



---

# SCALAR-6

## RAPPORT FINAL DE PROJET

Version 1.1

31 août 2025

---



Rédigé par Florian Topeza, Thomas Binet, Titouan Payer, Maxence Goubaud, Damien Bessède, Medhi Farès, Julien Monteiro, Ludovic Bastien et Chloé Mopin.R



## Remerciement

Nous remercions très chaleureusement Hyprspace, la fondation ISAE-SUPAERO ainsi que l'association des élèves de l'école qui soutiennent le projet. Il en va de même pour notre école, l'ISAE-SUPAERO, qui nous fournit un local pour la réalisation de nos projets. Nous remercions également Planète Sciences Occitanie, ainsi que les départements DEOS (Département Electronique, Optronique et Signal) et DMSM (Département Mécanique des Structures et Matériaux) de notre école, qui nous ont aidés à réaliser cette fusée expérimentale. Enfin nous remercions l'ensemble des bénévoles du CNES et de Planète Sciences qui nous permettent le lancement de fusex au C'Space.

Fondation  
ISAE - SUPAERO

**HYPR**  
**SPACE**

Planète  
Sciences  
une aventure pour les jeunes

ASSOCIATION  
des  
ÉLÈVES  
**A**  **E**  
ISAE-SUPAERO

ISAE   
Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace  
**SUPAERO**



## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Stabilité, trajectoire et récupération de SCALAR-6</b>	<b>11</b>
2.1	Stabilité de l'ensemble . . . . .	11
2.2	Stabilité du 2nd étage . . . . .	11
2.3	Stabilité du 1er étage . . . . .	13
2.4	Dimensionnement du parachute . . . . .	13
2.5	Calcul de la tension de la corde du parachute . . . . .	13
2.5.1	Détermination de $K$ . . . . .	13
2.5.2	Détermination de $V_0$ . . . . .	14
2.5.3	Masses $M_1$ et $M_2$ . . . . .	14
2.6	Scénarios de vol . . . . .	15
2.7	Portées balistiques . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Structure</b>	<b>17</b>
3.1	Contexte structure . . . . .	17
3.2	Récapitulatif du cahier des charges . . . . .	18
3.3	Architecture générale . . . . .	18
3.4	Pièces structurales . . . . .	19
3.5	Composite . . . . .	20
3.5.1	Peaux en fibre de carbone . . . . .	20
3.5.2	Ailerons en fibre de carbone . . . . .	22
3.5.3	Coiffe en fibre de verre . . . . .	23
3.6	Aluminium . . . . .	24
3.6.1	Bagues moteurs . . . . .	24
3.6.2	Bagues de jonction . . . . .	26
3.6.3	Equerres pour les ailerons . . . . .	27
3.6.4	Patins . . . . .	27
3.7	Sous-systèmes internes . . . . .	28
3.7.1	Système de Séparation Inter Etage (SSIE) . . . . .	28
3.7.2	Systèmes d'éjection des parachutes . . . . .	31
3.7.3	Système d'éjection du CanSat . . . . .	32
3.7.4	Cages électroniques . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Systèmes électroniques embarqués</b>	<b>35</b>
4.1	Présentation générale de l'architecture avionique de la fusée . . . . .	35



4.2	Product Breakdown Structures . . . . .	35
4.2.1	Product Breakdown Structure de l'étage supérieur . . . . .	36
4.2.2	Product Breakdown Structure de l'étage inférieur . . . . .	36
4.3	Synoptiques . . . . .	36
4.3.1	Synoptique de l'étage supérieur . . . . .	37
4.3.2	Synoptique de l'étage inférieur . . . . .	38
4.4	Cahier des charges . . . . .	38
4.5	Dimensionnement des batteries . . . . .	40
4.5.1	Séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	40
4.5.2	Expérience de l'étage supérieur . . . . .	40
4.5.3	Séquenceur de l'étage inférieur . . . . .	40
4.5.4	Expérience de l'étage inférieur . . . . .	41
4.6	Architecture des cartes électroniques . . . . .	41
4.6.1	Séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	41
4.6.2	Carte expérience de l'étage supérieur . . . . .	51
4.6.3	Carte de puissance de l'étage supérieur . . . . .	58
4.6.4	IHM de l'étage supérieur . . . . .	61
4.6.5	Carte d'allumage de l'étage supérieur . . . . .	64
4.6.6	Carte séquenceur et expérience de l'étage inférieur . . . . .	76
4.6.7	IHM de l'étage inférieur . . . . .	82
4.6.8	Cartes batteries . . . . .	83
4.6.9	Interfaces des cartes de l'étage supérieur . . . . .	84
4.6.10	Interfaces des cartes de l'étage inférieur . . . . .	85
4.7	Erreurs de conception sur les cartes électroniques . . . . .	86
4.7.1	Séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	86
4.7.2	Carte expérience de l'étage supérieur . . . . .	86
4.7.3	Carte de puissance de l'étage supérieur . . . . .	86
4.7.4	Carte séquenceur et expérience de l'étage inférieur . . . . .	86
<b>5</b>	<b>Logiciel de vol</b>	<b>87</b>
5.1	Présentation générale du logiciel de vol . . . . .	87
5.2	Paramètres de trajectoire pour le logiciel de vol . . . . .	87
5.2.1	Fenêtres temporelles . . . . .	87
5.2.2	Accélérations de la fusée . . . . .	88
5.2.3	Fenêtre d'attitude à l'allumage du moteur de l'étage supérieur . . . . .	88
5.3	Signaux visuels et sonores commandés par le logiciel de vol . . . . .	89
5.3.1	Signalétique du séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	90
5.3.2	Signalétique de l'expérience de l'étage supérieur . . . . .	91



5.3.3	Signalétique du séquenceur de l'étage inférieur . . . . .	91
5.3.4	Signalétique de l'expérience de l'étage inférieur . . . . .	92
5.4	Chronologies abstraites . . . . .	92
5.4.1	Chronologie abstraite du séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	93
5.5	Chronologie abstraite de l'expérience de l'étage supérieur . . . . .	94
5.6	Chronologie abstraite du séquenceur de l'étage inférieur . . . . .	95
5.7	Chronologie abstraite de l'expérience de l'étage inférieur . . . . .	96
5.8	Flux de données des séquenceurs au cours du vol . . . . .	96
5.8.1	Flux de données pour le séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	97
5.8.2	Flux de données pour le séquenceur de l'étage inférieur . . . . .	98
5.9	Signatures et définitions des fonctions utilisées dans le code . . . . .	98
5.9.1	Signatures des fonctions de l'étage inférieur . . . . .	98
5.9.2	Signatures des fonctions de l'étage supérieur . . . . .	99
5.10	Chronologies fonctionnelles des séquenceurs . . . . .	100
5.10.1	Chronologie fonctionnelle du code séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	101
5.10.2	Chronologie fonctionnelle du code séquenceur de l'étage inférieur . . . . .	102
5.11	Calibration des capteurs . . . . .	102
5.11.1	Calibration de la carte de navigation de l'étage supérieur . . . . .	102
5.11.2	Calibration du module Pico 10DOF de l'étage inférieur . . . . .	102
5.12	Détermination de l'attitude de la fusée à partir des capteurs . . . . .	103
5.12.1	Normalisation du quaternion . . . . .	103
5.12.2	Définition du vecteur "avant" du corps . . . . .	103
5.12.3	Application de la rotation au vecteur . . . . .	103
5.12.4	Calcul de l'assiette (pitch) . . . . .	103
5.12.5	Calcul de l'azimut . . . . .	104
<b>6</b>	<b>Charge utile</b> . . . . .	<b>105</b>
6.1	Contexte . . . . .	105
6.2	Equipe . . . . .	106
6.3	Architecture Cansat . . . . .	106
6.3.1	Composants . . . . .	106
6.3.2	Structure externe . . . . .	106
6.4	Électronique . . . . .	107
6.4.1	Tests sur platine de prototypage . . . . .	109
6.4.2	Subtilités ( <i>Hacks</i> ) . . . . .	110
6.5	Logiciel . . . . .	110
6.6	Télémetrie . . . . .	112
6.7	CAO Cansat . . . . .	112



6.7.1	Pièce inférieure . . . . .	112
6.7.2	Pièces de fixation . . . . .	112
6.7.3	Pièce supérieure . . . . .	113
6.8	Parachute . . . . .	114
6.8.1	Intérêt . . . . .	114
6.8.2	Conception . . . . .	115
6.9	Organisation . . . . .	115
6.9.1	1ère séance : 9 Janvier 2025 . . . . .	116
6.9.2	Entre les 2 séances . . . . .	117
6.9.3	2ième séance : 13 Mars 2025 . . . . .	117
6.9.4	Après la 2ième séance . . . . .	117
6.10	Structure assemblée . . . . .	117
6.11	Test Cansat . . . . .	119
6.11.1	Test du comportement du Cansat et mesure du coefficient de traînée Cd . . . . .	119
6.11.2	Test de la résistance du Cansat . . . . .	122
6.11.3	Test de l'autonomie réelle de la batterie . . . . .	123
6.11.4	Test de la détection de chute du Cansat . . . . .	123
<b>7</b>	<b>Compte rendu de vol</b> . . . . .	<b>124</b>
7.1	Campagne de lancement . . . . .	124
7.2	Déroulé du vol . . . . .	124
7.3	Analyse des données . . . . .	125
7.3.1	Étage du bas . . . . .	125
7.3.2	Étage du haut . . . . .	127

