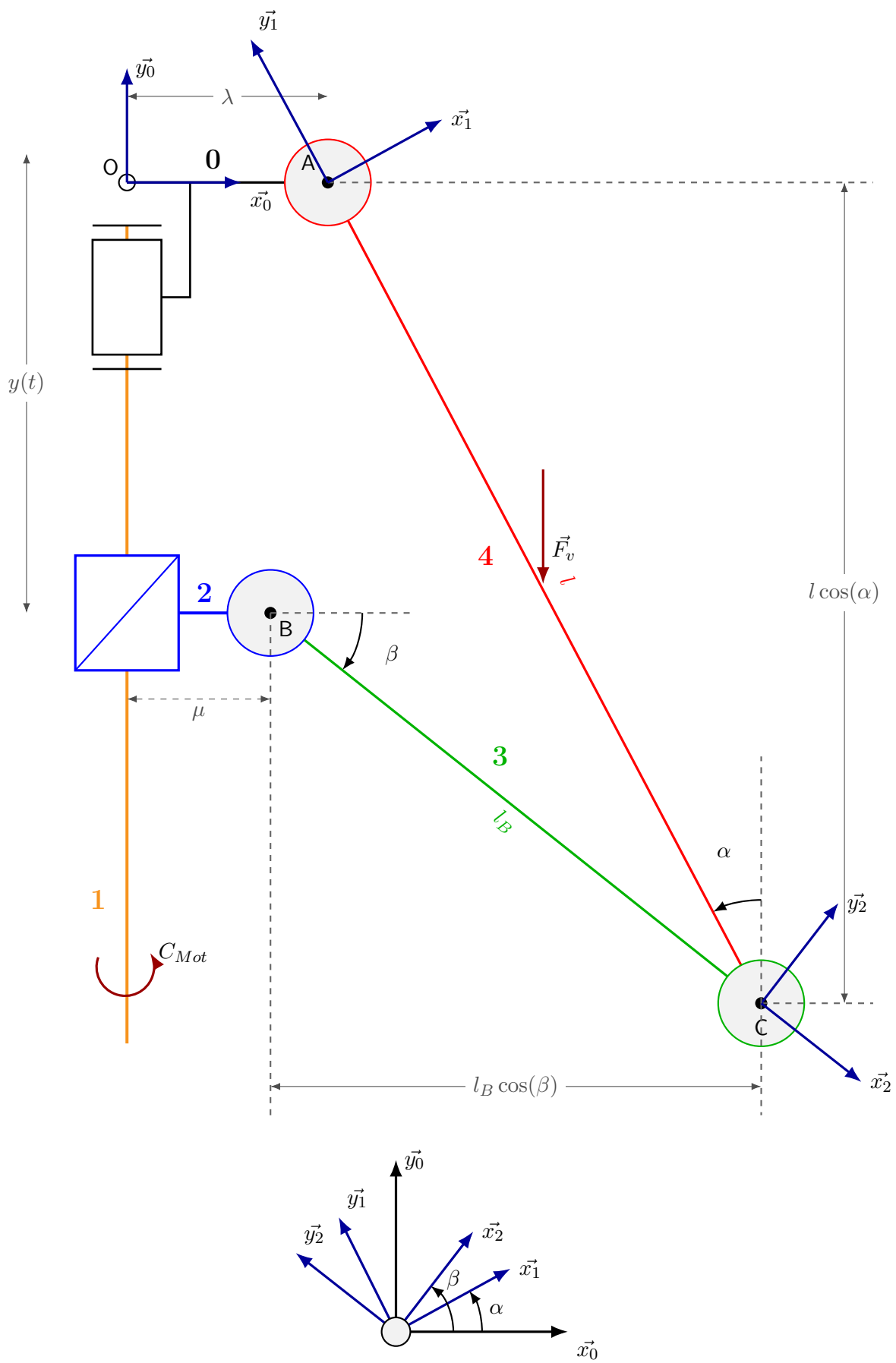
- Bielle : aluminium
- Tuiles : carbone 5 couches
- Bagues du haut des aérofreins : aluminium
- Caissette de translation et bague du stepper : PETG, 3 couches, remplissage gyroïde
- Charnières vissées aux aérofreins : PETG, 4 couches, remplissage gyroïde
- Charnières vissées à la bague du haut : aluminium

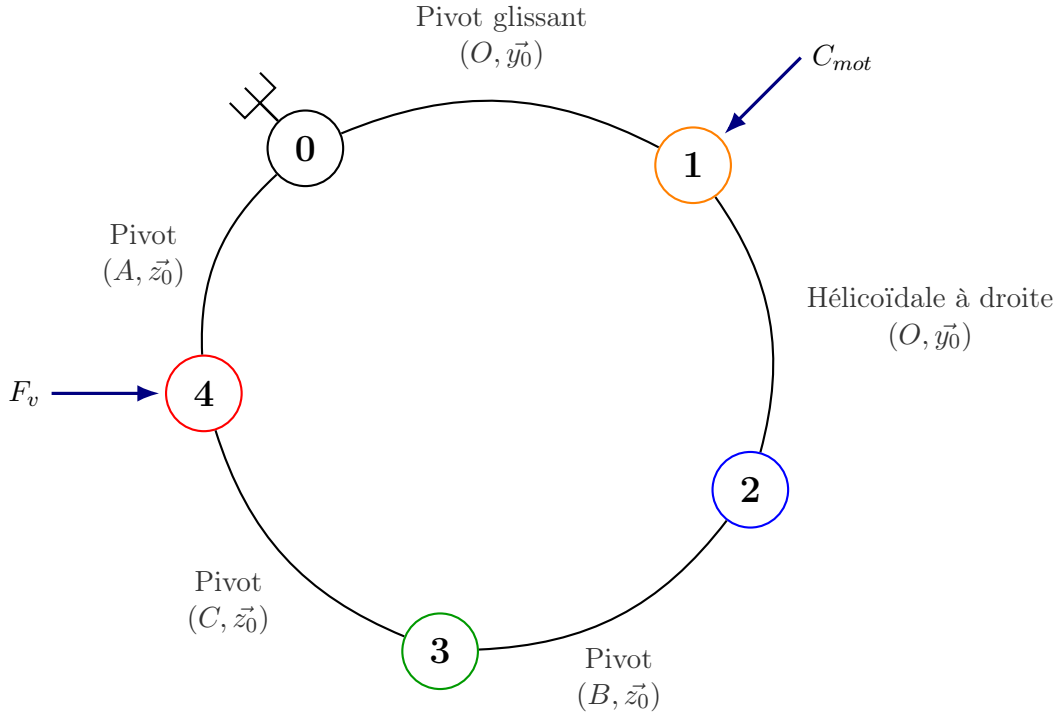
Voici les calculs que nous avons effectué lors de la conception de nos aérofreins :

## Notations et Schéma

Nous prendrons les notations suivantes :

- La distance entre l'axe de rotation de la charnière du haut et l'axe de symétrie de la fusée est  $\lambda = 55\text{mm}$
- La distance entre le centre des bagues et l'axe de rotation de la charnière de la caissette de translation est  $\mu = 35\text{mm}$
- La taille d'une bielle est  $l_B = 171\text{mm}$
- La longueur d'une tuile d'aérofrein est  $l = 260\text{mm}$
- La surface d'une tuile d'aérofrein projetée ( $Oyz$ ) est  $S = 71 \times 260 = 1,85 \times 10^{-2} \text{ m}^2$
- On nomme  $y(t)$  la distance entre le centre de la caissette de translation et le projeté orthogonal du milieu de l'axe de rotation de la charnière du haut sur l'axe de symétrie de la fusée
- $\alpha$  est l'angle entre l'axe de la fusée et un aérofrein
- $\beta$  est l'angle entre la bielle et l'horizontale
- La surface présentée à l'écoulement est  $S_\alpha = S \sin(\alpha)$
- On nomme  $F_v(\alpha, v) = \frac{1}{2} \rho S_\alpha v^2 C_d$  la résultante des forces du vent sur un aérofrein, qui dépend de la vitesse de l'air et d' $\alpha$
- La valeur de  $F_v$  maximale, calculée pour  $\alpha = \frac{\pi}{4}$  et  $v = 150\text{m/s}$ , est  $F_{vmax} = 291\text{N}$
- Le coefficient  $C_d$  dépend de l'angle  $\alpha$ , des valeurs discrètes ont été calculées sur Solidworks
- $p = 5\text{mm}$  est le pas de l'hélicoïdale
- $\theta$  est l'angle de rotation de la tige filetée
- $C_{mot}$  est le couple nécessaire au Stepper, en fonction de  $\alpha$  et  $v$





### Calcul en dynamique

On calcule une puissance  $P_{aéro} = -(\frac{l}{2} \sin(\alpha) F_v) \dot{\alpha}$  et une puissance du moteur  $P_{moteur} = C_{mot} \dot{\theta}$ .

Le couple du moteur avec une liaison hélicoïdale est donné par  $C_{mot} = \frac{l}{2} \sin(\alpha) F_v \frac{\dot{\alpha}}{\dot{\theta}}$ .

Or  $\dot{y} = \frac{p}{2\pi} \dot{\theta}$ , donc  $\dot{\theta} = \frac{2\pi}{p} \dot{y}$ .

On cherche donc le rapport  $\frac{\dot{\alpha}}{\dot{y}} = \frac{d}{dy} \alpha$ .

Il est plus facile de calculer  $\frac{d}{d\alpha} y$  et d'inverser. On trouve  $y$  par fermeture géométrique :

$\vec{OA} + \vec{AC} + \vec{CB} + \vec{BO} = \vec{0}$ , donc

$$\lambda \vec{x}_0 + l \sin(\alpha) \vec{x}_0 - l \cos(\alpha) \vec{y}_0 - l_B \cos(\beta) \vec{x}_0 - l_B \sin(\beta) \vec{x}_0 - l_B \sin(\beta) \vec{y}_0 - \mu \vec{x}_0 + y \vec{y}_0 = \vec{0}$$

Ceci nous donne

$$\begin{cases} \lambda + l \sin(\alpha) - l_B \cos(\beta) - \mu = 0 \\ -l \cos(\alpha) - l_B \sin(\beta) + y = 0 \end{cases}$$

On trouve alors

$$y = l \cos(\alpha) - \sqrt{l_B^2 - (\lambda - \mu + l \sin(\alpha))^2}$$

Soit

$$\frac{d}{d\alpha} y = -l \sin(\alpha) + \frac{l \cos(\alpha) (\lambda - \mu + l \sin(\alpha))}{\sqrt{l_B^2 - (\lambda - \mu + l \sin(\alpha))^2}}$$

D'où

$$C_{mot}(\alpha, v) = \frac{p}{2\pi} \frac{l}{2} \sin(\alpha) F_v(\alpha, v) \frac{1}{\frac{l \cos(\alpha) (\lambda - \mu + l \sin(\alpha))}{\sqrt{l_B^2 - (\lambda - \mu + l \sin(\alpha))^2}} - l \sin(\alpha)}$$

On trouve un  $C_{mot} = 0,16 \text{ N.m}$ , le rendement de l'hélicoïdale étant de 38%, on trouve un couple réel  $C_{reel} = 0,42 \text{ N.m}$ . Le stepper acheté a au moins un facteur 2 en couple.

La découpe de la fibre de verre a été faite pour minimiser l'accès d'air dans la fusée alors que les aérofreins sont fermés. Une membrane permettra de faire en sorte que l'air ne rentre jamais en haut des tuiles. Ci-dessous une illustration des aérofreins en carbone en mode ouvert.

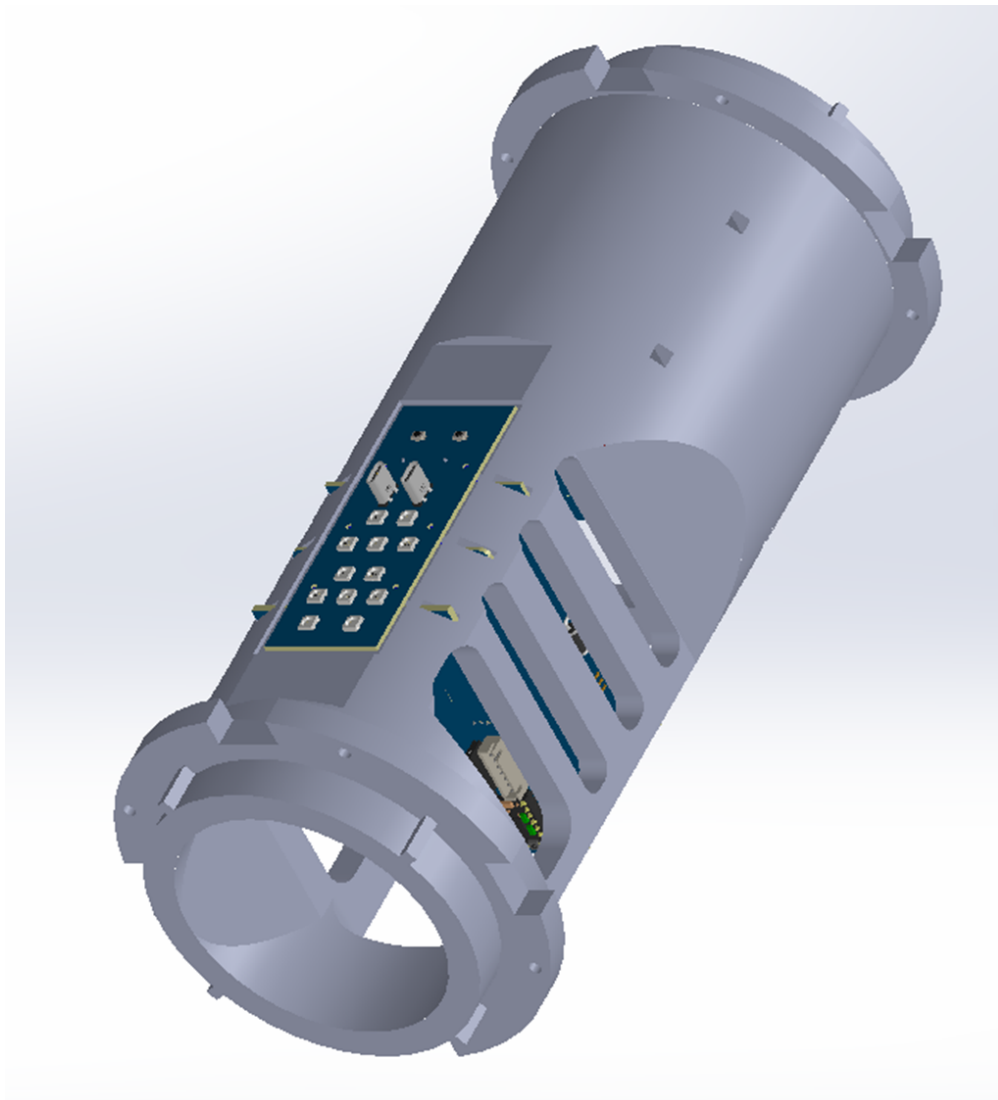


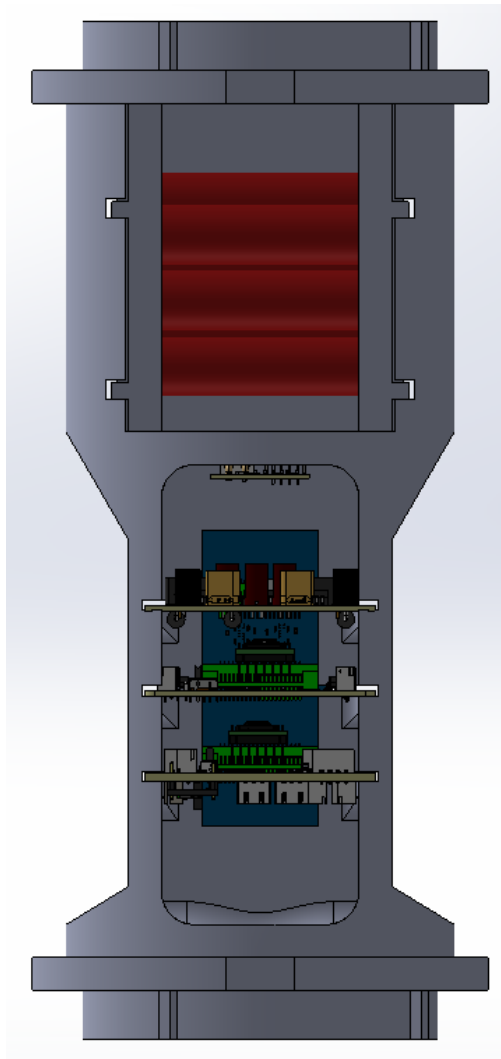
### 2.2.8 Stack élec

Le stack élec permet d'intégrer les différents composants électroniques dans la fusée. Il garantit une bonne mise en position des différents éléments tout en permettant une intégration facile.