## Table des figures

1	StabTraj de l'ensemble complet . . . . .	11
2	StabTraj 2nd étage . . . . .	12
3	StabTraj 2nd étage sans contrepoids . . . . .	12
4	tension de corde parachute . . . . .	14
5	Exigences essentielles portant sur la structure de la fusée . . . . .	18
6	Vue 3D . . . . .	19
7	Fabrication des peaux . . . . .	20
8	Calculs de flèche . . . . .	21
9	Mise en forme des peaux . . . . .	21
10	Fabrication des ailerons . . . . .	22
11	Fabrication de la coiffe . . . . .	23



12	Dimensionnement de la bague Pro-54 . . . . .	25
13	Dimensionnement de la bague Pro-75 . . . . .	25
14	Bagues moteurs usinées . . . . .	26
15	Bagues de jonction . . . . .	27
16	Equerres pour ailerons . . . . .	27
17	Analyse éléments finis des patins . . . . .	28
18	CAO du SSIE 1 . . . . .	29
19	CAO du SSIE 2 . . . . .	29
20	Usinage su SSIE . . . . .	30
21	SSIE assemblé . . . . .	31
22	Compartiment parachute . . . . .	31
23	Compartiment CanSat . . . . .	32
24	Cage électronique 1er étage . . . . .	33
25	Cage électronique coiffe . . . . .	33
26	Cage électronique 1er étage . . . . .	34
27	Schéma fonctionnel . . . . .	35
28	PBS des systèmes embarqués de l'étage supérieur . . . . .	36
29	PBS des systèmes embarqués de l'étage inférieur . . . . .	36
30	Synoptique de l'étage supérieur . . . . .	37
31	Synoptique de l'étage inférieur . . . . .	38
32	Séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	41
33	Schématique du séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	43
34	Schématique des capteurs de pression du séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	47
35	Schématique des IMU du séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	48
36	Schématique des triggers de Schmitt du séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	49
37	Schématique des connecteurs du séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	50
38	Carte expérience de l'étage supérieur . . . . .	51
39	Schématique du microcontrôleur de la carte expérience de l'étage supérieur . . . . .	53
40	Schématique du module LoRa . . . . .	56
41	Schématique du module GNSS . . . . .	57
42	Schématique des connecteurs de la carte expérience de l'étage supérieur . . . . .	57
43	Carte de puissance de l'étage supérieur . . . . .	59
44	Schématique de la partie séquenceur de la carte de puissance de l'étage supérieur . . . . .	60
45	Schématique de la partie expérience de la carte de puissance de l'étage supérieur . . . . .	60
46	IHM de l'étage supérieur . . . . .	61
47	Schématique des LED séquenceur de l'IHM de l'étage supérieur . . . . .	62
48	Schématique des LED expérience de l'IHM de l'étage supérieur . . . . .	62
49	Schématique de l'interrupteur séquenceur de l'IHM de l'étage supérieur . . . . .	63



50	Schématique des boutons de l'IHM de l'étage supérieur . . . . .	63
51	Schématique du Jack de la partie séquenceur de l'IHM de l'étage supérieur . . . . .	64
52	Carte d'allumage . . . . .	65
53	Barrières de sécurité de la carte d'allumage . . . . .	65
54	Schématique du connecteur de l'alimentation et de la clé de la carte d'allumage . . . . .	67
55	Schématique de la breakout de l'interrupteur à clé . . . . .	67
56	Schématique de la breakout du Jack shunt de la carte d'allumage . . . . .	68
57	Schématique du connecteur du Jack shunt de la carte d'allumage . . . . .	68
58	Schématique de la partie commande de la carte d'allumage . . . . .	69
59	Schématique des transistors de la carte d'allumage . . . . .	70
60	Courant maximal à travers le transistor P-MOS en fonction de -VGS . . . . .	71
61	Schéma équivalent optocoupleur passant . . . . .	72
62	Schématique du buzzer de la carte d'allumage . . . . .	72
63	Schéma simplifié du circuit simulé sous LTspice . . . . .	74
64	Tension simulant la sortie de la porte logique de la partie commande . . . . .	75
65	Réponse en tension aux bornes de l'inflamateur . . . . .	75
66	Carte séquenceur et expérience de l'étage inférieur . . . . .	76
67	Schématique du séquenceur de l'étage inférieur . . . . .	78
68	Schéma de branchement du DRV8874 . . . . .	81
69	IHM de l'étage inférieur . . . . .	82
70	Carte batterie . . . . .	83
71	Schématique d'une carte batterie 2S . . . . .	84
72	Interfaces des cartes de l'étage supérieur . . . . .	85
73	Interfaces des cartes de l'étage inférieur . . . . .	85
74	Fenêtre d'attitude pour l'allumage du moteur de l'étage supérieur . . . . .	89
75	Chronologie abstraite du séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	93
76	Chronologie abstraite de l'expérience de l'étage supérieur . . . . .	94
77	Chronologie abstraite du séquenceur de l'étage inférieur . . . . .	95
78	Chronologie abstraite de l'expérience de l'étage inférieur . . . . .	96
79	Flux de données pour le séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	97
80	Flux de données pour le séquenceur de l'étage inférieur . . . . .	98
81	Chronologie fonctionnelle du code séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	101
82	Chronologie fonctionnelle du code séquenceur de l'étage inférieur . . . . .	102
83	Modèle 3D sur Bambu Studio, Impression dans une Bambu Lab, Résultat d'impression . . . . .	107
84	Schéma de l'électronique à bord du cansat . . . . .	107
85	Synoptique de l'électronique à bord du cansat . . . . .	107
86	Tests électroniques . . . . .	108



87	Vue avant et arrière de la carte. . . . .	108
88	Module BMP280 . . . . .	109
89	ESP32CAM . . . . .	109
90	Module S7V8A . . . . .	109
91	XL6009 . . . . .	109
92	Module LoRaWAN . . . . .	109
93	Montage final sur platine . . . . .	110
94	Différentes faces de la partie inférieure du Cansat . . . . .	112
95	Pièces de fixation . . . . .	113
96	Différentes faces de la partie inférieure du Cansat . . . . .	113
97	Voici 2 vues explosés de la structure du Cansat, ainsi qu'une vue isométrique assemblé . . . . .	114
98	Systèmes relatifs au parachute . . . . .	114
99	Conception du parachute en croix à l'Innovspace . . . . .	115
100	A gauche : Activité Parachute, A droite : Activité Code . . . . .	116
101	Fiches guides pour l'activité parachute et code . . . . .	116
102	Composants soudés sur la PCB . . . . .	118
103	Assemblage de tous les composants sur la PCB . . . . .	118
104	Cansat assemblé . . . . .	119
105	Evolution de l'altitude et de la vitesse du cansat en fonction du temps, pour $C_d$ $= 0.9$ . . . . .	122
106	Test de résistance <u>avec</u> parachute . . . . .	123
107	Test de résistance <u>sans</u> parachute . . . . .	123
108	État structurel des cansats testés avec/sans parachute . . . . .	123
109	SSIE en vol . . . . .	125
110	Pression au cours du vol . . . . .	126
111	Altitude au cours du vol . . . . .	126
112	Prévision du StabTraj . . . . .	126
113	Accélération au cours du vol . . . . .	127

## Liste des tableaux

1	Synthèse des calculs de stabilité . . . . .	13
2	Données issues de la simulation OpenRocket . . . . .	14
3	Masses des éléments principaux de la fusée . . . . .	14
4	Scénarios de vol . . . . .	15
5	Valeurs entrées dans StabTraj à l'allumage du second moteur . . . . .	15
6	Portées balistiques . . . . .	16



7	Description des broches 1 à 20 du séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	45
8	Description des broches 21 à 40 du séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	46
9	Description des broches 1 à 20 du microcontrôleur de la carte expérience de l'étage supérieur . . . . .	54
10	Description des broches 21 à 40 du microcontrôleur de la carte expérience de l'étage supérieur . . . . .	55
11	Caratéristiques de la batterie Keppower 2S1P 900mAh 7.2V - 7.4V . . . . .	66
12	Stack-up et paramètres diélectriques du PCB de la carte d'allumage . . . . .	73
13	Description des broches du séquenceur de l'étage inférieur . . . . .	81
14	Données temporelles de stabilité de SCALAR 6 . . . . .	87
15	Données d'accélérations de SCALAR 6 . . . . .	88
16	Données d'attitude nominale de l'étage supérieur de SCALAR-6 à la mise à feu de son moteur . . . . .	89
17	Signalétique du séquenceur de l'étage supérieur . . . . .	90
18	Signalétique de l'expérience de l'étage supérieur . . . . .	91
19	Signalétique du séquenceur de l'étage inférieur . . . . .	92
20	Signalétique de l'expérience de l'étage supérieur . . . . .	92



# 1 Introduction

La fusée expérimentale **SCALAR-6** est réalisée au sein de la Supaéro Space Section, le club fusée de l'ISAE-SUPAERO sur l'année scolaire 2024-2025. Comme son nom l'indique, **Supaero CAnsats LAuncheR** vise à déployer un CanSat en vol. SCALAR-6 a été conçue, produite, testée et lancée par l'équipe suivante :

- Chef de projet : Ludovic Bastien
- Responsable électronique : Florian Topeza
- Responsable mécanique et fabrication : Thomas Binet
- Responsable trajectoire : Simon Mauduit-Groussard & Mathéo Broyard
- Responsable charge utile Cansat : Damien Bessède
- Membres du pôle mécanique : Tristan Baldit, Erwin Martin, Rémi Caresche, Shawn Quenel, Titouan Delhaye, Baptiste Guillot, Ivan Resche-Rigon, Alex Delcan, Axel Vasset, Antoine Masson, Paul Carcenac de Torné
- Membres du pôle électronique : Chloé Mopin-Rauschkolb, Bertrand Macé, Maxence Goubaud, Noam Ouaged, Titouan Payer
- Membres du pôle informatique : Thomas Duroy, Cyril Carlier
- Membres du pôle CanSat : Julien Monteiro & Mehdi Farès

L'objectif du projet SCALAR-6 est de réaliser un vol bi-étagé d'une fusée expérimentale et d'éjecter un CanSat indépendant à l'apogée. Les étages de la fusex et le CanSat disposent chacun de leur propre parachute, déployé en phase finale du vol. SCALAR-6 s'appuie sur le retour d'expérience des cinq précédentes versions de SCALAR, plus particulièrement SCALAR-V lancée au C'Space 2024.