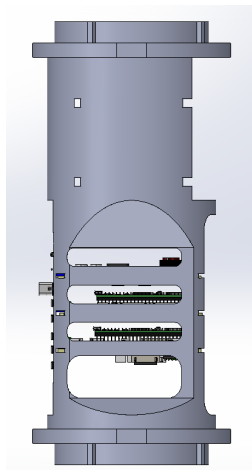
Le stack élec est conçu en une seule pièce imprimée en 3D pour diminuer la masse de la fusée et simplifier la fabrication.

Le Stack comprend les encoches pour les cartes Alimentation, Séquenceur, et Expérience. La carte interface est visible de l'extérieur de la fusée, la fibre de verre étant percée adéquatement. La carte BMS se situe au dessus de ces cartes (ainsi que les interrupteurs et le trou pour le jack). L'espace au dessus est consacré aux batteries alimentant l'électronique. Enfin, un emplacement est prévu pour la batterie et la carte de l'IPSA qui permet d'interagir avec leur CanSat.





Des ouvertures ont été prévues sur les coté du stack élec pour garantir le bon passage des cables .



Le stack élec est encastré à la structure interne via les liaisons suivantes :

- Un centrage court qui retire 2 degrés de libertés
- Un appuis plan qui retire 3 degrés de libertés
- Une ponctuelle qui retire 1 degrés de liberté

Le maintien en position est garanti par frottement par le biais de 4 vis.

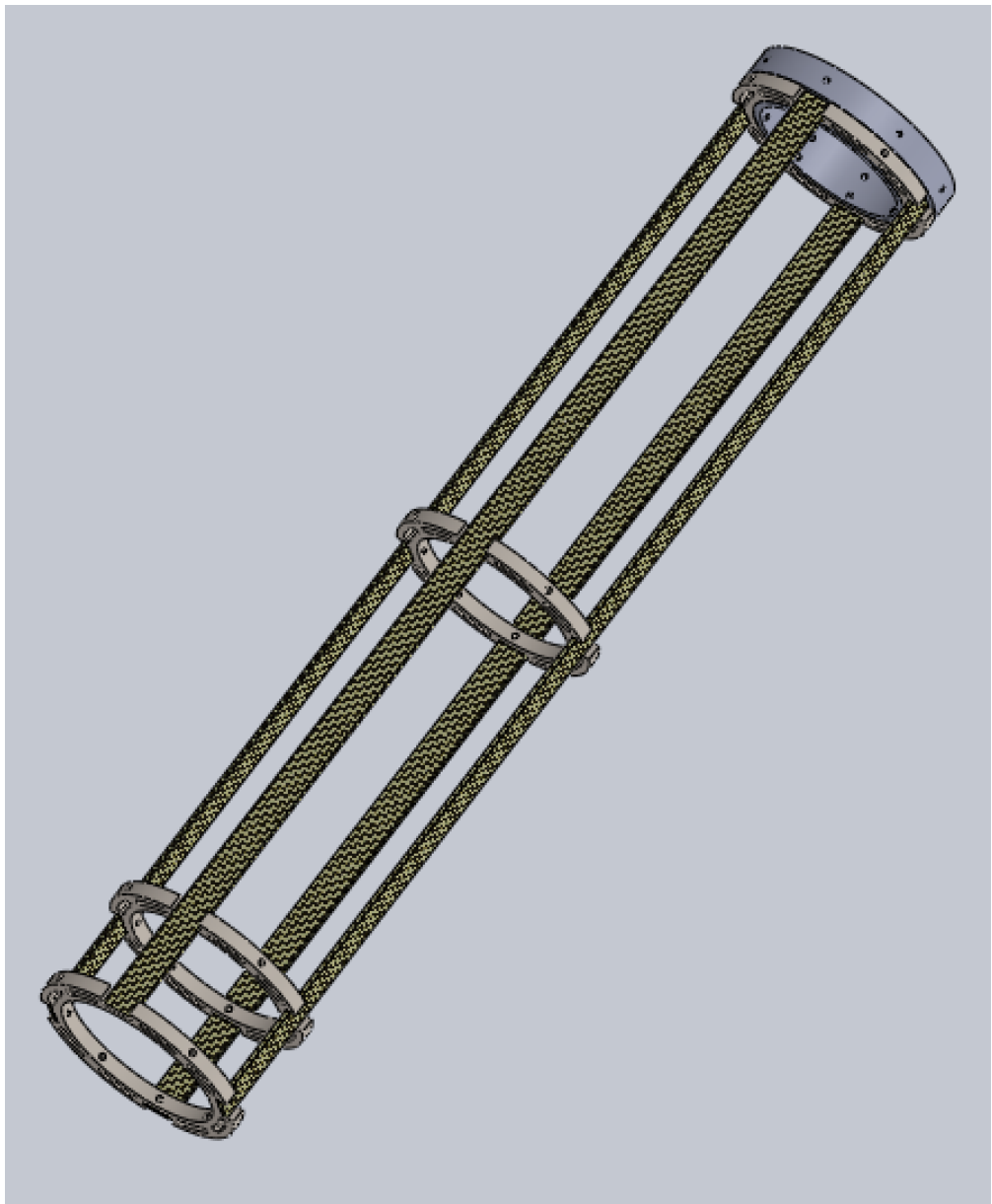
### 2.2.9 Structure interne

Voilà encore une nouveauté pour le Pôle Espace : la structure interne.

Ici, on a plutôt un « squelette interne » qui va reprendre les efforts. On se fixe dessus, puis on met une peau très fine en fibre de verre (2-3 couches) qui a uniquement un but aérodynamique. L'idée est d'avoir des bagues en aluminium reliées par des plaques en carbone (des longerons). C'est



une structure extrêmement rigide et qui permet une grande facilité d'intégration.

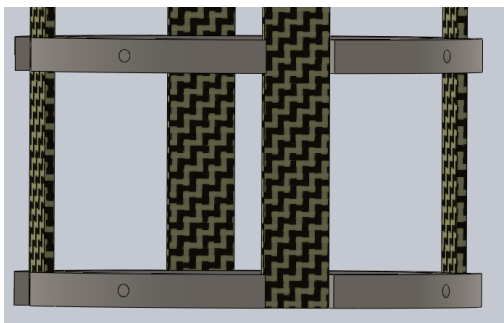


Le choix de cette structure novatrice est aussi le fruit de la présence des aérofreins. En effet en sortant sur les cotés de la fusée, les aérofreins interdisent la présence d'une peau porteuse, ce qui explique donc la nécessité d'avoir une structure porteuse, matérialisée ici par la structure interne

Les 4 longerons en carbone répartis circulairement autour des bagues de la structure interne lui confèrent une rigidité qui permet de valider amplement les tests de flèches tout en optimisant la masse. Les bagues décrites par la suite sont en aluminium. Le choix de l'aluminium plutôt que du PETG s'explique par le fait que les bagues portent les efforts externes et doivent donc pouvoir résister à des efforts axiaux et en flexion intense.

On voit 3 parties se découper clairement sur la structure interne :

La partie inférieure est dédiée au raccordage au tube qui se fait par 2 bagues distantes de 6 cm vissées au tube sur 4 axes.



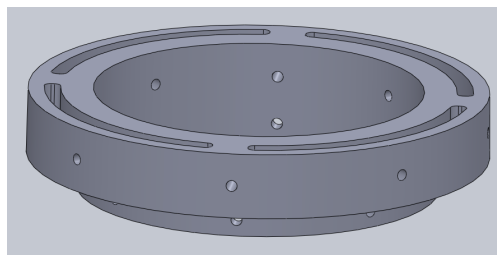
Les deux autres parties accueillent respectivement les aérofreins et l'électronique de la fusée et sont dimensionnées sur la base de ces sous-système afin de satisfaire l'intégration. Elles sont

délimitées par des bagues de raccordages, identiques au bagues de raccordage avec aussi 8 trous permettant de visser respectivement la peau et les longerons.



Cette année, on va avoir ces deux types de structures. On essaie de tirer les avantages de l'un là où on le veut et de l'autre aussi. Par exemple, on avait besoin de la structure interne pour les aérofreins, et on va aussi utiliser ses avantages pour l'intégration élec et CanSat.

Au dessus de la structure interne on retrouve une bague de raccordage à la coiffe dont la partie inférieure est vissée à la bague de guidage supérieure. La partie supérieure de cette bague épouse les formes de la bague afin de garantir une bonne friction avec la coiffe et ainsin un bon raccordage.



### 2.2.10 Éjection du CanSat

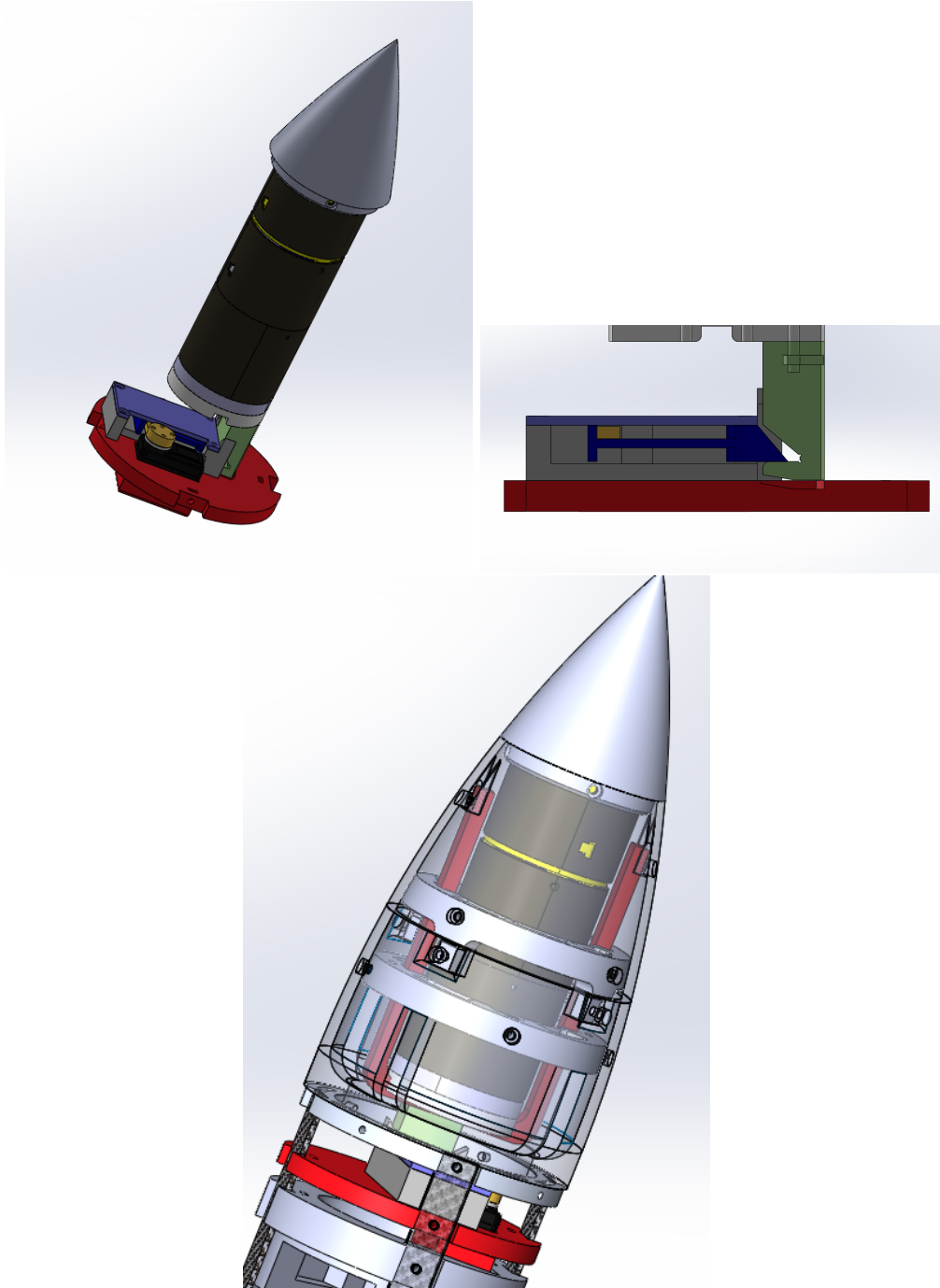
Principe général du système d'éjection :

- Une bague vissée à la structure interne de la fusée sur lequel repose le système d'éjection
- Un disque solidaire du CanSat et sous lequel est situé une fente permettant de maintenir l'élastique d'éjection, ainsi qu'un crochet (la gache)
- Un système penne-gâche semblable à la fermeture d'une porte permet de retenir le CanSat en place avant son éjection à l'apogée
- A l'apogée, le servomoteur retire le pêne et la gache est libéré. L'élastique peut alors éjecter le système Disque + CanSat + bout de coiffe
- Le CanSat est guidé par deux bagues intégrées dans la coiffe

Caractéristiques :

- Bague en PETG de 139 mm de diamètre.

- Disque en PETG de 70 mm de diamètre.



### 2.2.11 Patins

Nous tirons sur le rail Toutatis, nous utilisons donc des patins, qui doivent résister à une force calculée avec les données ci-dessous :

- Poussée max : 1286N
- Surface d'un aileron : 85469 mm<sup>2</sup>
- Surface projeté du corps : 391500mm<sup>2</sup>

Selon la formule du CdC, cela conduit les patins à devoir résister à une force de 82N.

## 2.3 Intégration

### 2.3.1 Fixation des pièces

La grande majorité des pièces de la fusée sont fixées par un jeu de vis radiales, directement sur le tube en carbone par des vis M4 CHC tête bombée en 10, 15 et 20 mm de long.

### 2.3.2 Références en z et theta

La référence en  $z$  sera prise en bas du tube en carbone, et la référence en  $\theta$  sera prise au milieu de la porte para

On impose la règle des 8 grands axes de la fusée : si un trou est sur la fusée, il se trouve forcément sur l'un de ces axes.

2.4 StabTraj

Le StabTraj est fourni en fichier joint à ce dossier de conception, dans plusieurs configurations selon que les aérofreins sont ouverts ou non, et que la bonbonne est pleine ou non.  
Les fichiers sont nommés "*Stabtrajpolaris\*.xlsx*" et sont joints à ce dossier de conception.

2.5 Sécurité

2.5.1 Portée balistique

Comme demander par SECU5 du cahier des charges, voici l’apogée prévisionnelle pour un lancement à 80° :

|                           |        |            |          |           |              |          |
|---------------------------|--------|------------|----------|-----------|--------------|----------|
| 07/02/2026                | Temps  | Altitude z | Portée x | Vitesse   | Accélération | Efforts  |
| Sortie de Rampe           |        |            |          | 21,3 m/s  |              |          |
| Vit max & Acc max         |        |            |          | 175 m/s   | 70 m/s²      |          |
|                           |        |            |          |           |              |          |
| Culmination, Apogée       | 17,1 s | 1376 m     | 564 m    | 30 m/s    |              |          |
| Ouverture parachute fusée | 18,0 s | 1372 m     | 590 m    | 31 m/s    |              | 1751,5 N |
| Impact balistique         | 35,8 s | ~0 m       | 1004 m   | 124,1 m/s |              | 109022 J |

FIGURE 2.35 – Trajectoire pour un lancement à 80°

Nous avons une apogée de 1376m (sans les aérofreins, et bonbonne pleine).

Et voici la portée balistique pour un lancement à 45° :

|                           |        |            |          |           |              |           |
|---------------------------|--------|------------|----------|-----------|--------------|-----------|
| 07/02/2026                | Temps  | Altitude z | Portée x | Vitesse   | Accélération | Efforts   |
| Sortie de Rampe           |        |            |          | 21,8 m/s  |              |           |
| Vit max & Acc max         |        |            |          | 189 m/s   | 73 m/s²      |           |
|                           |        |            |          |           |              |           |
| Culmination, Apogée       | 10,8 s | 487 m      | 1311 m   | 113 m/s   |              |           |
| Ouverture parachute fusée | 18,0 s | 263 m      | 1997 m   | 100 m/s   |              | 18411,4 N |
| Impact balistique         | 21,7 s | ~0 m       | 2268 m   | 106,4 m/s |              | 80216 J   |

FIGURE 2.36 – Trajectoire pour un lancement à 45°

La portée balistique est de 2268m.

2.5.2 Protocole de vidange de la bonbonne du roulis

La bonbonne du roulis est construite pour tenir une pression intérieur de 300 bars. Dans les faits, elle en sera rempli à 100 bars durant le vol. Il nous a été demandé de rédiger une procédure de remplissage et de vidange ainsi qu’une procédure de vidange manuelle en cas de balistique ou de torche.

Protocole détaillé pour le remplissage :

- Il est absolument nécessaire d’avoir une personne qui manipule et une personne chargée du bon déroulé du protocole et de la sécurité
- Remplir l’huile et l’eau dans le compresseur
- Brancher le compresseur sur une prise 220V
- Ouvrir la vidange mécanique pour être sur de purger de l’air s’il en reste, puis la fermer. Les électrovannes sont fermées par défaut
- Ouvrir la trappe pneumatique
- Connecter le raccord femelle du compresseur au remplisseur mâle de la fusée de manière sécuritaire
- Activer le compresseur, suivre l’affichage de température et de pression jusqu’à 100 bars
- Éteindre le compresseur
- Vérifier que le baromètre montre la bonne pression
- Fermer la trappe pneumatique

### **Protocole de vidange manuelle :**

- Ouvrir la trappe pneumatique
- Les électrovannes sont normalement fermées
- Ouvrir la vanne de vidange manuelle, le gaz se vidange dans le silencieux
- Prendre du recul par mesure de sécurité
- Quand la vidange est terminée (plus de bruit), vérifier la pression de la bonbonne à l'aide du baromètre
- Si la pression est atmosphérique, fermer la vanne manuelle ainsi que la trappe pneumatique

Idéalement, le roulis est surestimé et il n'y a pas besoin de tout le gaz durant le vol. Il en reste donc forcément après l'apogée. Il est évident que le roulis ne peut s'activer après l'ouverture du parachute. Il faut donc un protocole de vidange automatique

### **Protocole de vidange automatique après vol nominal :**

- Le roulis doit s'éteindre après l'ouverture du parachute, les électrovannes restant fermées jusqu'à atterrissage après cela
- Les bagues tenant la bonbonne devraient lui permettre de soutenir le choc de l'atterrissage. Cependant, il n'est pas question de faire une vidange manuelle au cas où il y a du dégât : Lorsque l'accélération est nulle durant plus d'une minute, les électrovannes s'ouvrent pour se vidanger automatiquement au sol. La fusée étant bloquée et la force étant faible, elle ne fera pas de roulis au sol
- Lors de la récupération de la fusée, vérifier la pression du baromètre en premier. Vidanger manuellement si nécessaire

### **2.5.3 Fichiers des composants**

Il existe des dossiers de composants électroniques (y compris les actionneurs) et pneumatiques disponibles sur SCAE.

### **2.5.4 Animaux et Pyrotechnique**

Le Cercle Aérospatial de CentraleSupélec certifie via son chef de projet, Neil Sherman et les responsables techniques, Marin Vidal, Cristian Latcu et Ivan Sturov, de l'absence d'animaux vivants ou morts ainsi que de toute substance pyrotechnique dans la fusée (en dehors du moteur, évidemment)

# Chapitre 3

## Systèmes Électronique

Le projet POLARIS de fusée expérimentale a pour objectif d’effectuer un vol nominal tout en réalisant les expériences souhaitées. L’objectif des systèmes électroniques est d’assurer la récupération de la fusée, d’agir sur les différents actionneurs des expériences et d’enregistrer les mesures des différents capteurs. Il y a 5 systèmes électroniques qui dépendent les uns des autres dans leur conception. Les tâches sont divisées entre les membres du pôle et sont coordonnées par le responsable électronique qui assure la communication au sein du pôle.

Voici les 5 systèmes électroniques définis pour ce projet (traités en détail dans les sections ci-dessous) :

- **Séquenceur** : carte électronique qui contrôle l’éjection du parachute par détection d’apogée à l’aide d’un accéléromètre
- **Expérience** : carte électronique avec tous les capteurs et actionneurs des expériences ainsi que le module émetteur
- **Alimentation** : carte électronique qui sert à distribuer le courant aux différents systèmes électroniques à la tension nominale de ceux-ci
- **Interface** : carte électronique qui fait le lien entre les 3 cartes énoncées précédemment et qui présente les switches utilisés lors de la chronologie
- **BMS** : le *Battery Management System* a pour but de garantir la bonne utilisation des batteries lithium-ion comme exigé par le Cahier des Charges

### 3.1 Organisation temporelle et des ressources

Un rétroplanning a été réalisé, en tenant compte des timings des pôles méca et soft. De plus, les week-ends et les vacances académiques ont été pris en compte pour ajuster le planning au plus près de la réalité.

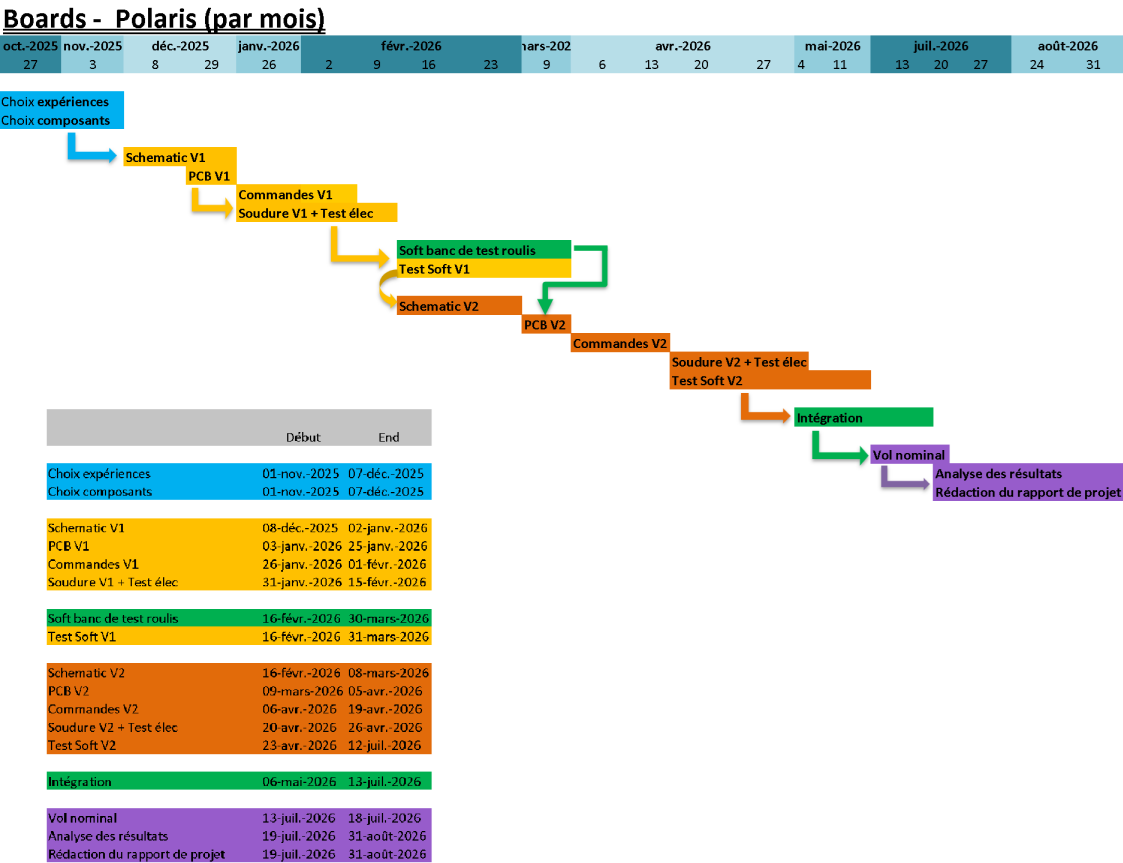


FIGURE 3.1 – Timeline pour l’électronique et le soft du projet Polaris



De plus, les tâches sont réparties entre les membres :

- Séquenceur : Tristan Durain
- Expérience : Mathilde Oria, Alessandro D'Amore et Cyprien Régis
- Alimentation : Hyeongwon Kim
- Interface : Sami Nehas
- BMS et batteries : Cristian Latcu

### 3.2 Architecture générale

L'architecture générale de l'électronique a été réalisé en accord avec le cahier des charges et l'équipe méca. En voici une ébauche qui sera amenée à évoluer (voir la partie amélioration prévue) :

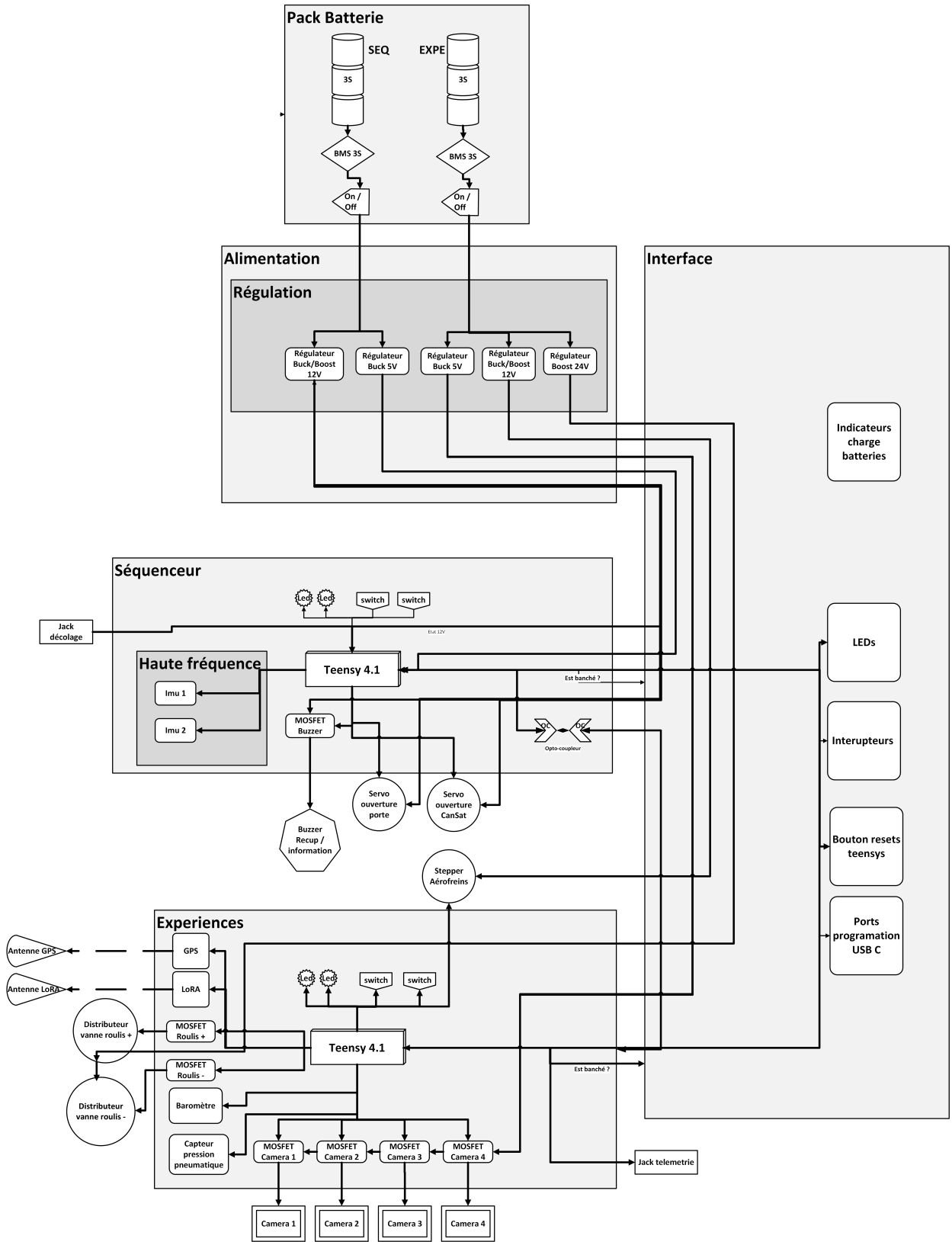


FIGURE 3.2 – Architecture Générale de l'électronique

### 3.3 Cartes électroniques / PCB

Les circuits électroniques ainsi que les cartes ont été conçues à l'aide du logiciel en ligne collaboratif EasyEDA (<https://www.easyeda.com/>). Les composants constituant ses cartes ont été achetés sur les sites spécialisés LCSC (<https://www.lcsc.com/>) et Mouser (<https://www.mouser.fr/>). Toutes les soudures de composants ont été (ou vont être) réalisées à la main avec les outils que l'on retrouve à la Fabrique de CentraleSupélec.

#### 3.3.1 Séquenceur

La carte séquenceur commande les actionneurs qui effectuent les actions indispensables au bon fonctionnement de la fusée. Sa conception est relativement simple afin d'assurer son bon fonctionnement lors du vol. Elle se compose principalement d'un micro-contrôleur (Teensy 4.1), de trois centrales inertielles, de deux optocoupleurs, de deux servomoteurs, d'une prise jack et d'un buzzer. Ses fonctions essentielles sont la détection de décollage, l'éjection de la coiffe et du cansat, l'éjection du parachute et enfin la mise en marche du buzzer pour assurer la récupération.