D'un point de vue calendaire, la phase de conception préliminaire s'est achevée en 2024. L'ensemble des pièces a été fabriqué en 2025 et le lancement devrait avoir lieu lors du C'Space 2025. À noter qu'un planning prévisionnel avait été réalisé mais il n'a que peu été suivi, puisque nous avons souvent eu du retard sur les jalons anticipés. Ainsi, il a été actualisé plusieurs fois au cours de l'année pour cadrer au mieux le projet.

## 2 Stabilité, trajectoire et récupération de SCALAR-6

Le modèle de la fusée est élaboré continuellement sur le logiciel open source OpenRocket par souci de précision et de praticité. Le modèle est ensuite porté sur StabTraj pour valider les choix de conception selon les critères de Planète Sciences. SCALAR-6 reste la plus longue fusée 100% faite au Scube à ce jour, nous expliquerons dans cette section les différents choix de conception.

### 2.1 Stabilité de l'ensemble

Le 1er étage et le 2nd étage ont respectivement 3 et 4 ailerons. Ce choix a été adopté car 2x4 ailerons dégradent fortement les performances aérodynamiques du 1er étage s'ils sont alignés. Cependant, la rampe de lancement ne permet de monter seulement qu'un quadruplet et/ou un triplet d'ailerons donc la configuration 3 et 4 est de toute manière imposée. Dans la section suivante on explique le choix de l'envergure des ailerons ; pour cet étage, puisque la stabilité le permettait et qu'il est plus pratique de fabriquer les ailerons aux mêmes dimensions, il a été choisi d'utiliser ces ailerons pour les deux étages. Un contrepois de 1,7kg (deux altères de 1kg et 500g respectivement) est à installer à la base de l'ogive afin d'élever le centre de masse et d'obtenir une marge statique suffisante. À ce jour, le StabTraj pour un vol nominal bi-étagé passif est le suivant :

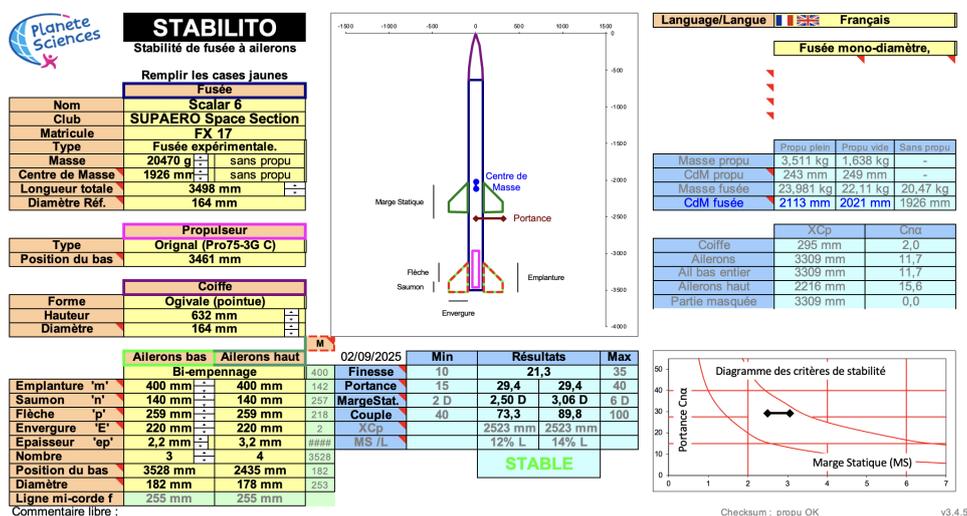


FIGURE 1 – StabTraj de l'ensemble complet

### 2.2 Stabilité du 2nd étage

Les premières esquisses de SCALAR 6 définissaient une fusée à l'origine bien plus courte et légère. Le besoin d'élever le centre de masse (cf. stabilité de l'ensemble) mena, après discussion avec le pôle mécanique, à l'idée de pouvoir allonger le 2nd étage. Ainsi, cela permit d'alléger



le contrepoids contenu dans la base de l'ogive sans pour autant ajouter trop de couple autour du SSIE. L'étage a besoin d'un maximum de portance pour être assez stable selon le StabTraj, c'est pourquoi l'envergure des ailerons a été choisie pour frôler la limite de l'exigence du cahier des charges (600mm d'envergure de la fusée). À ce jour (05/06/2025), le StabTraj estimé lors d'un vol bi-étagé actif nominal est le suivant :

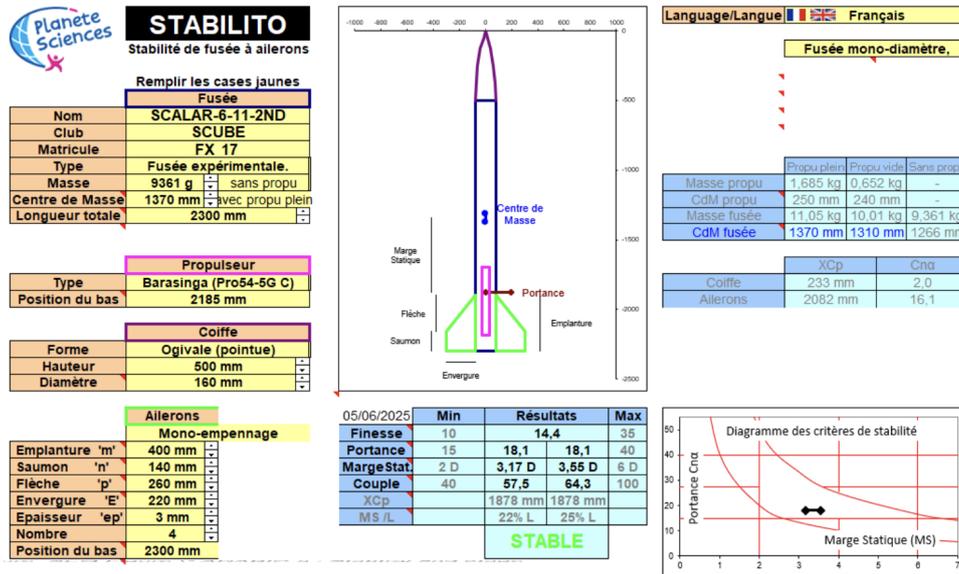


FIGURE 2 – StabTraj 2nd étage

On remarquera que dans le cas où le lancement bi-étagé n'est pas possible, il est toujours possible de lancer cet étage seul. Dans cette situation, il est intéressant d'enlever le contrepoids de 1,7kg pour des raisons évidentes de masse. Le StabTraj devient :

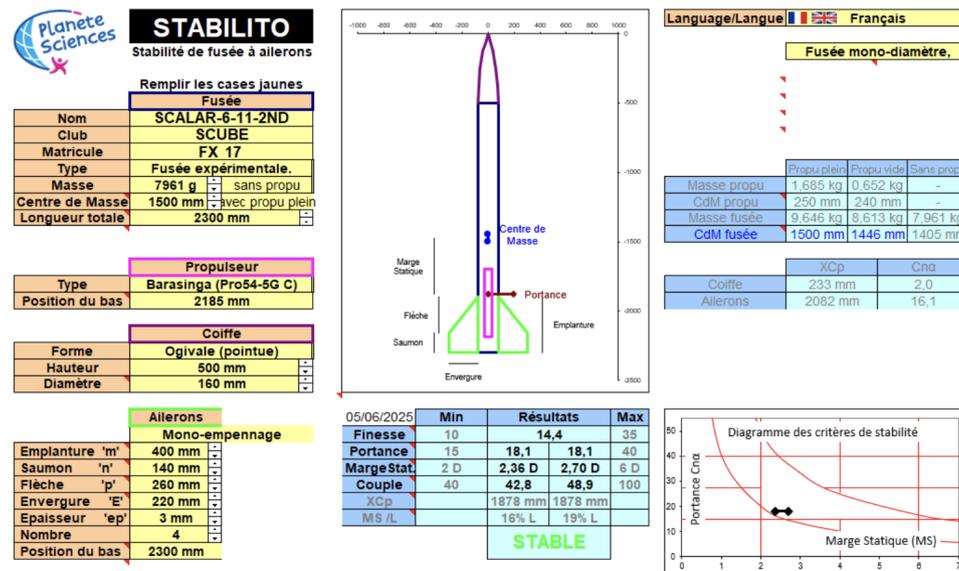


FIGURE 3 – StabTraj 2nd étage sans contrepoids



## 2.3 Stabilité du 1er étage

La stabilité de cet étage seul n'est pas pertinente. En effet, non seulement la phase de vol balistique est négligeable (entre la séparation et l'ouverture de son parachute), mais StabTraj ne permet pas de modéliser ces types d'engins qui n'ont pas d'ogive.