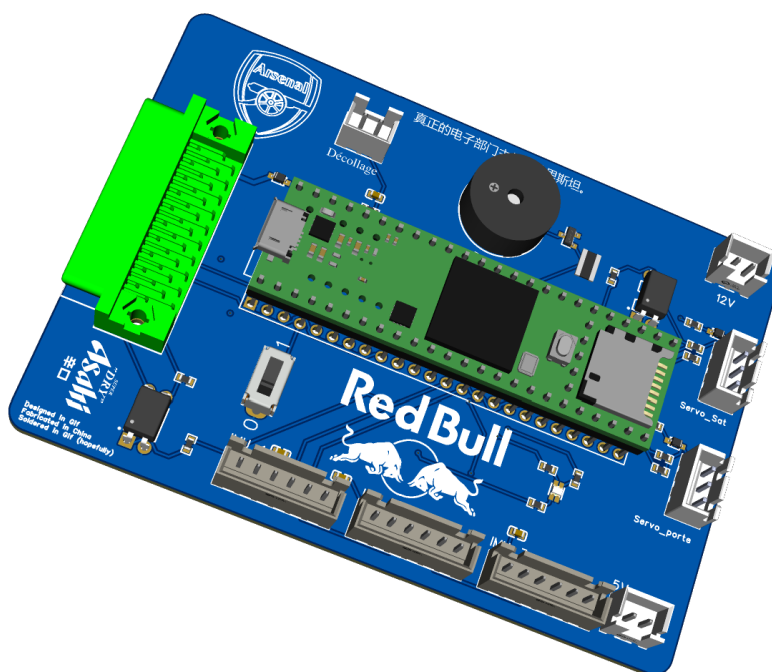


FIGURE 3.3 – Visualisation 3D de la carte SEQ

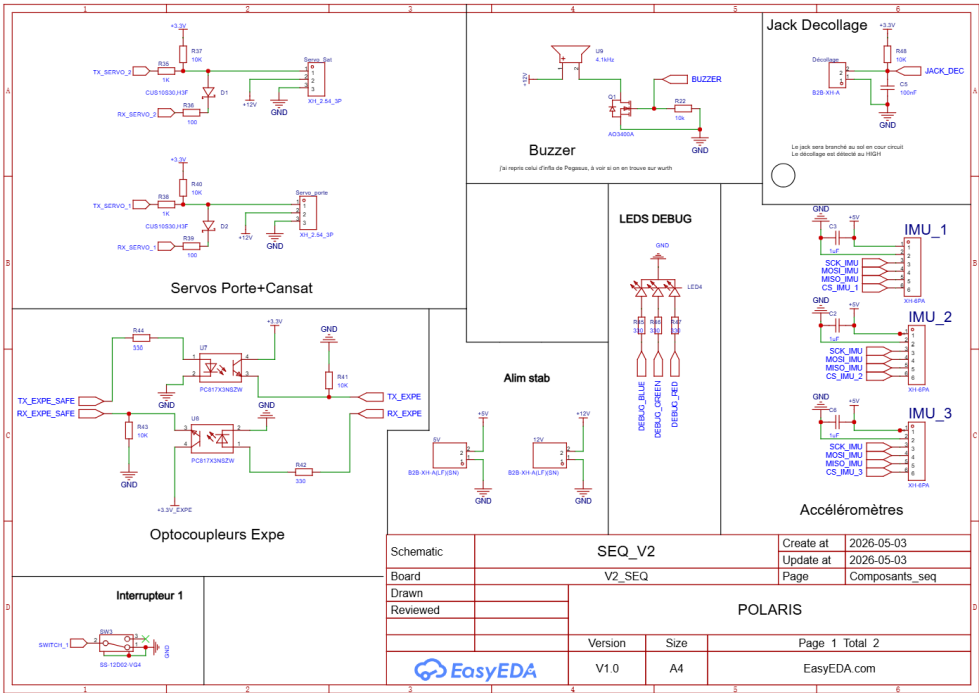


FIGURE 3.4 – Schéma électronique des composants de Seq

### Alimentation de la carte

Conformément au cahier des charges, la carte séquenceur est alimentée indépendamment de la carte expérience. Le bus alimente la carte en 5V et en 12V pendant le vol, et la carte peut être branchée en 5V et 12V pour pouvoir être testées sans mobiliser les cartes Alim et BMS. Les servomoteurs et le Buzzer ont été dimensionnés pour ne nécessiter que du 12V afin d’alléger les besoin sur la carte Alim. On enverra au maximum 500mA par 5V et 1A par 12V.

### Servomoteurs

Les servomoteurs embarqués sur la fusée sont les **Waveshare ST3215**. Ils ont été choisis car ils convenaient à l’alimentation 12V et l’association possédait une certaine expertise sur ce modèle de servomoteurs. Il consomme 180mA en fonctionnement à vide (nominal) et monte à 2700mA en blocage, cependant le servomoteur fournit la valeur de couple déployé ce qui permettra de limiter les servomoteurs à 500mA.

### Centrale Inertielle

Deux centrales inertielle 6 axes embarquées sont des modules **ICM42688P**, la troisième est un module 9 axes **BNO055**. Ils ont été préférés à un simple composant IMU sur la carte séquenceur puisque les modules permettent de faciliter grandement la soudure de la carte qui était commandée avec les IMU déjà soudés dessus les années précédentes augmentant considérablement les coûts. On a choisi d’utiliser 2 accéléromètre 6 axes et un 9 axes pour permettre à l’équipe software de déterminer le roulis avec précision

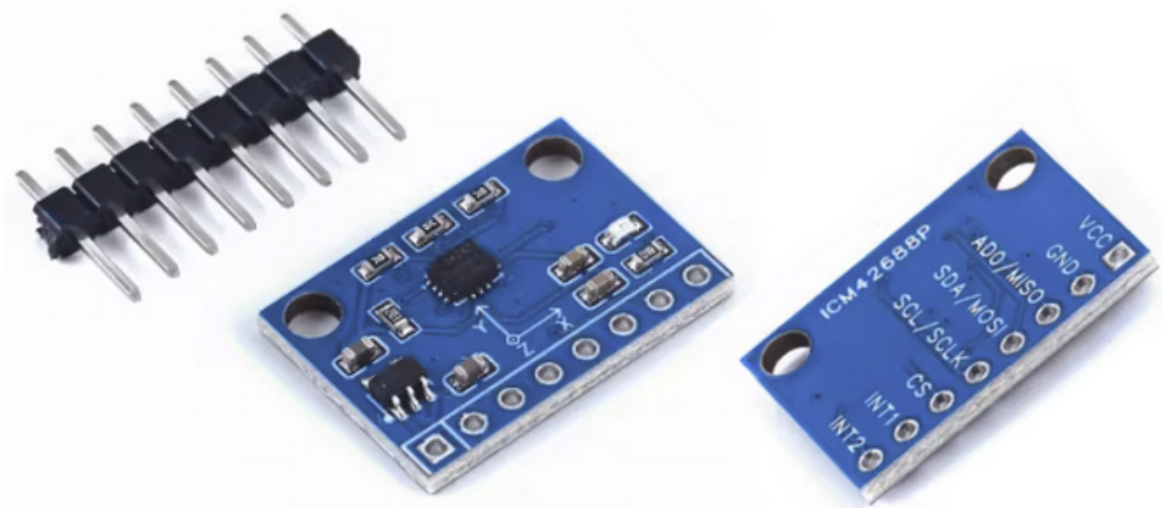


FIGURE 3.5 – Module IMU ICM42688P

### Optocoupleurs

Dans le but de respecter le cahier des charges qui impose de ne pas avoir de lien électrique entre les cartes Expérience et Séquenceur. On utilise des optocoupleurs afin de transmettre des informations à la carte Expérience depuis Séquenceur sans lien électrique. Cela permet par exemple de signaler la détection de décollage à la carte Expérience sans avoir deux detections indépendantes associées à une seule carte. On utilisera deux optocoupleurs afin de communiquer de façon réciproque entre les deux cartes. Les optocoupleurs nous permettent de communiquer à la carte Expe les valeurs des Imus.

### Détection de décollage

La détection de décollage se fait par un câble jack qui sera branché à l'extérieur de la fusée et qui se détachera au décollage. C'est la manière que nous avons jugé la plus fiable de détecter le décollage.

### Buzzer

Le Buzzer a pour but de faciliter la récupération de la fusée post-vol conformément au cahier des charges (SEQ4). Il sera mis en marche après le vol et émet 90dB à 10cm en 2048Hz.

### 3.3.2 Expérience

La carte expérience sert à réaliser toutes les fonctions non primordiales au vol de la fusée, et qui commandent les expériences de Polaris. En particulier les composants présents sur cette carte peuvent être divisés en 3 catégories : les capteurs, la teensy + buses, et les composants servant aux autres fonctions. Ces autres fonctions comprennent entre autres le contrôle des aérofreins et du roulis, qui permettent de contrôler la trajectoire de la fusée.

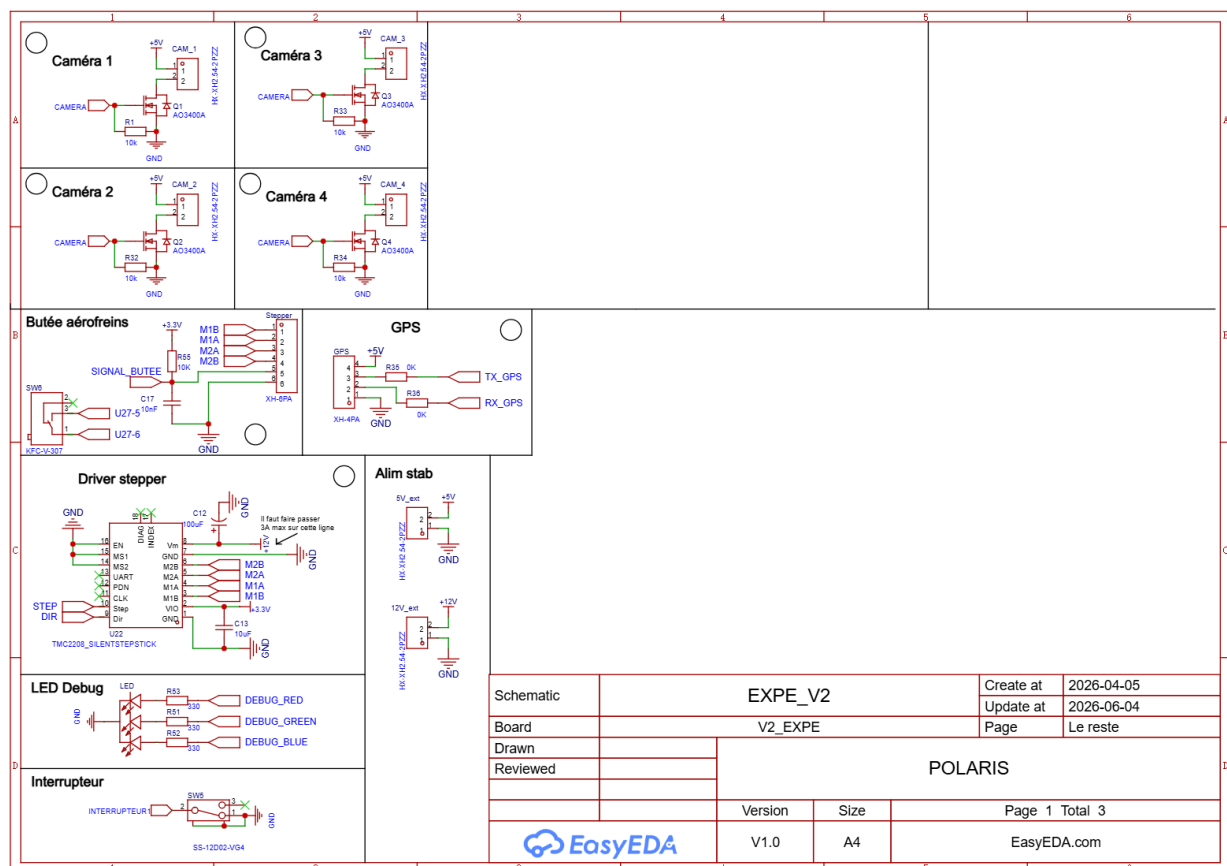


FIGURE 3.6 – Schéma électronique des autres fonctions sur la carte Expe

## Caméras

En premier lieu, nous avons décidé d'inclure 4 caméras à notre système. Nous utilisons des caméras Runcam Thumb pro 4K V2. Leur intégration dans la fusée a été discutée et prévue avec la partie méca, afin d'obtenir des images de la fusée de différents point de vue. La répartition retenue est : une au niveau de la coiffe pour voir l'éjection du cansat, une prêt du parachute pour voir son éjection, une qui filme les aérofreins, et une qui filme la poussée moteur.

## GPS/GNSS

Le GPS est externe aux cartes électroniques. Il s'agit d'un module à part entière, relié à la carte expé via des ports dédiés. L'intérêt est de pouvoir réutiliser ce module pour des projets futurs du pôle espace, et d'alléger la carte expé. Le module est doté d'un contrôleur interne **GPS UBLOX CAM M8**. Il contient des antennes active, interne et externe. La position est enregistrée en mémoire.

## Alim stab

Ces trois modules permettent de redistribuer la puissance nécessaire au fonctionnement de la carte. En particulier les 3 tensions utilisées dans cette carte sont 3.3V, 5V et 12V. L'alim stab permet ainsi de faire le lien avec la puissance envoyée depuis la carte alimentation.

## Interrupteur

L'interrupteur sert comme mesure de sécurité pour protéger la carte en cas de problèmes. Un autre interrupteur est relié à la carte interface et peut être activé directement durant la chronologie.

Led

Dans la même optique, des leds de débogage ont été installées. Ces led permettent de s'assurer du bon fonctionnement lors des tests des différents sous-systèmes de la carte expé. Ils sont notamment reliés à la carte interface via le bus dédié (pin DIN\_LED\_INTERFACE). Il s'agit d'une fonction particulièrement utile durant la chronologie.

## Driver stepper

Le driver stepper permet de contrôler le stepper des aérofeins. [mettre la référence / photo du stepper] Ce stepper permet de contrôler l'ouverture et la fermeture des aérofreins, une des expé-

riences primordiale de Polaris. Le driver stepper est un modèle TMC2208 [mettre photo du driver] Ce modèle comporte différentes entrées / sorties : - PDN et UART : ce sont les pins qui permettent de gérer le courant envoyé dans le moteur, pour éviter une surchauffe par exemple [Led] Dans la même optique, des leds de débbugage ont été installées. Ces led permettent de s'assurer du bon fonctionnement lors des tests des différents sous-systèmes de la carte expé. Ils sont notamment reliés à la carte interface via le bus dédié (pin DIN\_LED\_INTERFACE). Il s'agit d'une fonction particulièrement utile durant la chronologie. - CLK : l'horloge du système - MS1 / MS2 : le branchement de ces pins permet de savoir la résolution micro-pas. Ils sont tous les deux reliés à la masse (GND), donc en mode Standalone cela correspond à une résolution de 1/2 pas - M2B / M2A / M1B / M1A : il s'agit de la sortie de notre driver, qui va dans le stepper. Ce dernier est constitué de deux bobines de cuivre indépendantes (MA et MB).

### Butée

La butée sert de sécurité pour protéger les aérofreins. On récupère les données envoyées en sortie par le driver stepper pour les moteurs. On ajoute en plus deux entrées : butée ouverte et fermée. Cela permet de s'assurer que lorsque les aérofreins sont en position fermée le moteur s'arrête et ne continue pas de forcer, ce qui risquerait de casser les aérofreins et endommager la structure.

### Partie Capteurs

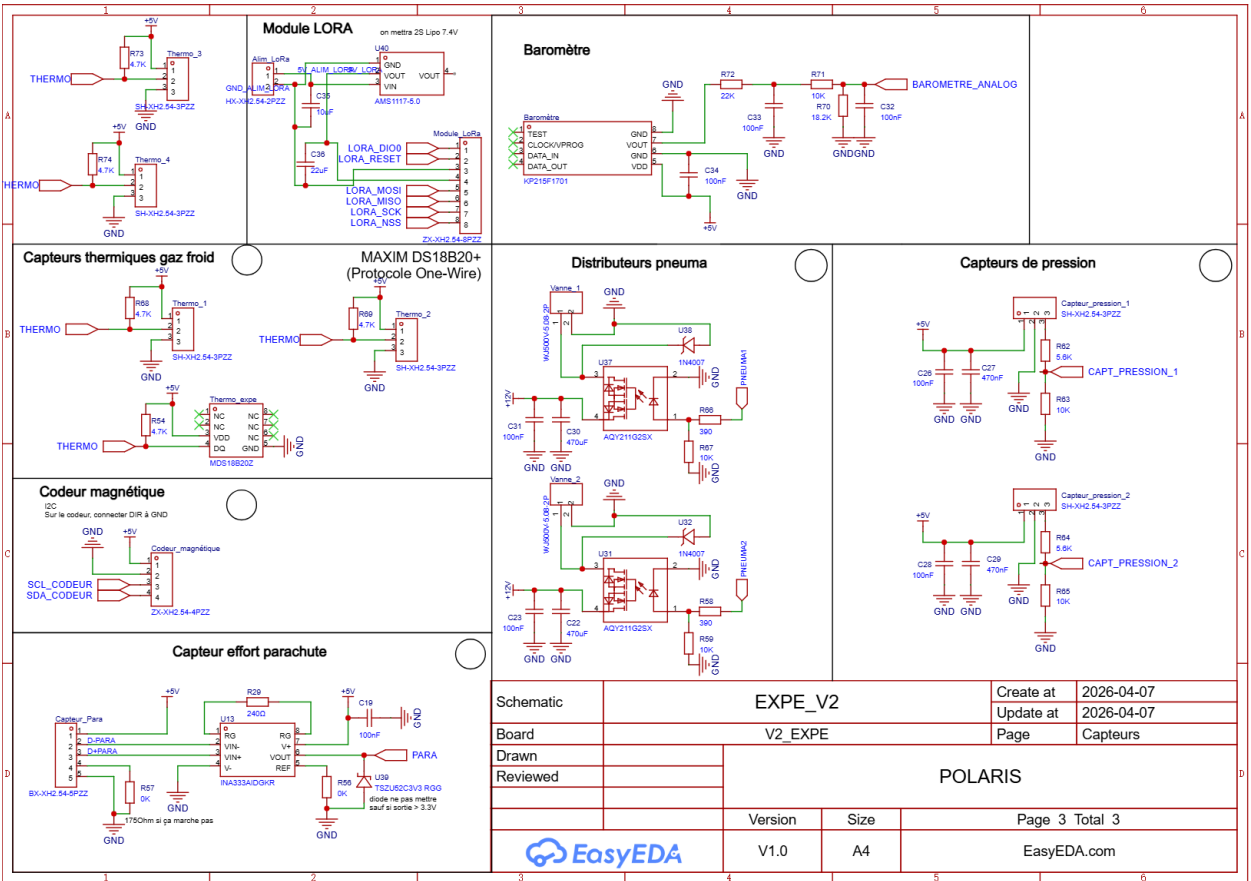


FIGURE 3.7 – Schéma électronique des capteurs sur la carte Expe

### Baromètre

Le baromètre est placé directement sur la carte expé. Il s'agit d'un modèle MS5837-02BA, qui peut mesurer entre 300 et 1200 mbar.

### Module Lora

Le modèle de la Lora est RFM95W. Elle permet de communiquer entre les différents sous-systèmes et avec la partie soft. La Lora dispose de sa propre alimentation, ainsi que son Gnd, qui ne sont pas reliés à la Teensy.

### Capteur effort parachute

Le parachute est soumis à des forces de torsion très importantes durant le déploiement, et durant la descente de la fusée. Il est donc intéressant de mesurer cet effort. Pour cela nous utilisons un capteur de tension.



Capteur thermique gaz froid

Le contrôle de roulis utilise un gaz afin de diriger la rotation de la fusée. Prévoir très précisément les caractéristiques de ce gaz (pression, température, écoulement...) est donc nécessaire au bon fonctionnement du roulis. Pour cela, deux capteurs thermiques (un pour chaque vanne du rouli) ont été intégrés à la carte expé.

Distributeur pneumatique

Pour continuer sur le roulis, ce dernier utilise deux vannes qui contrôlent le débit du gaz et donc le roulis de la fusée. Ce contrôle des vannes passe par un distributeur pneumatique situé sur la carte expé. Il y en a deux, un pour chaque vanne. Il s'agit principalement de faire le lien entre le soft et la partie méca du roulis, pour cela nous utilisons des relais SSR (pour Solid State Relay) qui permettent d'ouvrir et fermer les électrovannes. On a choisi les relais Panasonic AQY211G2S pour leur capacité à fournir les 12V 2A nécessaire aux vannes mais aussi à leur temps de réponse très faible inférieur à 5ms.

Capteur de pression

Le rouli fonctionne avec une bonbonne sous haute pression, qui est ensuite diminuée. Le capteur de pression est situé en sortie des électrovannes (il y en a donc 2 - un pour chaque distributeur) afin de s'assurer que la pression est conforme aux valeurs prédites.

Codeur magnétique

On utilise un codeur magnétique pour obtenir des mesures de position angulaire. De cette manière, on peut introduire un retour d'information sur la position réelle de l'arbre, rendant possible un fonctionnement en boucle fermée, en comparant la position mesurée à la position commandée. Cela permet de détecter et de corriger les pertes de pas. Ce module est utilisé pour les aérofreins.

Partie Teensy et bus

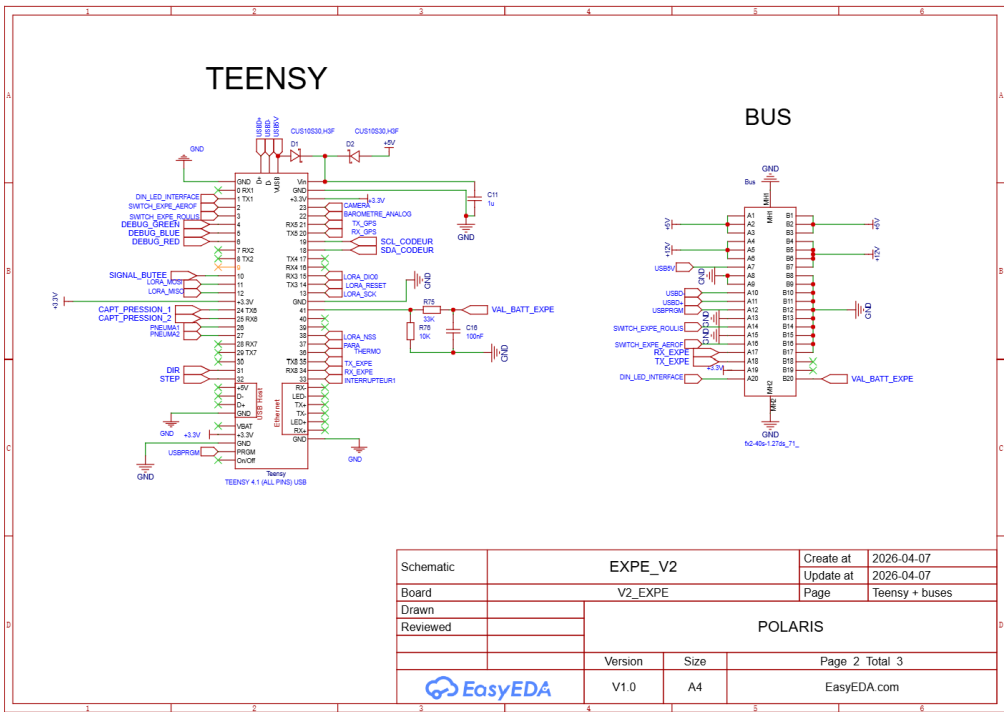


FIGURE 3.8 – Schéma électronique des bus et de la Teensy sur la carte Expe

Teensy + buses

Il s'agit d'une TEENSY 4.1. La teensy permet de faire le lien entre les différents sytsèmes de la carte, ainsi que l'alimentation. A cette teensy est relié un bus, qui permet de faire le lien avec le soft et les autres cartes du stack élec. On re trouve en particulier toutes les sorties USB, ainsi que les diodes, l'interrupteur, et l'entrée / sortie de la carte expé qui est utilisé par la carte interface. Des couches de cuivre ont été utilisées sur le top et bottom de la carte. En particulier, des couches GND recouvrent la majorité de la carte. D'autres couches ont été rajoutées pour simplifier et alléger le routage. Les couches inner 1 et 2 n'ont pas été utilisées.

Choix des placements

Nous avons décidé de regrouper les composants avec des résistances / condensateurs d'un même côté de la carte. Cela permet de souder ces petits composants avec un four, ce qui assure une meilleure précision qu'un soudage manuel.

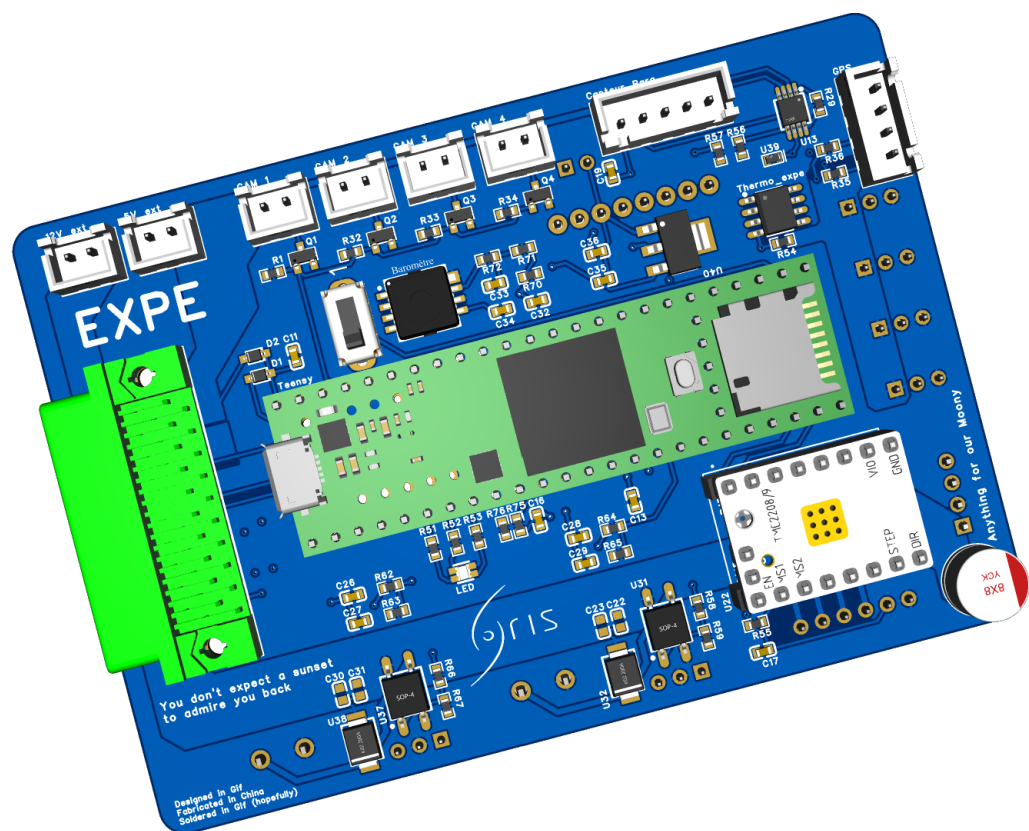


FIGURE 3.9 – Visualisation 3D de la carte Expe de face

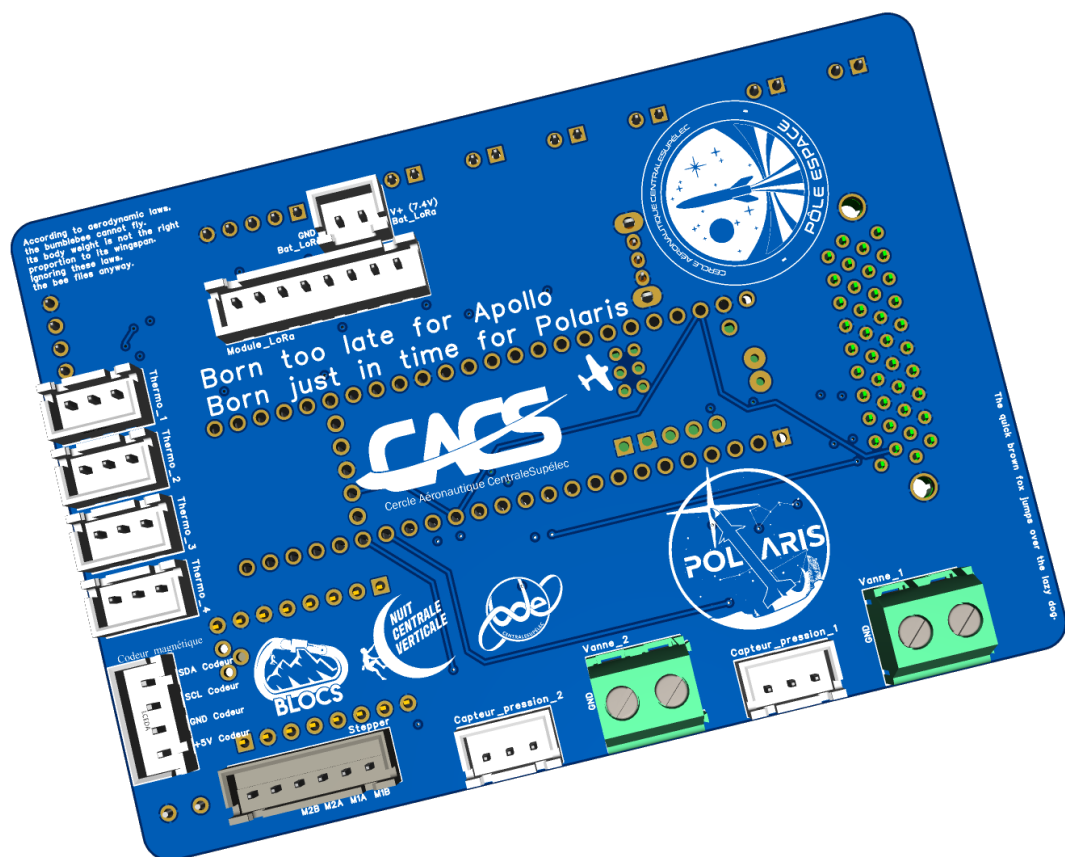


FIGURE 3.10 – Visualisation 3D de la carte Expe de derrière

3.3.3 Alimentation

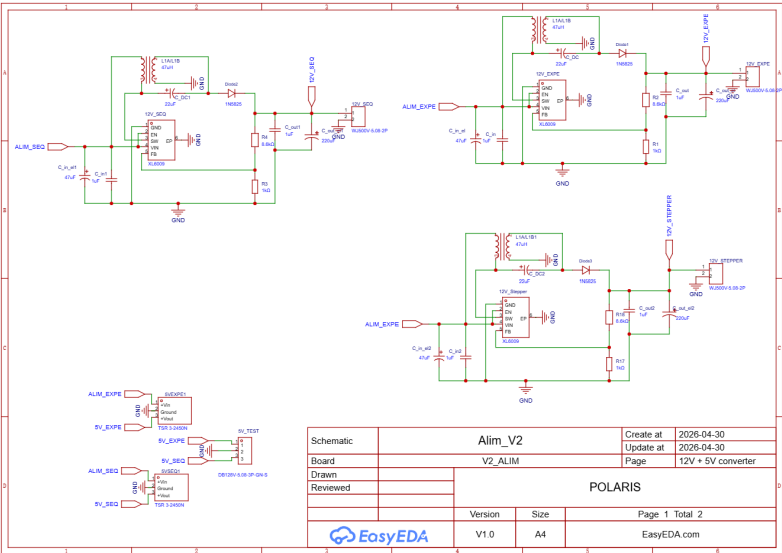
Le système d'alimentation assure la distribution de la puissance à l'ensemble du système électronique. Alimentée par le BMS via le connecteur XT30, cette carte fournit le courant aux cartes expérimentale et séquentielle via la carte interface. Concrètement, elle alimente cinq circuits distincts nécessitant des tensions nominales différentes. Pour ce faire, la carte d'alimentation intègre cinq convertisseurs DC-DC transformant la tension d'entrée de 12,6 V vers les niveaux suivants :