## 2.4 Dimensionnement du parachute

Pour chaque étage, on considère les masses en fin de combustion des moteurs. Pour l'ensemble, le second étage a toujours un moteur (un vrai ou un simulateur de masse) donc on ne considère le poids vide que du moteur du 1er étage. Les calculs des vitesses de descente limites ont été réalisés avec la formule suivante :  $V_L = \sqrt{\frac{2Mg}{\rho S_{para} C_x}}$

Le coefficient de traînée  $C_x$  est choisi égal à 1 comme conseillé dans la documentation fournie par Planète-Sciences et puisque la vitesse critique est celle au sol, on considère une masse volumique de l'air  $\rho = 1,14 \text{ kg/m}^3$ . Voilà finalement la synthèse des calculs :

	Étage 1	Étage 2	Ensemble
Poids de la fusée à l'ouverture $M$ (kg)	8,138	9,779	18,95
Surface du parachute $S_{para}$ (m <sup>2</sup> )	1,65	3,33	3,33
Vitesse de descente limite $V_L$ (m/s)	9,2	7,1	9,9

TABLE 1 – Synthèse des calculs de stabilité

On vérifie bien que ces vitesses soient bien comprises entre 5 et 15 m/s. Il faut d'ailleurs noter que le parachute du 2nd étage sera utilisé pour supporter l'ensemble dans le cas où la séparation n'a pas lieu.

## 2.5 Calcul de la tension de la corde du parachute

La tension maximale d'une corde reliant deux corps  $M_1$  (parachute) et  $M_2$  (le corps de la fusée) contrainte à un effort instantané s'écrit :  $T_{max} = V_0 \sqrt{K \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2}}$ . Avec  $V_0$  la vitesse relative entre  $M_1$  et  $M_2$  et  $K$  la raideur de la corde.

### 2.5.1 Détermination de $K$

La raideur peut être déterminée expérimentalement mais ici les calculs seront réalisés sur une plage de raideur allant de 1000 à 9000 N/m.



### 2.5.2 Détermination de $V_0$

On considère que  $V_0$  est la vitesse de la fusée, c'est-à-dire le pire des cas où le parachute se déplace à la vitesse de l'écoulement. On utilise les données de la simulation OpenRocket selon différents scénarios sans vent et avec un angle de rampe de  $80^\circ$  :

Étage	Ensemble	Étage 1	Étage 2
Séparation	non	oui	oui
$V_0$ au déploiement du parachute (apogée)	27,54 m/s	18,21 m/s	26,22 m/s
	99,14 km/h	65,56 km/h	94,39 km/h

TABLE 2 – Données issues de la simulation OpenRocket

### 2.5.3 Masses $M_1$ et $M_2$

On considère la masse du parachute à 350 g. Celle de la fusée est déterminée par le modèle OpenRocket. Le CanSat est conservé pour simuler le pire des cas.

Étage	Ensemble	Étage 1	Étage 2
Séparation	non	oui	oui
Masse $M_2$	17 917 g	8138 g	9779 g

TABLE 3 – Masses des éléments principaux de la fusée

Bilan :

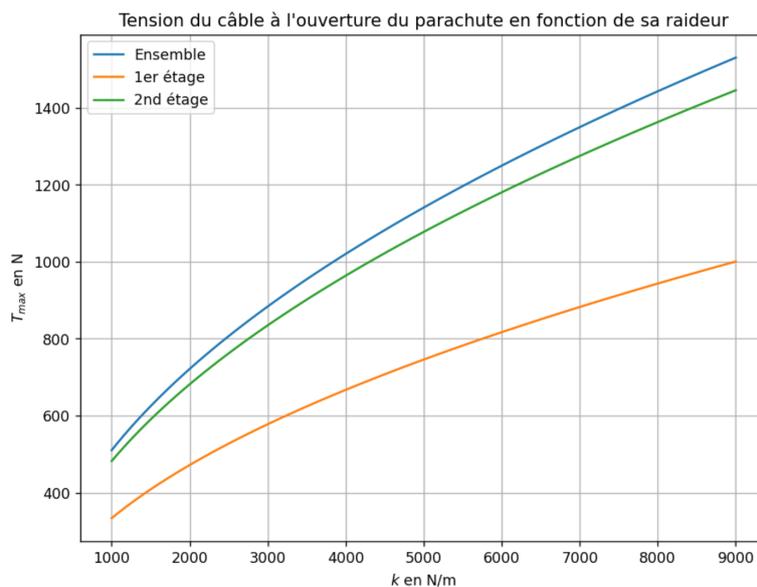


FIGURE 4 – tension de corde parachute

Le pôle mécanique et structure utilise ces données à bon escient.



## 2.6 Scénarios de vol

Les simulations suivantes sont faites sous OpenRocket par souci de praticité avec une élévation de la rampe à  $80^\circ$ . Voici un tableau récapitulatif des données de vol pertinentes pour différents scénarios envisagés :

Scénario	Vitesse de sortie de rampe (m/s)	Apogée (m)	Vitesse max (m/s)	Temps pour atteindre l'apogée (s)	Accélération max ( $\text{m/s}^2$ )
Vol nominal	23.8	2245	219	23.6	64.9
Vol passif	23.8	987	133	15.5	40
Vol ensemble	23.8	1005	133	15.7	72.1
Vol mono-étagé	30.8	1088	149	15.2	72.1

TABLE 4 – Scénarios de vol

**Vol nominal** : vol bi-étagé actif (pro75 au 1er étage et pro54 au 2nd) avec séparation et allumage du 2nd moteur.

**Vol passif** : vol bi-étagé avec séparation où le pro54 n'est pas allumé ou est factice.

**Vol ensemble** : vol de la fusée entière sans séparation avec un pro54 embarqué au second étage (réel ou factice).

**Vol mono-étagé** : seul le second étage est lancé avec un pro54.

## 2.7 Portées balistiques

Pour les portées balistiques du 2nd étage, on pense bien à mettre à jour l'élévation, la vitesse, la portée x et l'altitude au décollage à l'aide des simulations OpenRocket. Notons les valeurs entrées dans les StabTraj pour le 2nd étage à l'allumage du 2nd moteur :

Elévation de la rampe	$80^\circ$	$45^\circ$
Elévation du 2 <sup>nd</sup> étage	$71^\circ$	$16^\circ$
Altitude	590 m	305 m
Portée x	108 m	600 m
Vitesse	100 m/s	124 m/s

TABLE 5 – Valeurs entrées dans StabTraj à l'allumage du second moteur

Voici le bilan des portées balistiques résumées dans le tableau suivant. On note qu'on ne prend pas en compte les portées balistiques du lancement mono-étagé (i.e. 2<sup>nd</sup> étage seul) et



passif puisqu'elles seront toujours plus courtes que celles du lancement bi-étage actif.

Étage	Ensemble	Étage 1	Étage 2
Séparation	Échec	Succès	Succès
Moteur étage 1	Actif	Actif	Actif
Moteur étage 2	Passif	Passif	Actif
Rampe à 80°	797 m (StabTraj)	426 m (OpenRocket)	1401 m (StabTraj)
Rampe à 45°	1704 m (StabTraj)	1115 m (OpenRocket)	2667 m (StabTraj)

TABLE 6 – Portées balistiques

Comme mentionné dans la partie stabilité du 1er étage, StabTraj ne permet pas de calculer sa trajectoire, donc ce dernier est fait à l'aide d'OpenRocket.



## 3 Structure

### 3.1 Contexte structure

Ce dossier présente le travail de conception, les tests et la fabrication le cas échéant des éléments mécaniques de SCALAR-6. Après un aperçu global de l'architecture de la fusée et un rappel des exigences auxquelles elle doit répondre, les pièces structurales puis les différents systèmes mécaniques internes sont passés en revue. Ce document n'a pas vocation à expliciter le moindre détail mais plutôt à justifier l'ensemble de choix ayant été réalisés. Un dossier plus exhaustif s'inscrivant dans le cadre de la passation de connaissances au sein du club sera réalisé après le C'Space 2025, et intégrera un retour d'expérience sur les différents systèmes.

SCALAR-6 s'inscrit directement dans la continuité de SCALAR-V (V pour 5), lancée avec succès au C'Space 2024. En effet, le but du projet SCALAR est depuis plusieurs années la réalisation d'une fusée bi-étagée, et le lancement d'une mono-étagée une étape nécessaire pour acquérir l'expérience nécessaire à cet objectif. Si initialement SCALAR-V était vu comme un deuxième étage en devenir, il a finalement été décidé de repartir d'une page blanche. En effet, le système parachute n'avait pas apporté la satisfaction escomptée, l'électronique embarquée devait être entièrement remaniée pour ce nouveau contexte. Reprendre une structure vierge était également plus avantageux pour la rigidité – en épaississant la peau porteuse – et pour assurer la stabilité. Après avoir hésité à implémenter des changements de philosophie de conception au niveau de la structure (passage à un treillis porteur par exemple), il a finalement été décidé de reprendre les composants le plus à l'identique possible pour concentrer nos efforts sur la séparation des deux étages et maximiser nos chances d'être prêts pour le C'Space 2025.

Présentation des membres et leurs travaux :

- Tristan BALDIT – SSIE 1 et éjection des parachutes
- Erwin MARTIN – SSIE 2
- Rémi CARESCHE – en soutien pour les SSIE 1 & 2
- Alex DELCAN – en soutien pour le SSIE 1
- Paul CARCENAC DE TORNE – Cages électroniques
- Titouan DELHAYE – Ejection CanSat
- Baptiste GUILLOT – Ejection CanSat
- Shawn QUENEL – Ejection Cansat
- Antoine MASSON – Banc de flèche
- Ludovic BASTIEN – Chef de projet global & soutien général
- Thomas BINET – Responsable mécanique, assemblage et fabrication



### 3.2 Récapitulatif du cahier des charges

Les exigences critiques - les autres étant des évidences qui ne seront pas rappelées pour ne pas surcharger ce rapport - issues du cahier des charges de Planète Science sont récapitulées ici :

MEC1	Flèche	Les flèches de l'étage 2 et de l'ensemble sont inférieures ou égales à 1% des longueurs correspondantes
MEC2	Compression	Les peaux porteuses doivent supporter une compression équivalente à $2 * \gamma_{max} * M_{sup}$ Les bagues de reprise de poussée doivent résister à $2 * Poussée_{max}$
MEC3	Résistance longitudinale	Les ailerons doivent supporter une force longitudinale de $2 * M_{aileron} * \gamma_{max} + 0.02 * S_{aileron} * V_{max}^2 * C_x$
MEC4	Résistance transversale	Les ailerons doivent avoir une flèche transversale inférieure à 10° lorsque soumis à une force transversale de $0.1 * S_{aileron} * V_{max}^2$
MEC5	Alignement	L'alignement des ailerons par rapport à l'axe longitudinal de la fusée est inférieur à 1°
REC1	Ejection franche	Chaque étage doit être équipé d'un système ralentisseur fiable leurs éjections doivent être franches
REC5	Tenue récupération	Les cases contenant le parachute doivent supporter une compression équivalente à $2 * \gamma_{max} * M_{sup}$
CR2	Accessibilité	Les zones devant être accessibles sont à plus de 20° du rail
CR5	Cordons	L'angle des cordons arrachables est entre 5 et 30°
CR8	Résistance patin	Les patins de guidage doivent supporter une force de $Poussée_{max} * \sin 2^\circ + 0.5 * \rho_0 * 1 * (S_{corps} + S_{ailerons}) * 10^2$

FIGURE 5 – Exigences essentielles portant sur la structure de la fusée

### 3.3 Architecture générale

SCALAR-6 est donc une fusée bi-étagée, prévue avec un moteur Pro-75 pour le premier étage et un Pro-54 pour le second. Les deux étages ont un diamètre interne de 160 mm, puisque cela correspond au matériel de fabrication en notre possession. Cela est certes un désavantage sur les questions aérodynamiques, mais ce n'est pas gênant dans un contexte d'apogée limitée comme au C'Space. De plus, le volume interne disponible donne une marge de manœuvre appréciable dans la conception des systèmes embarqués. Chaque étage est relativement similaire dans sa composition, et l'on y retrouve dans chacun :

- Un jeu de trois bagues en aluminium, servant au guidage du moteur, à la reprise de la poussée et à la fixation à la fois des ailerons et des patins de guidage
- Un compartiment à trappe latérale pour le parachute et son éjection
- Au moins un compartiment dédié à l'électronique embarquée

Le premier étage, n'ayant pas besoin d'être stable par lui-même, peut se permettre d'être plus trapu (106 cm) et de n'être constitué que d'une unique peau porteuse. Le second doit l'être cependant, et il fut choisi de l'allonger (180 cm au total, sans la coiffe) pour limiter le contreponds nécessaire. On y retrouve donc en plus une bague de jonction entre les deux peaux en carbone ainsi que le système d'éjection d'expérience dans le cas d'un lancement du 2nd étage seul.

L'électronique de bord est séparée en deux compartiments : le premier, au plus proche du Pro-54, dédié à l'allumage en vol du moteur et l'Interface Homme Machine et le second, dans la coiffe, assurant le reste des tâches.

Nous avons choisi de refaire une structure en peau porteuse, c'est-à-dire que les peaux extérieures elles-mêmes reprennent les efforts (à l'inverse de la solution avec un treillis interne). Chaque pièce ou sous-ensemble est ainsi directement vissé à la peau, sauf mention contraire, avec des vis M5.

### 3.4 Pièces structurales

Dans le cadre d'une fusée bi-étagée, et l'historique important d'échecs liés à un non-respect de l'exigence MEC1, la rigidité de l'ensemble est absolument essentielle. De plus, afin de lancer une fusex bi-étagée active au C'Space, il est obligatoire de lancer deux fois dans la même semaine, une robustesse suffisante pour lancer deux fois avec un minimum d'intervention est nécessaire.

Un élément important dans nos prises de décisions est l'excellente relation que nous avons avec l'atelier de l'ISAE-SUPAERO : nous y effectuons nos fabrications et faisons donc nos choix en fonction des capacités présentes sur place. Notamment, nous avons la capacité de réaliser nous-mêmes un certain nombre de pièces en composites tandis que nous sommes dépendants des disponibilités des techniciens quant à l'usinage métallique (tournage, fraisage et électroérosion).

Toutes nos pièces ont été dimensionnées le plus précisément possible compte tenu de nos moyens et de nos compétences. L'expérience acquise au cours des projets précédents du club, et en particulier sur SCALAR-V à laquelle ont contribué plusieurs membres de l'équipe, fut également précieuse dans cet objectif.

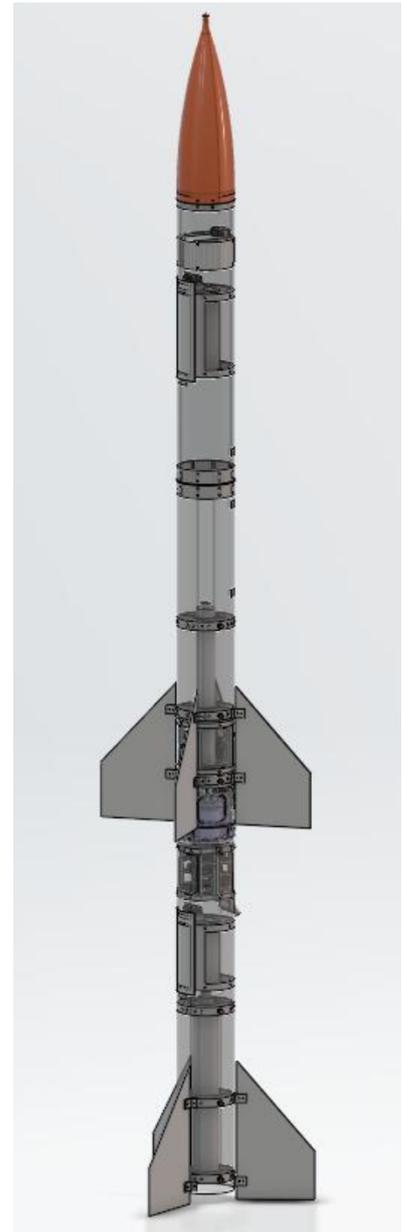


FIGURE 6 – Vue 3D

## 3.5 Composite

### 3.5.1 Peaux en fibre de carbone

Les pièces centrales de la structure de SCALAR-6 sont bien évidemment les peaux porteuses en fibre de carbone. Cette solution éprouvée sur SCALAR-V sur le plan mécanique – flèche notamment mesurée à 0 au C’Space 2024 – est également très pratique, ayant le matériel et l’expérience pour les réaliser nous-mêmes.

En effet, pour des questions de qualité du résultat final et de rapidité de fabrication, nous travaillons avec du tissu isotrope pré-imprégné que nous drapons ensuite sur un mandrin en aluminium. Cela nous permet de garantir l’état de surface et le diamètre de la face interne, et donc de faciliter l’assemblage final. Dans le cadre de la jonction entre les deux étages, cela dépasse la simple notion pratique et la maîtrise des jeux devient absolument essentielle. La fibre est ensuite compactée à l’aide d’un film thermo-rétractable et passe ensuite à la cuisson.



FIGURE 7 – Fabrication des peaux

La question essentielle est celle du choix de l’épaisseur. Le point de départ de la réflexion était les épaisseurs choisies sur SCALAR-V, à savoir des peaux de 3 et 4 plis, soit environ 0.8 et 1 mm respectivement. Si finalement cela a parfaitement répondu aux exigences, la première impression des contrôleurs en RCE2 fut une certaine inquiétude quant à la tenue mécanique, en particulier au niveau des perçages proches des bordures.

Pour SCALAR-6, dans un contexte d’efforts plus importants mais aussi de certification plus complexe, il nous paraissait évident d’augmenter les épaisseurs, la question étant de combien. Nous avons d’abord cherché à réaliser une sorte de prédimensionnement avec des hypothèses simples, à savoir avec un modèle poutre isotrope linéaire, sans prise en compte du SSIE. Nous avons réalisé les calculs avec un chargement de 19.2 kg, respectivement ponctuel à l’extrémité et uniformément réparti, et un module de Young de 110 GPa, qui correspond à un composite

à fibre haute performance que nous nous sommes procuré.