Pour la carte expérimentale :

- 5 V : Teensy, capteurs, LoRa, GPS, interface LED, caméras
- 12 V : distributeurs de roulis et module driver des aérofreins

Pour la carte séquentielle :

- 5 V : Teensy, accéléromètre, interface LED
- 12 V : servomoteurs



Nous avons sélectionné le convertisseur **XL6009E1** (XLSEMI) pour les rails 12V, configuré respectivement en mode Boost et Buck-Boost. Quant aux rails 5V, leur conversion est assurée par le module **TSR-3-2450N** (TRACO Power). Enfin, l'acheminement de la puissance vers les autres cartes est assuré via le connecteur **FX2-40S-1.27DS** (Hirose Electric).

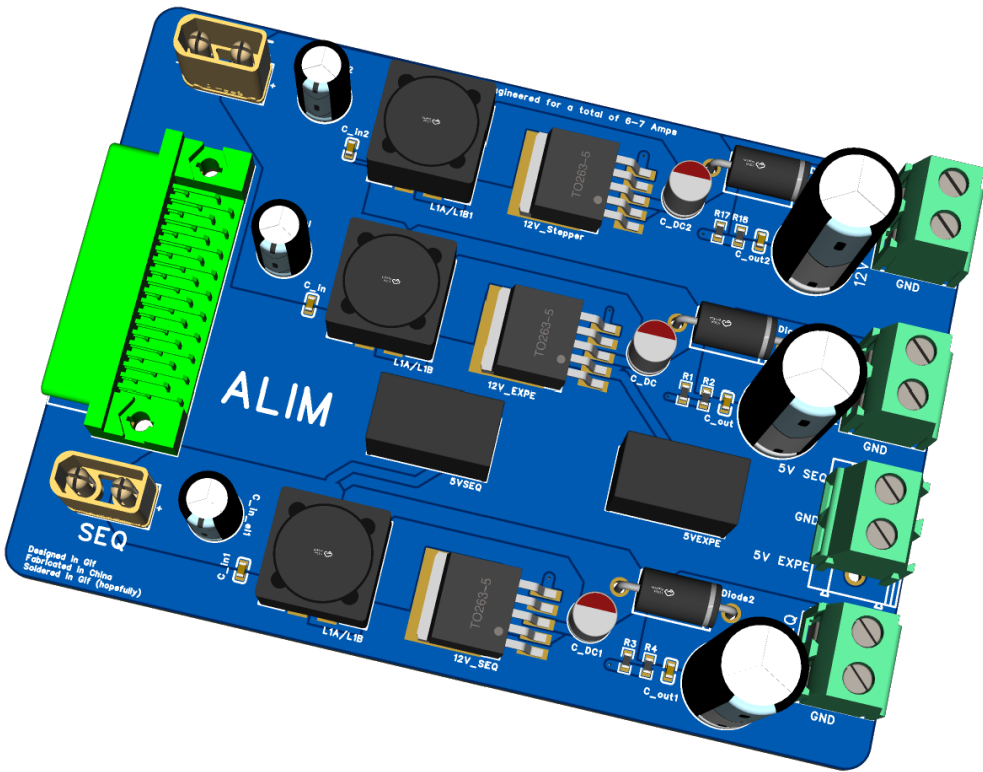


FIGURE 3.11 – Visualisation 3D de la carte Alim

3.3.4 Interface

La carte électronique d'interface utilisateur a pour rôle d'assurer le lien fonctionnel entre l'utilisateur, le logiciel embarqué et les sous-systèmes mécaniques et électroniques de la fusée (tel que le GPS ou la Séquence de décollage).

Elle constitue le point central de supervision, de commande et de diagnostic du système embarqué, aussi bien lors des phases de développement, de test, que lors de la préparation au vol.

La carte d'interface fournit à l'utilisateur des informations visuelles immédiates sur l'état de la fusée via des indicateurs lumineux (LED). La carte permet des actions manuelles simples (reset, sélection de modes ou paramètres) sans accès direct au code. Chaque sous-système est associé à un indicateur lumineux permettant de signaler : son état de fonctionnement, la présence d'un défaut, ou son activation selon le mode de fonctionnement défini.

La présence de ports USB-C est dédiée au téléversement du code et au débogage du microcontrôleur. Ces ports permettent une connexion directe à un ordinateur sans démontage de la fusée. Les boutons de reset permettent de forcer le redémarrage du microcontrôleur.

La carte électronique d'interface permet une interaction simple et fiable entre l'utilisateur et les sous-systèmes complexes de la fusée, notamment pour la chronologie de lancement.

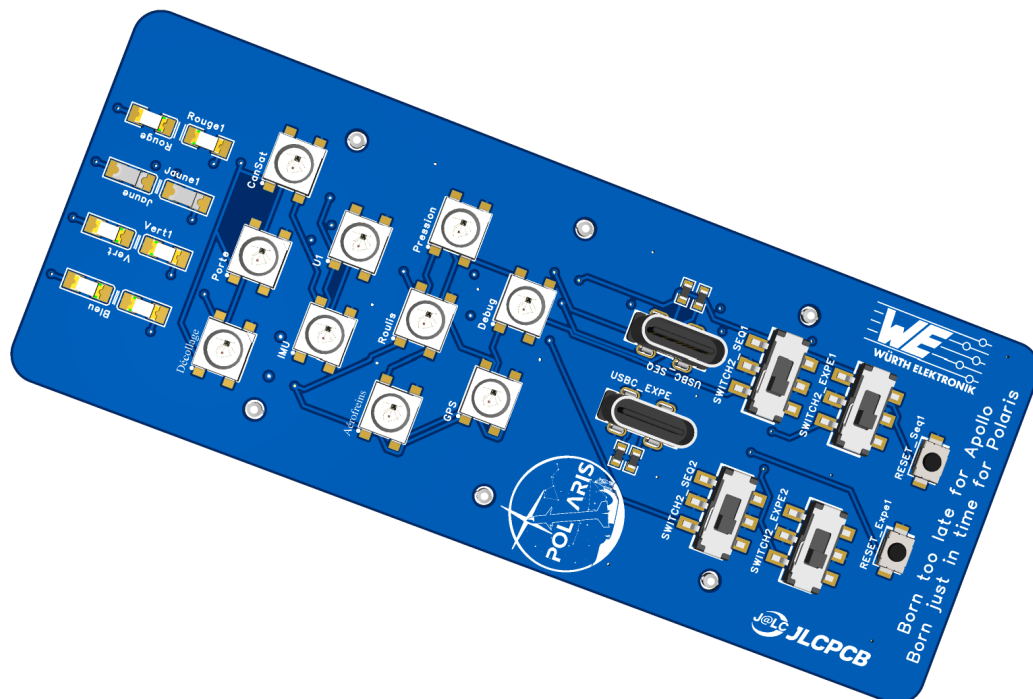


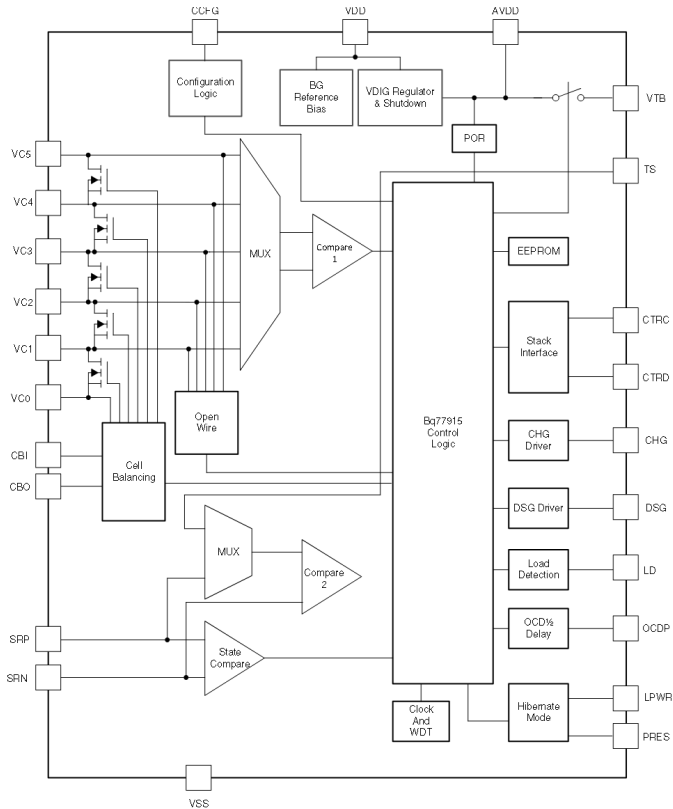
FIGURE 3.12 – Visualisation 3D de la carte Interface

### 3.3.5 BMS

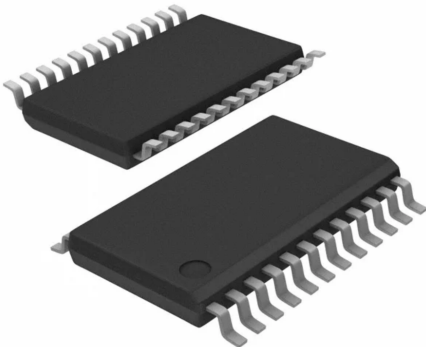
Le Battery Management System est "*un organe de sécurité « intelligent », permettant de protéger une batterie ou un ensemble d'accumulateurs, contre des circonstances potentiellement dommageables, à plus ou moins long terme. Cette protection est d'ailleurs multiple, car les BMS protègent de plusieurs choses à la fois, avec de base, des protections contre tout ce qui est surtension, sous-tension, et surintensité.*" Les BMS sont des protections essentielles lors de l'utilisation de "*cellules lithium, dénuées de protection, que ce soit au moment de la charge ou de la décharge, peut conduire à des départs d'incendies, des dégagements gazeux très dangereux, ou des explosions soudaines.*" (Citations tirées du site spécialisé <https://passionelectronique.fr/bms-fonctionnement-choix-18650-lithium/>)

Nous avons fait le choix de fabriquer notre propre carte BMS en s'appuyant sur un ancien projet du CACS. Nous utilisons donc la puce **BQ7791500PWR** de chez Texas Instruments.

Functional Block Diagram



(a) Schéma fonctionnel du BQ7791500PWR



(b) Visuel du BQ7791500PWR

Pour la carte elle-même, nous avons fait le choix de n'utiliser que la partie de décharge que la puce fournit, car la charge contrôlée des batteries lithium-ion sera réalisé avec un chargeur dédié. Ainsi les batteries seront intégrées dans le stack élec de manière à être retirées facilement pour les charger.

Pour la carte BMS nous avons suivi le circuit électronique conseillé par le fabricant pour une mise en série de 3 batteries lithium-ion (format 18650).

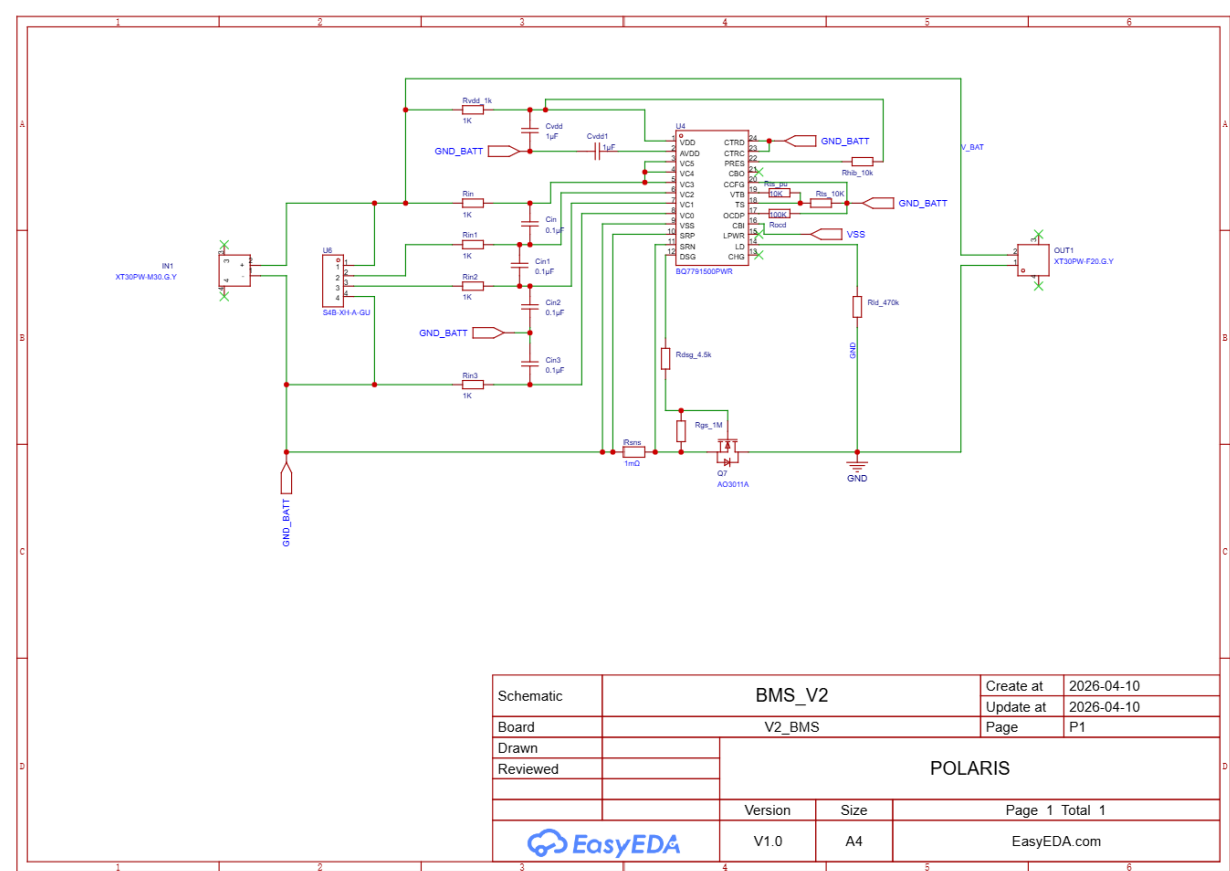


FIGURE 3.14 – Schéma électronique du BMS



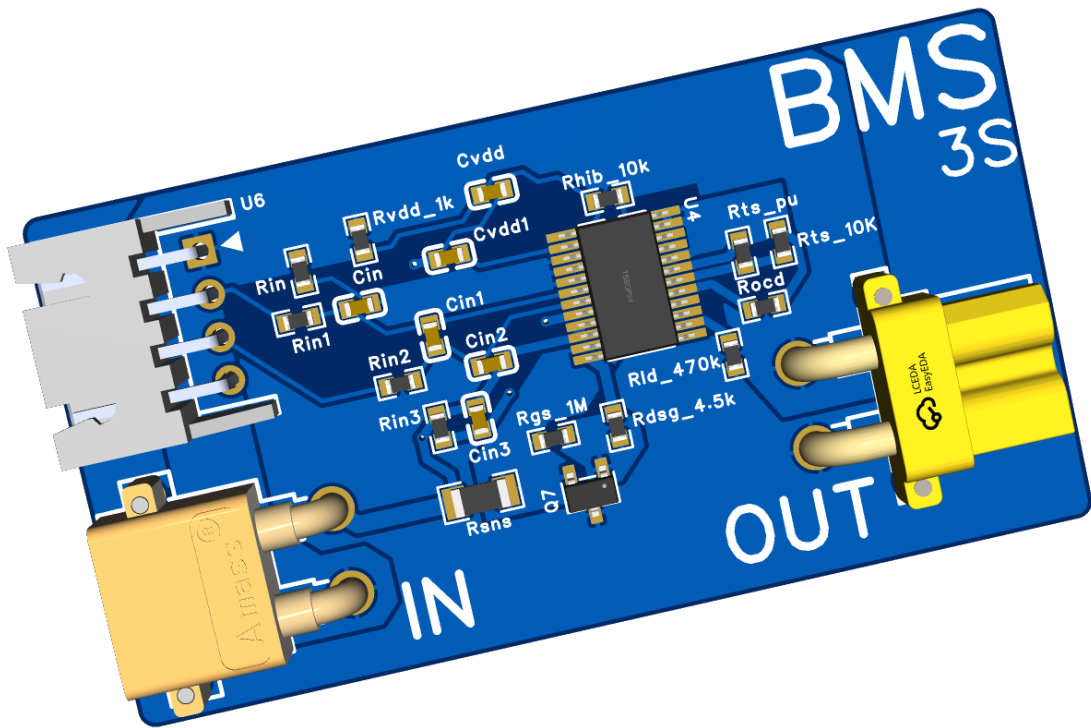


FIGURE 3.15 – Visualisation 3D du BMS

### 3.3.6 Batteries

Les batteries choisies sont des accumulateurs lithium-ion au format 18650 de 3400 mAh fabriquées par Samsung Electronics (*modèle INR18650-35E*).

Les batteries seront reliées en série par soudure par points à l’aide de bande de nickel. Pour assurer l’autonomie totale du système, chaque pack sera dimensionné selon la consommation maximale.

L’intégration du pack de batterie sera réalisée en commun avec l’équipe méca qui s’occupe de la structure interne.

La batterie possède une tension de charge en 4.2V et on obtient donc pour 3 batteries en séries 12.6V. Nous avons dimensionné l’autonomie pour garantir 3h au séquenceur

Voici un tableau de consommation en puissance prenant en compte les composants les plus importants du stack élec :



FIGURE 3.16 – Photo de la batterie choisie

| Composants        | Nombre | Carte | Tension (V) | Intensité nominale (mA) | Puissance totale (W) |
|-------------------|--------|-------|-------------|-------------------------|----------------------|
| Accéléromètre IMU | 1      | Seq   | 5           | 50                      | 0.250                |
| Buzzer            | 1      | Seq   | 12          | 65                      | 0.78                 |
| Servomoteur       | 2      | Seq   | 12          | 500                     | 12                   |
| Teensy            | 1      | Seq   | 5           | 250                     | 1.25                 |
| Total             |        | Seq   |             |                         | 14.28                |

| Composants            | Nombre | Carte | Tension (V) | Intensité nominale (mA) | Puissance totale (W) |
|-----------------------|--------|-------|-------------|-------------------------|----------------------|
| Baromètre             | 1      | Expe  | 5           | 1                       | 0.005                |
| LoRa                  | 1      | Expe  | 3.7         | 50                      | 0.185                |
| Capteur thermique     | 2      | Expe  | 3.3         | 20                      | 0.132                |
| Codeur magnétique     | 1      | Expe  | 5           | 100                     | 0.5                  |
| Capteur d'effort para | 1      | Expe  | 5           | 20                      | 0.1                  |
| GPS                   | 1      | Expe  | 5           | 20                      | 0.1                  |
| GSM                   | 1      | Expe  | 3.7         | 2000                    | 7.4                  |
| Driver TMC2208        | 1      | Expe  | 24          | 2000                    | 48                   |
| Caméra                | 4      | Expe  | 5           | 500                     | 2.5                  |
| Electrovanne          | 2      | Expe  | 12          | 350                     | 8.4                  |
| Teensy                | 1      | Expe  | 5           | 250                     | 1.25                 |
| Total                 |        | Expe  |             |                         | 68.572               |

| Cartes | Puissance consommée (W) | Capacité embarquée de batterie (Wh) | Autonomie estimée (h) |
|--------|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| Seq    | 14.28                   | 42.84                               | 3                     |
| Expe   | 68.572                  | 85.68                               | 1.25 (soit 75min)     |

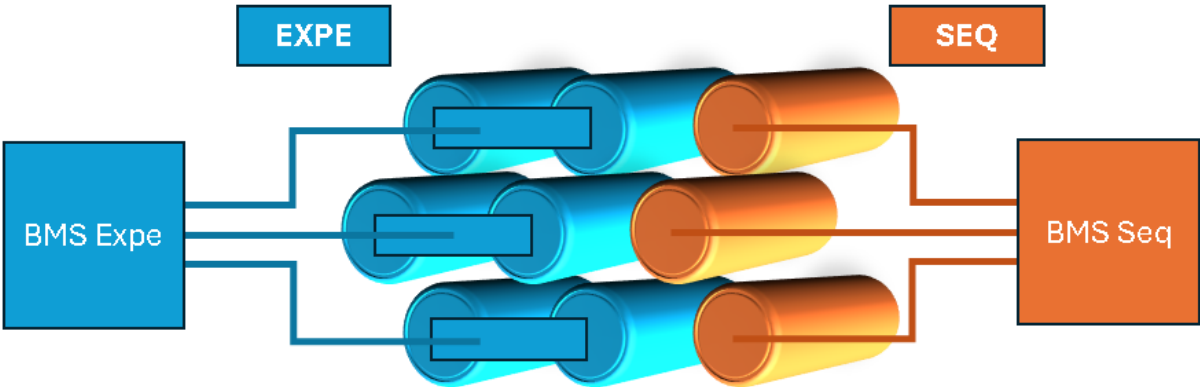


FIGURE 3.17 – Schéma fonctionnel des branchements des batteries

### 3.4 Câblage

Voici une visualisation préliminaire de l’agencement de la fusée, c’est-à-dire de l’intégration de l’électronique avec la structure interne du projet.



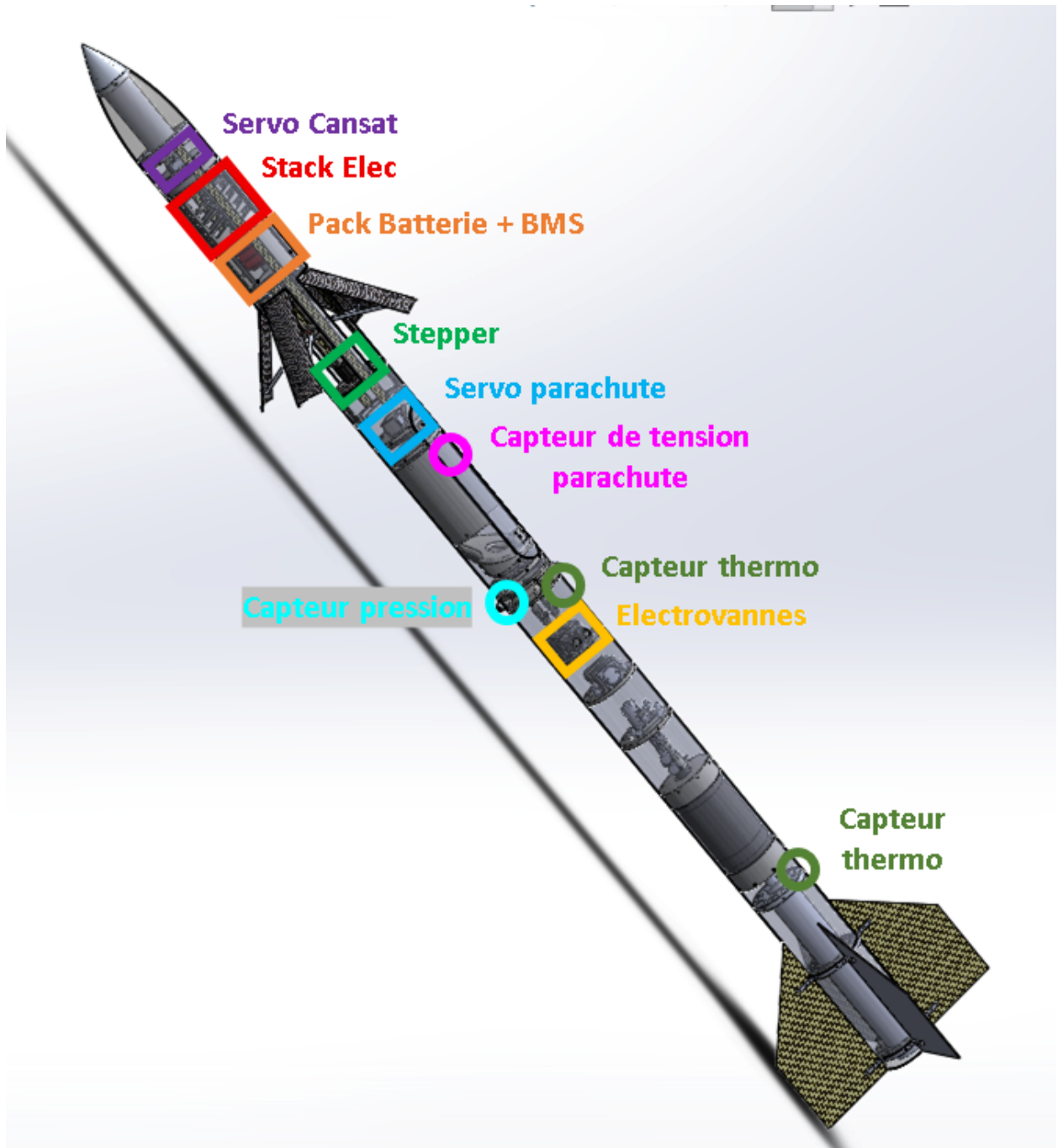


FIGURE 3.18 – Placement prévisionnel des capteurs

## 3.5 Télémétrie

Il y a deux éléments dans notre système qui émettent des signaux durant le vol. Il s'agit de la LoRa et de la GSM, toutes deux situées dans la carte expé. La règle TEL8 (page 34 du cahier des charges) nécessite que les systèmes de télémétrie possèdent leur propre source d'alimentation. On a donc décidé de les alimenter par deux batteries lithium-polymer de  $3.7V$  (1 batterie en série) qui seront branchées soit sur la carte Alimentation ou directement sur la carte Expe, en fonction de la place disponible sur les *PCB* ou sur les bus de l'interface.

### 3.5.1 SNR

Pour la LoRa, le modèle utilisé est RFM95W, et la fréquence de fonctionnement est 868 MHz. La puissance associée est 25 mW, soit 14 dBm. La Lora fonctionne comme système SNR (Signal-to-Noise-Ratio) afin d'envoyer des signaux qui permettent de gérer le bon déroulé du vol de la fusée.

Pour le calcul de la puissance de transmission, on utilise cette formule de transfert entre les *mW* et les *dBm* :

$$P_{dBm} = 10 \log_{10}(P_W) + 30$$

$$P_W = 10^{\frac{P_{dBm} - 30}{10}}$$

### 3.5.2 Cavaliers et points de tests

Nous avons prévu d'insérer des points de tests sur les capteurs de la carte expe, en ajoutant des pins à la manière d'une *breadboard*, sur lesquelles on peut se brancher pour récupérer le signal, soit à l'oscilloscope, soit avec un microcontrôleur annexe (type Arduino ®).

Pour ce qui est de la règle SNR1 qui impose de placer des cavaliers entre un capteur et le microprocesseur, il est possible d'ajouter à côté des pins de points de tests des switchs isolant les capteurs de la Teensy de la carte Expe. Tous les capteurs choisis possède dans leur construction les CAN et les filtre anti-repliement.

# Chapitre 4

## Soft

### 4.1 Expériences de mesure

#### 4.1.1 Définition de la chaine de télémesure

L'un des objectifs de développement de cette fusée est la transmission en temps réel des données de télémétrie vers une station de réception au sol. Pour cela, nous avons mis en place un protocole de communication basé sur la technologie LoRa. Les différents paramètres mesurés par les capteurs embarqués sont collectés tout au long du vol, puis convertis en une structure binaire optimisée afin de minimiser la taille des paquets transmis. Ces paquets sont ensuite envoyés via une interface LoRa. L'émetteur LoRa fonctionne avec :

- une fréquence de 868 MHz
- une puissance d'envoi de 25mW.

Afin de limiter la génération de courants induits lors de l'émission des trames, nous avons implémenté un système de mise en mémoire tampon (buffer) permettant d'accumuler un nombre  $n$  de paquets avant de les transmettre en une seule émission groupée.

Plus généralement, nous avons opté pour un mode de transmission multi-duplex entre la LoRa embarquée et la station sol. Lorsqu'un des deux dispositifs communique avec l'autre, le datagramme transmis contient, sous forme binaire, successivement : son identifiant, le type de message, puis, le cas échéant, les données associées au message — ici, les données de télémétrie.

L'interface LoRa sera également utile pour la localisation de la fusée après son atterrissage par triangulation, avec une antenne Yagi.

#### 4.1.2 Réalisation et évaluation des mesures

La fusée POLARIS effectue plusieurs mesures pendant son vol :

**[IMU]** Les trois accélérations et vitesses angulaires sont intégrées pour obtenir la position et l'orientation de la fusée dans le référentiel terrestre. Le calcul sera fait comme décrit ci-dessous. L'IMU peut mesurer des accélérations allant jusqu'à 16g, et le bruit résiduel de l'IMU sera moyenné sur une courte période de temps après initialisation du composant puis retranché aux mesures suivantes. La dérive dans le temps du calcul de la position sera évaluée et un filtre de Kalman liant les mesures de l'IMU et du GPS sera envisagé.