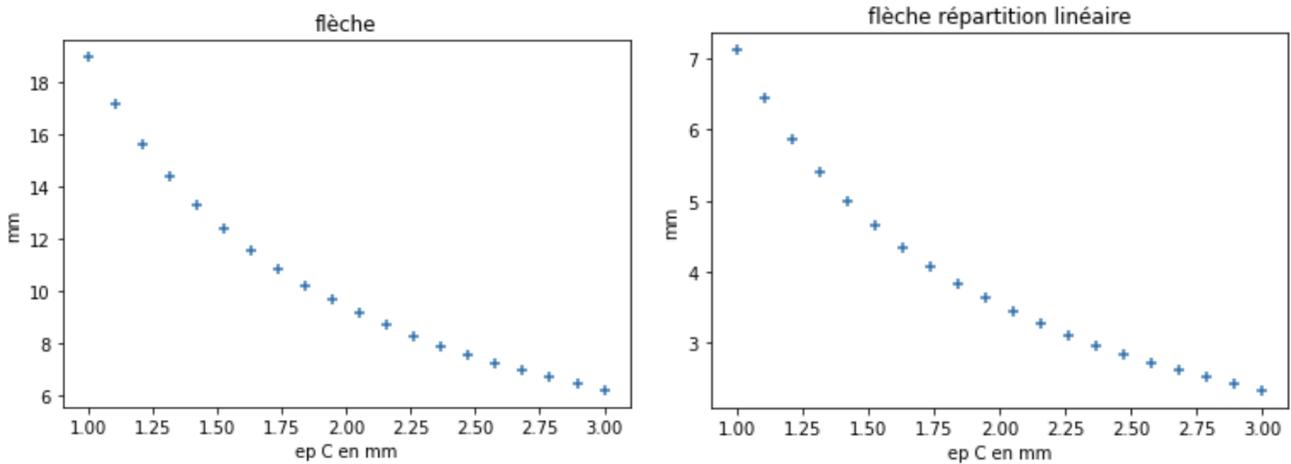


FIGURE 8 – Calculs de flèche

En prenant en compte les dimensions du tissu que nous avons acheté, afin d’éviter de devoir faire des raccords en cours de drapage, nous avons finalement choisi des peaux de 7 plis pour l’étage inférieur et le bas du supérieur, et de 5 plis pour le haut du supérieur, soit des épaisseurs d’environ 1.7 mm et 1.3 mm une fois démoulées respectivement. Ce choix nous a paru être le juste milieu entre rigidité accrue et considérations pratiques. De plus, pour pallier tout incident le mieux possible, nous avons deux peaux supplémentaires, une « épaisse » et une « fine ».

Une fois les peaux fabriquées, il faut les mettre en forme. Après une mesure précise des diamètres externes, nous avons ensuite imprimé des patrons papier pour assurer des découpes et perçages les plus précis possible.

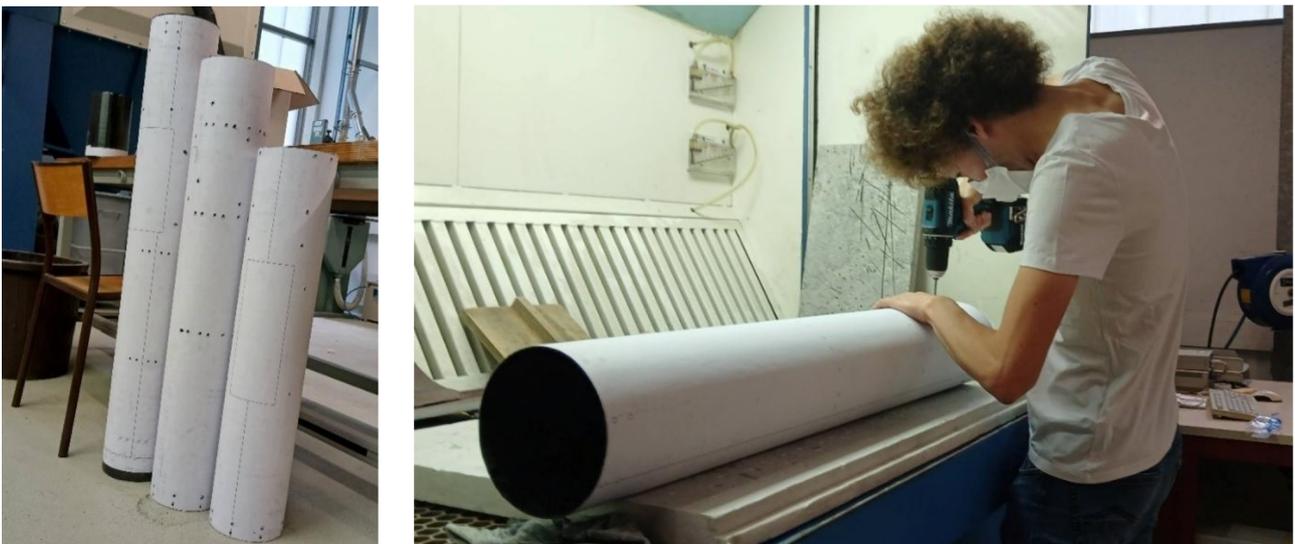


FIGURE 9 – Mise en forme des peaux

### 3.5.2 Ailerons en fibre de carbone

Les ailerons ne sont pas moins importants, puisqu'ils font à eux seuls la différence entre une très mauvaise idée et une fusée. Une fois leurs dimensions déterminées (cf. partie sur la stabilité), il a fallu choisir leur matériau et leur épaisseur pour répondre aux exigences MEC3 et surtout MEC4.

Le plan initial était de découper dans des plaques d'aluminium, qui peuvent se trouver facilement et à prix raisonnable. Il est cependant assez rapidement apparu que l'épaisseur nécessaire et par conséquent leur poids allait entraîner une augmentation déraisonnable du contreponds. Nous avons donc finalement choisi les CFRP à nouveau, ayant du stock utilisable à disposition.

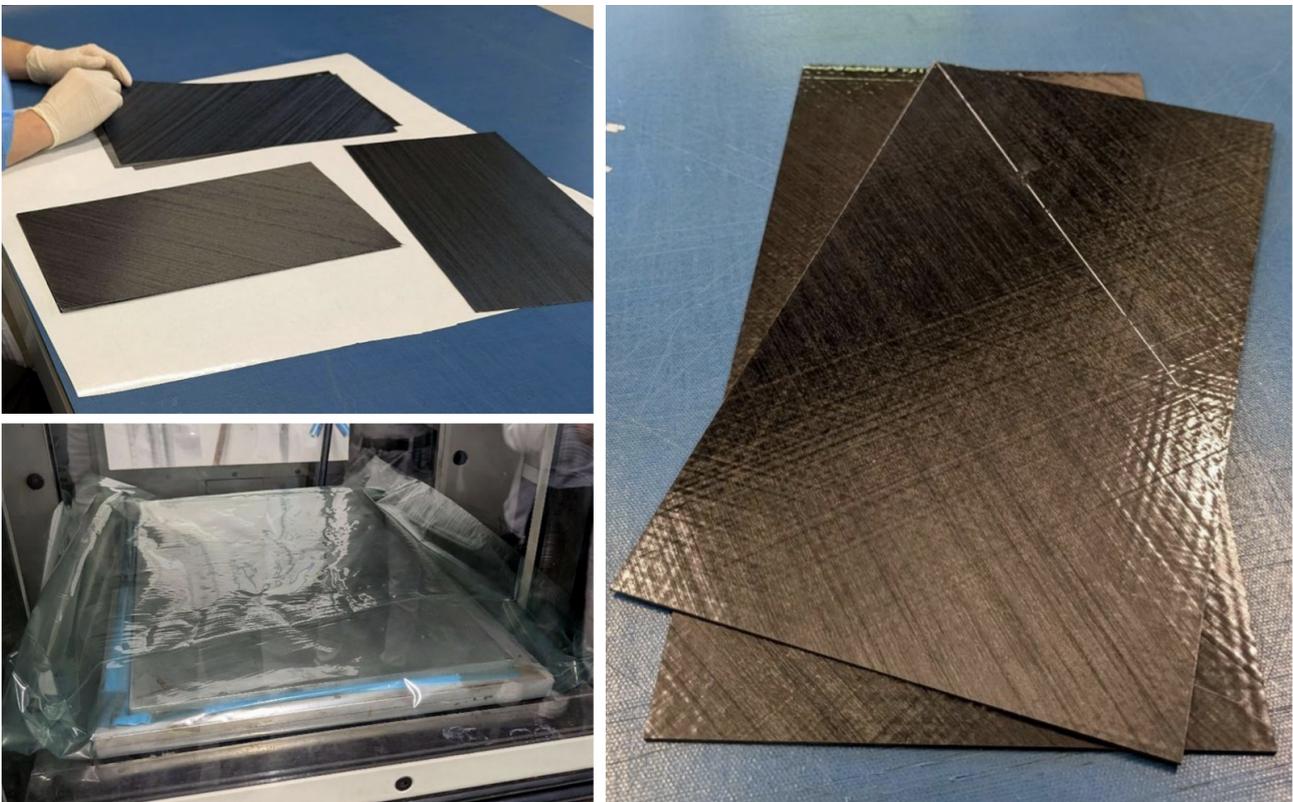


FIGURE 10 – Fabrication des ailerons

Avec ce choix du composite vient à nouveau la difficulté du dimensionnement précis, d'autant plus qu'une simplification de type poutre serait trop forcée ici. Cependant, il se trouve que pour les ailerons les plus sollicités, ceux de l'étage supérieur du fait d'une  $V_{max}$  plus importante, leurs dimensions et les efforts en jeu sont très proches de ceux rencontrés sur SCALAR-V. Le choix fut donc de reprendre la même épaisseur, soit 3 mm, cette dernière ayant largement répondu aux attentes. Pour les ailerons du premier étage, nettement moins sollicités, nous avons décidé de passer à 2 mm pour économiser la matière première. Par sécurité, nous avons un aileron de rechange pour chaque étage.

Nous avons travaillé à partir de tissu pré imprégné, mais cette fois unidirectionnel. Par conséquent, nous sommes nous-mêmes revenus à un résultat final isotrope en alternant les orientations ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ) en drapant. Un passage sous presse et à la scie à disque plus tard et nous avons nos ailerons.

### 3.5.3 Coiffe en fibre de verre

La coiffe a une place un peu particulière parmi toutes les pièces structurales puisque n'étant pas soumise à une exigence structurale particulière, si ce n'est ne pas se briser. Ainsi, dans la continuité des SCALAR précédentes nous avons réutilisé une nouvelle fois notre moule pour fabriquer une coiffe, avec une de rechange au cas où.

Pour différentes raisons, nous avons choisi la fibre de verre pour cette pièce. La première d'entre elles est d'être transparente aux ondes, l'électronique du second étage et donc l'émetteur/récepteur de la télémétrie se trouvant dans la coiffe. La deuxième, d'ordre plus pratique est tout simplement un meilleur rapport performance/prix. Enfin, la troisième est d'avoir la possibilité d'utiliser des signaux lumineux visibles sans avoir à retirer la coiffe ou percer quoi que ce soit, la fibre étant translucide.

Pour la fabrication, à la différence des peaux drapées sur un mandrin, le moule est cette fois un moule négatif. De plus, la fibre n'étant pas pré-imprégnée, nous avons donc appliqué la résine (époxy) nous-même. Une fois les deux demi-coiffes drapées, elles sont ensuite réunies, jointes par recouvrement de la fibre de l'une par l'autre puis la coiffe est envoyée au four pour fixer la résine.

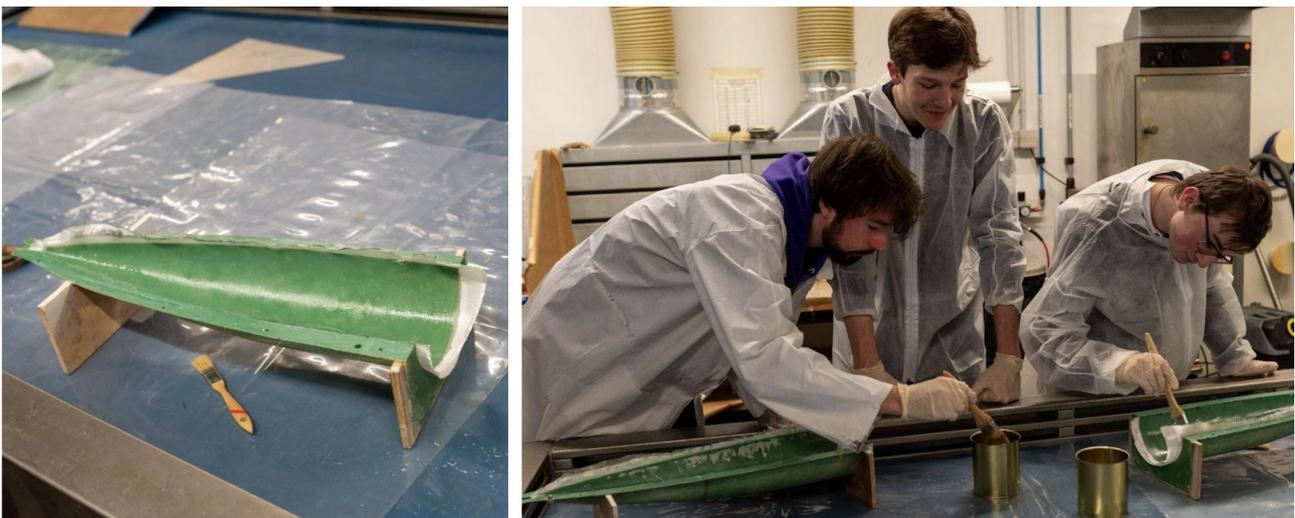


FIGURE 11 – Fabrication de la coiffe



## 3.6 Aluminium

Remarque importante : à la suite de quelques problèmes à l'atelier indépendant de notre volonté, deux bagues n'ont pas pu être usinées dans les temps pour la RCE3 mais seront terminées peu de temps après. Un substitut a été imprimé en 3D pour que cela n'ait aucune incidence sur l'intégration et l'assemblage global. L'absence de l'autre bague n'est pas critique pour les tests sur banc et n'a pas été substituée.

### 3.6.1 Bagues moteurs

Avec les peaux en carbone, les bagues moteurs sont un des éléments majeurs de la structure. Au nombre de trois par étage, elles remplissent plusieurs fonctions :

- Toutes, au renforcement global de la structure
- Toutes, à permettre à l'installation de tiges dans l'axe de la fusée pour la rigidifier davantage si besoin est
- Toutes, le guidage du moteur
- Les deux plus basses, présentent les taraudages dans lesquelles les fixations des ailerons et des patins de guidage viennent se visser (pour assurer le meilleur alignement possible, MEC5)
- La plus basse, à la reprise de poussée du moteur et sa rétention

La conception s'est avérée relativement simple, puisque cette architecture est la même que pour SCALAR-V. Dans le cas du second étage, équipé d'un Pro-54 et avec quatre ailerons comme cette dernière, le design a été repris quasiment à l'identique : seule la capacité à installer des tiges pour la rigidité n'était pas présente.

Pour le premier, le design a simplement été adapté : passage de quatre à trois branches puisque trois ailerons, et agrandissement du trou central pour correspondre à un Pro-75.

Pour ce qui est du dimensionnement, même si le design pour le Pro-54 a fait ses preuves au C'Space 2024, nous avons refait une étude complète des éléments finis. Ayant décidé cette année d'essayer la suite 3DExperience pour la CAO, l'analyse EF a directement été réalisée avec les outils intégrés. Dans les deux cas, un effort double à la poussée maximale - conformément à MEC2 - a été appliqué sur l'anneau de reprise de poussée tandis que les arêtes de chaque trou de vis sont encastrées (à défaut de modéliser les filets, nous avons pris le cas le plus défavorable). Le maillage est tétraédrique, avec une taille des éléments de 1 mm.