**[Baromètre]** La pression à l'extérieur de la fusée sera mesurée afin d'en déduire l'altitude de la fusée et la comparer au calcul inertiel. la conversion sera comme suit :  $P = P_0 \exp^{-\frac{\mu g h}{RT}}$ . La prédiction se fait donc selon le modèle classique de l'atmosphère. La résolution de la pression est de 0,016 mbar et l'erreur de mesure dépend de la température ambiante :

- $\pm 0,5$  mbar : Entre 600 et 1 000 mbar à 20 °C.
- $\pm 2,0$  mbar : Entre 300 et 1 100 mbar entre 0 et 60 °C.

**[Thermomètres]** Les thermomètres à l'extérieur de la fusée mesureront la température de l'air : ces mesures seront utilisées dans le calcul de la pression pour l'altitude.

**[Capteurs de tension]** Ils seront utilisés pour mesurer la tension des cordes du parachute à l'ouverture, afin de modéliser les efforts auxquels la fusée POLARIS sera soumise.

#### 4.1.3 Algorithme de navigation inertielle

##### 4.1.3.1 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  $M_0$  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  $a\vec{c}_0$  (en  $m/s^2$ ) et les mesures gyroscopiques  $g\vec{y}r_0$  (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  $\vec{U} = (U_x, U_y, U_z)^T = \frac{a\vec{cc}_0}{\|a\vec{cc}_0\|}$ . 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  $\alpha_0$  désiré.

On calcule un angle  $\beta$  permettant de tourner ces vecteurs pour avoir le bon azimut :

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

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

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

Ainsi, on obtient  $\mathbf{M}_0 = (\vec{t}_E \quad \vec{t}_N \quad \vec{U}) \times R(\beta)$  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  $M^T$  en quaternion  $q = q_i i + q_j j + q_k k + q_w$ .

L'algorithme de conversion est comme suit :

```

1 float* rotMatrixToQuat(float M[3][3]) {
2     float T = M[0][0] + M[1][1] + M[2][2]; // Trace de M
3     // On determine le max entre la trace et les coef diagonaux
4     // pour garantir la stabilite numerique
5     float temp1 = max(M[0][0], M[1][1]);
6     float temp2 = max(M[2][2], T);
7     float m = max(temp1, temp2);
8     float qmax = 0.5 * sqrt(1.0 - T + 2.0 * m);
9
10    if (m == M[0][0]) {
11        quat[0] = qmax;
12        quat[1] = (M[0][1] + M[1][0]) / (4.0 * qmax);
13        quat[2] = (M[0][2] + M[2][0]) / (4.0 * qmax);
14        quat[3] = (M[2][1] - M[1][2]) / (4.0 * qmax);
15    } else if (m == M[1][1]) {
16        quat[0] = (M[0][1] + M[1][0]) / (4.0 * qmax);
17        quat[1] = qmax;
18        quat[2] = (M[1][2] + M[2][1]) / (4.0 * qmax);
19        quat[3] = (M[0][2] - M[2][0]) / (4.0 * qmax);
20    } else if (m == M[2][2]) {
21        quat[0] = (M[0][2] + M[2][0]) / (4.0 * qmax);
22        quat[1] = (M[1][2] + M[2][1]) / (4.0 * qmax);
23        quat[2] = qmax;
24        quat[3] = (M[1][0] - M[0][1]) / (4.0 * qmax);
25    } else {
26        quat[0] = (M[2][1] - M[1][2]) / (4.0 * qmax);
27        quat[1] = (M[0][2] - M[2][0]) / (4.0 * qmax);
28        quat[2] = (M[1][0] - M[0][1]) / (4.0 * qmax);
29        quat[3] = qmax;
30    }
31 }

```

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

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

#### 4.1.3.2 Équation d'évolution du système

Soit  $x(t) = (v_x(t) \quad v_y(t) \quad v_z(t) \quad p_x(t) \quad p_y(t) \quad p_z(t) \quad q_i(t) \quad q_j(t) \quad q_k(t) \quad q_w(t))^T$  un vecteur représentant l'état du système à un instant  $t$ , avec  $\vec{v}(t) = (v_x(t) \quad v_y(t) \quad v_z(t))^T$  et  $\vec{p}(t) = (p_x(t) \quad p_y(t) \quad p_z(t))^T$

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 meilleure manière est d'utiliser la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4.

#### 4.1.3.3 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  $q(t)$ .

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

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= \text{atan2}(\langle \vec{Z}(t), \vec{E} \rangle, \langle \vec{Z}(t), \vec{N} \rangle) \\ &= \text{atan2}(2(q_i(t)q_k(t) + q_j(t)q_w(t)), 2(q_j(t)q_k(t) - q_i(t)q_w(t))) \end{aligned}$$

Avec la définition de  $\text{atan2}(y, x)$  :

$$\text{atan2}(y, x) = \begin{cases} \arctan(y/x) & \text{si } x > 0 \\ \arctan(y/x) + \pi & \text{si } x < 0 \text{ et } y \geq 0 \\ \arctan(y/x) - \pi & \text{si } x < 0 \text{ et } y < 0 \\ \pi/2 & \text{si } x = 0 \text{ et } y > 0 \\ -\pi/2 & \text{si } x = 0 \text{ et } y < 0 \\ \text{non définie} & \text{si } x = 0 \text{ et } y = 0 \end{cases}$$

## 4.2 Étalonnage des capteurs

### 4.2.1 Étalonnage du capteur de tension

Le capteur de tension prendra place sur les cordes du parachute principale de Polaris. Avant de l'utiliser, nous allons l'étalonner sur environ 10 points, avec le procédé suivant :

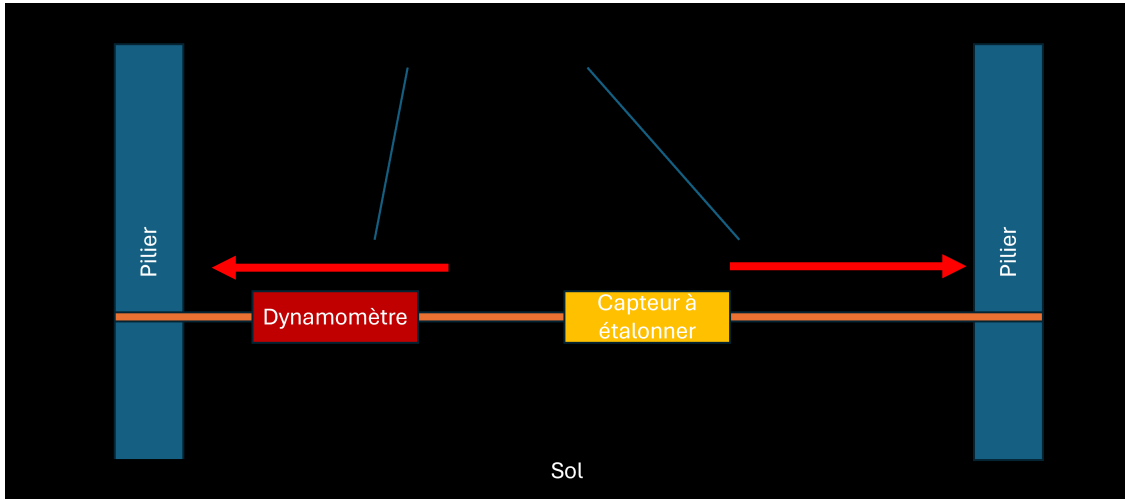


FIGURE 4.1 – Principe de l'étalonnage du capteur de tension des cordes parachute

Le capteur sera soumis à différentes tension appliquées par la slackline, et la valeur de sa tension électrique sera relevé sur environ 10 points.

#### 4.2.2 Étalonnage du baromètre

Le baromètre est calibré individuellement en usine. Le protocole d'étalonnage consiste donc à lire les coefficients de correction propres à chaque composant stockés dans sa mémoire PROM et à les appliquer aux données brutes. Les données et la précision seront obtenus comme suit :

Différence de température :

$$dT = D_2 - C_5 \cdot 2^8$$

Température réelle (0,01°C de résolution) :

$$TEMP = 2000 + dT \cdot \frac{C_6}{2^{23}}$$

Offset à la température actuelle :

$$OFF = C_2 \cdot 2^{17} + \frac{C_4 \cdot dT}{2^6}$$

Sensibilité à la température actuelle :

$$SENS = C_1 \cdot 2^{16} + \frac{C_3 \cdot dT}{2^7}$$

### 4.3 Algorithmes de contrôle

La fusée POLARIS intègre deux système de control dynamique de vol, qui nécessitent un asservissement réalisé de manière autonome.

#### 4.3.1 Algorithme de contrôle du roulis

Deux solutions sont envisagées pour le contrôle du roulis :

- un contrôle réalisé en utilisant un correcteur PID agissant sur la position et la vitesse angulaire relatives de la POLARIS par rapport à une position d'origine prédéfinie
- un contrôle se basant sur une disjonction de cas selon la position vitesse et accélération de la fusée, décidant de l'opération à réaliser parmi [ $RCS_{gauche}$ ,  $RCS_{droit}$ ,  $Standby$ ]

Dans les deux cas, le comportement attendu sera proche du suivant :



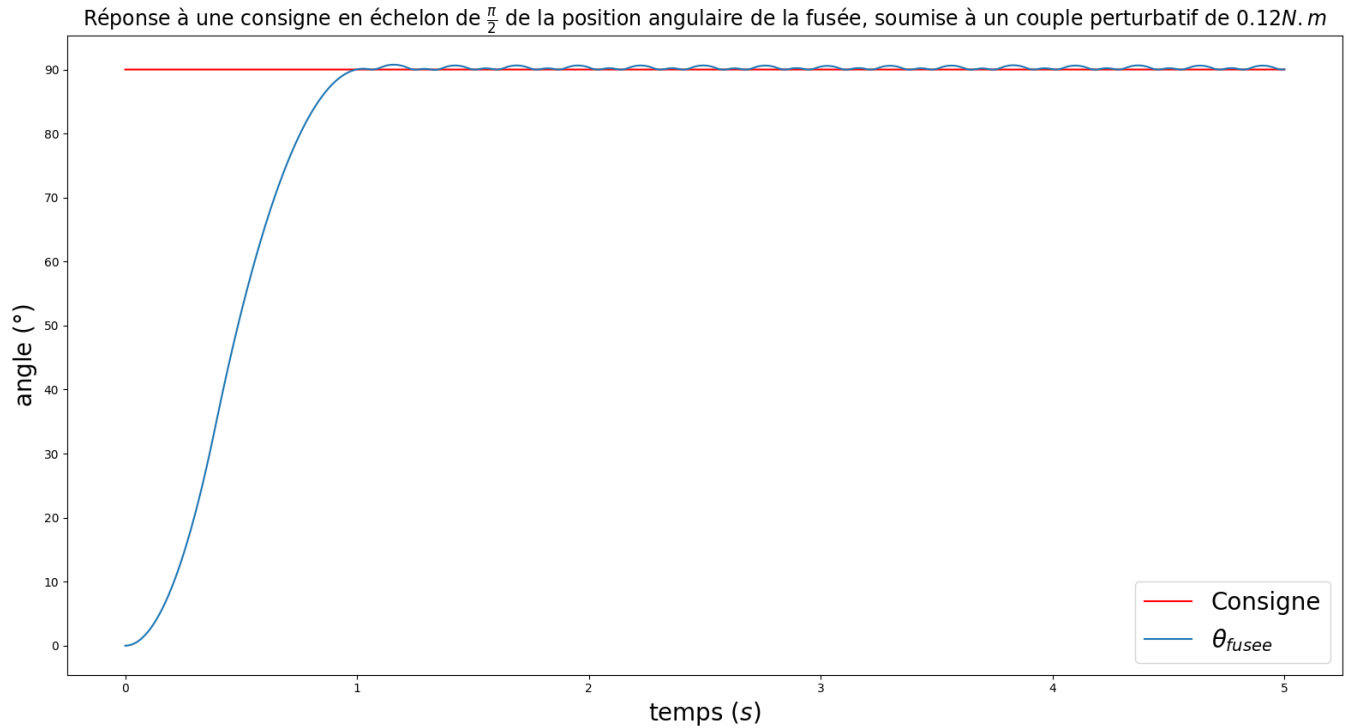


FIGURE 4.2 – Exemple d’asservissement par disjonction de cas

La solution finale retenue est la mise en place d’un correcteur de type proportionnel dérivé.

### 4.3.2 Algorithme de l’aérofrein

L’asservissement de la fusée POLARIS en altitude sera fait par un correcteur PID agissant sur l’ouverture et la fermeture des aérofreins. Le code simulera l’altitude à l’apogée en prenant en compte l’altitude et la vitesse de la fusée à un instant  $t$  et en appliquant les coefficients de traînée calculés par le module *FlowSimulation* de SOLIDWORKS.

```

1 def control(z, v, angle_azimuth, angle_airbrake, target_altitude):
2     """
3     Airbrake control
4     """
5
6     # PID controller
7     Kp = ?
8     Ki = ?
9     Kd = ?
10
11     vx = v*cos(angle_azimuth)
12     vz = v*sin(angle_azimuth)
13     g = 9.81
14     rho_air = 1.204
15     mass=14.19
16     S = get_S(angle_airbrake)*1e-6
17     Cx = get_Cx(angle_airbrake,v)
18
19     # simulating flight if no changes are made
20     simu_dt = 0.01
21     simuz,simuvx,simuvz = z,vx,vz
22     while simuvz>0:
23         F = 0.5*rho_air*Cx*S*(simuvx**2+simuvz**2)
24         Fx,Fz = -F*simuvx/(simuvx**2+simuvz**2)**0.5, -F*simuvz/(simuvx**2+simuvz
25         **2)**0.5
26         simuvx,simuvz = simuvx+Fx/mass*simu_dt, simuvz + (Fz/mass -g)*simu_dt
27         simuz = simuz+simuvz*simu_dt
28
29     new_angle_airbrake = angle_airbrake + Kp*(target_altitude-simuz) + Kd*vz
30     + Kp*(A+z*dt)
31     if new_angle_airbrake<0:new_angle_airbrake=0
32     if new_angle_airbrake>pi/4:new_angle_airbrake=pi/4
33     return new_angle_airbrake, simuz

```

## Chapitre 5

# Documents annexes

Dans le document "Dossier de conception" sur SCAE existe 5 documents. Il y a le document ci-présent ainsi que 4 annexes, demandées par le cahier des charges. Les voici :

- Un dossier "Composants Elec" avec les datasheet de tout les composants électroniques de la fusée
- Un dossier "Composants pneumatiques" avec les fichiers de tout les composants pneumatiques présents dans le contrôle de roulis
- Un document "Chronologie de lancement Polaris", conformément au cahier des charges. Il est enrichi de l'expérience du CACS, mais adapté à Polaris
- Nous avons aussi mis le StabTraj actuel, avec toutes les masses des composants et bagues de la CAO finale modélisée sur SolidWorks, nous donnant ainsi le centre de masse théorique et la masse totale théorique de la fusée.

## Chapitre 6

# Conclusion

Pour conclure, le projet, bien que très ambitieux, a été mené à un rythme appréciable. La conception du projet dans sa version 2 est terminée : la fusée est intégrée. Il nous reste évidemment de petits ajustement, niveau asservissement et optimalité mécanique et électronique, mais largement réalisables d'ici le lancement. Le planning est respecté, l'équipe motivée, et le projet Polaris se révèle tout aussi passionnant que prévu. Place maintenant à la fabrication totale de la fusée !