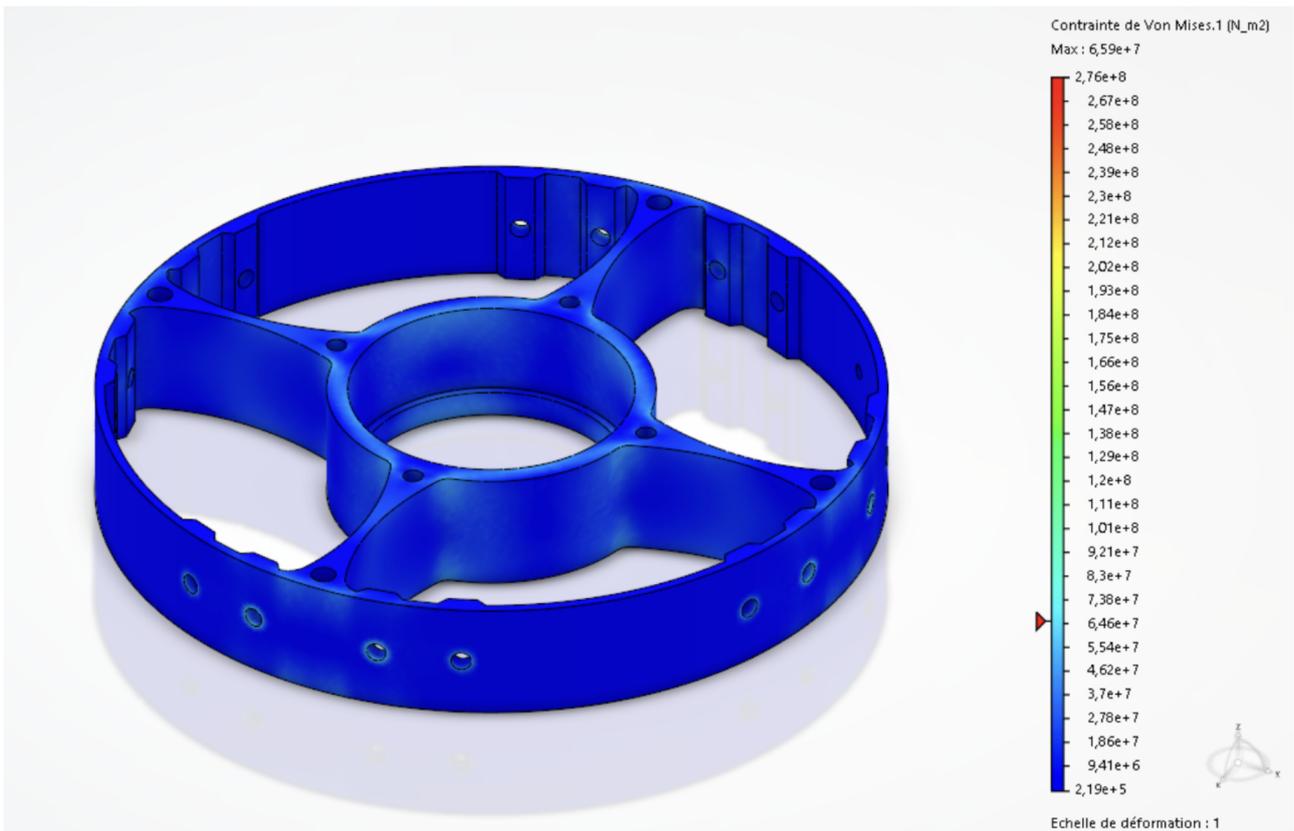


FIGURE 12 – Dimensionnement de la bague Pro-54

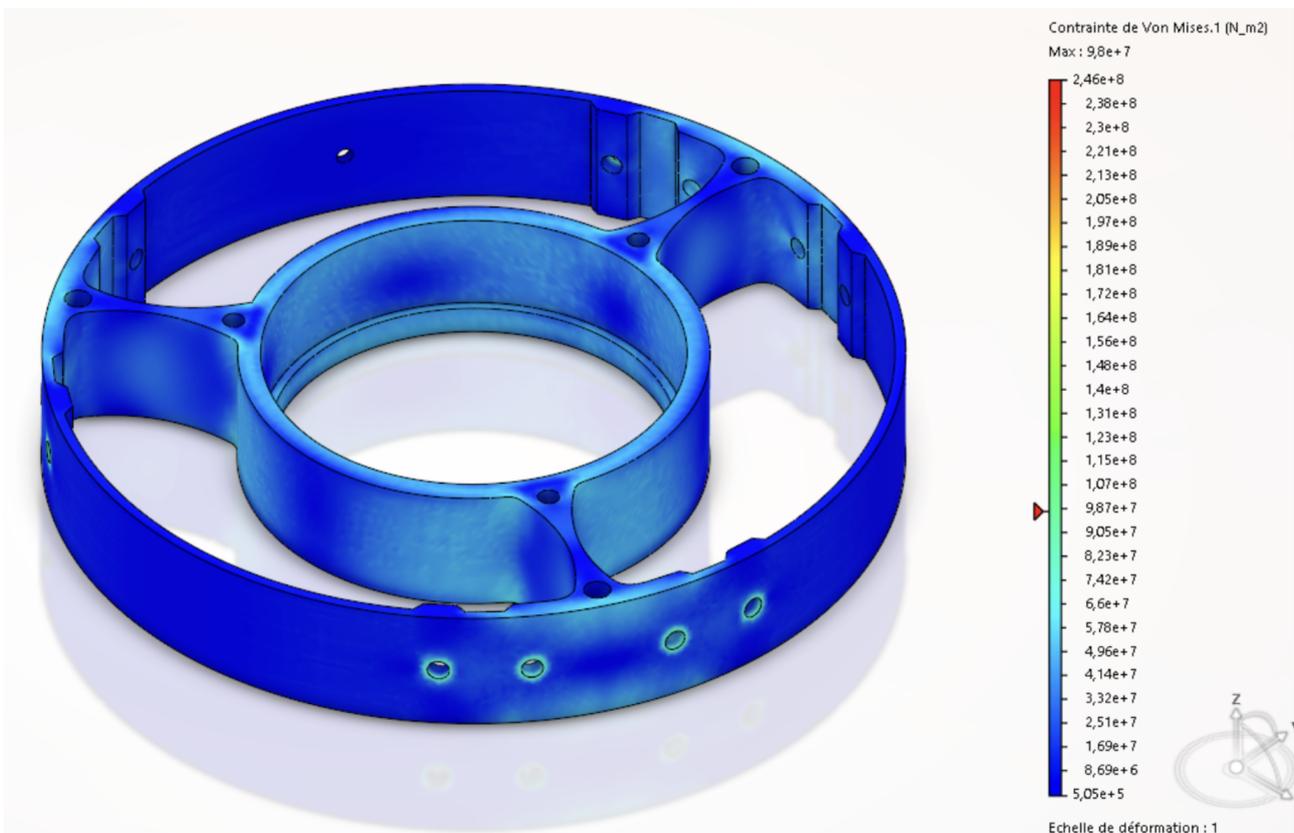


FIGURE 13 – Dimensionnement de la bague Pro-75

Avec le double des poussées maximales de chacun des moteurs, nous sommes encore loin de la limite de plasticité, et encore plus de la rupture. N'étant pas dans une optique d'optimisation de la masse mais plutôt de robustesse, nous sommes satisfaits du dimensionnement obtenu.

Une fois le design arrêté, place à l'usinage. Pour faciliter les opérations en n'ayant pas besoin de reprogrammer les machines à commande numérique pour des variations mineures, chaque tripléte est strictement identique.

Pour la rétention du moteur, nous avons fait le choix comme sur SCALAR-V d'usiner des vis à main, qui viennent se visser sur la dernière bague moteur. Ces dernières sont usinées en même temps afin d'assurer le montage, les taraudages n'étant pas de tailles conventionnelles.



FIGURE 14 – Bagues moteurs usinées

### 3.6.2 Bagues de jonction

Les autres types de bague présentes sur SCALAR-6 sont les deux bagues du second étage, qui assurent la jonction respectivement entre les deux peaux qui le composent et entre la peau supérieure et la coiffe.

La première est une simple bague annulaire avec quatre rangées de vis. Ayant déjà eu besoin d'une telle bague sur SCALAR-V, nous l'avons simplement reprise à l'identique.

La seconde présente deux rangées quant à elle pour être plus compacte et comporte un grand plateau en guise d'âme, qui permet de fixer la cage électronique d'un côté, dans la coiffe, et le contrepoids (la position la plus haute possible avec une fixation solide).



FIGURE 15 – Bagues de jonction

### 3.6.3 Equerres pour les ailerons

Les équerres font également partie des pièces reprises quasiment à l'identique de SCALAR-V. Nous avons simplement changé des trous de M4 à M5 pour diminuer la variété de visserie nécessaire, et adapté l'écartement aux ailerons de 2mm d'épaisseur le cas échéant.



FIGURE 16 – Equerres pour ailerons

### 3.6.4 Patins

Les patins ont tout simplement été repris sur l'exemple figurant dans le cahier des charges, afin que l'on soit sûr et certain de ne pas avoir de problème de compatibilité.

Dans notre cas, la force maximale considérée selon CR8 est de l'ordre de 1400 N et une analyse par éléments finis nous montre qu'il n'y a pas besoin d'adapter les dimensions initiales, il n'y a aucun souci à se faire.

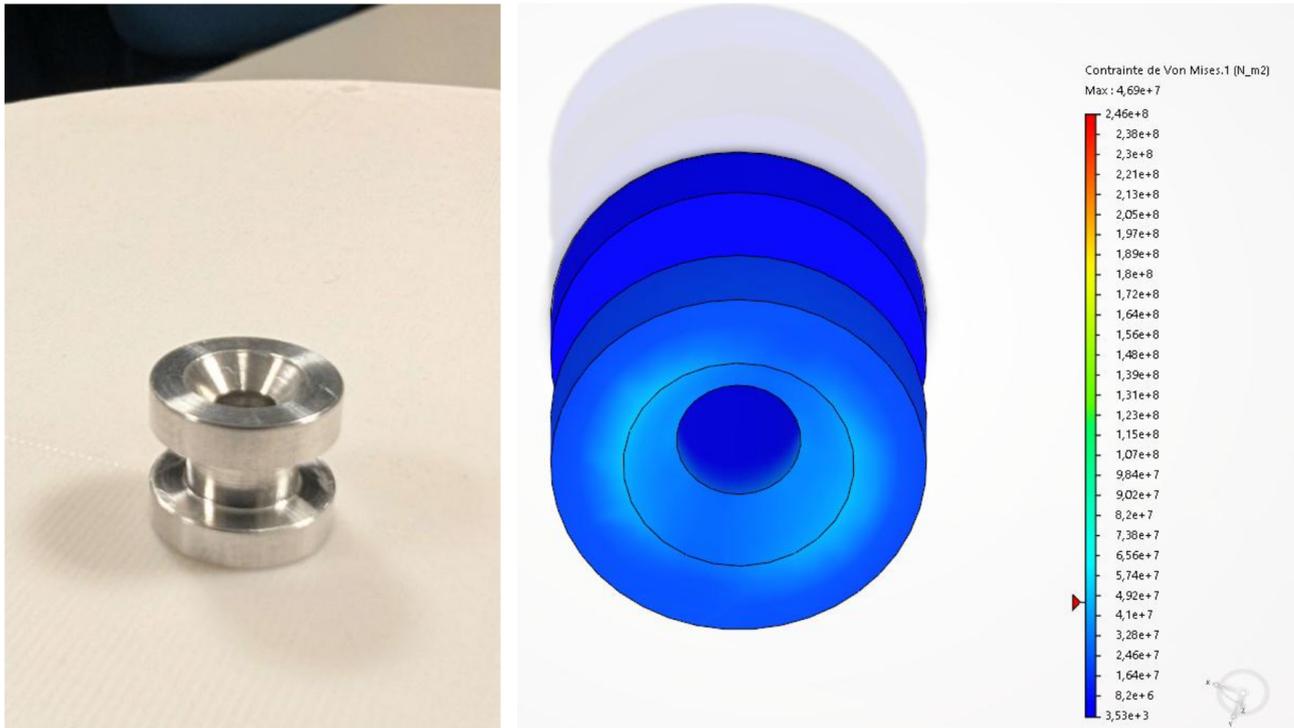


FIGURE 17 – Analyse éléments finis des patins

### 3.7 Sous-systèmes internes

#### 3.7.1 Système de Séparation Inter Etage (SSIE)

Ce système est la véritable pierre angulaire de SCALAR-6 pour des raisons évidentes, et celui sur lequel se sont concentrés la plupart de nos efforts au sein de l'équipe mécanique.

Nous avons fait le choix de développer deux systèmes en parallèle en phase de conception avant de n'en retenir qu'un pour l'usinage. Explorer deux méthodes de verrouillage et de maintien distinctes, compte tenu du délai d'un an que nous nous étions donnés, était nécessaire dans le cas où l'une d'entre elles se révélait être une mauvaise idée.

La première option (S1) repose sur une idée que nous avons commencé à explorer en marge de SCALAR-V en prévision de cette année. Dans celle-ci, la liaison rigide entre les deux étages est réalisée par un centrage sur une longueur importante entre les parties basses et hautes. Le verrouillage est pour sa part assuré par des billes, logées dans une des parties et venant s'imbriquer dans la seconde à l'aide d'un mobile motorisé. Ce dernier les maintient en position fermée, et elles peuvent naturellement revenir en position ouverte dans le cas contraire.

Le second système (S2) repose sur un ensemble de crochets qui viennent agripper la pièce solidaire de l'étage supérieur. Un mécanisme permet à ces crochets de se loger dans une gorge dédiée, avec un jeu négatif qui permet de les plaquer. Cette préhension, répartie sur l'ensemble du périmètre, assure un verrouillage fiable ainsi qu'une bonne rigidité de l'assemblage.

Dans les deux cas, des ressorts répartis sur tout le pourtour permettent une séparation franche et immédiate.

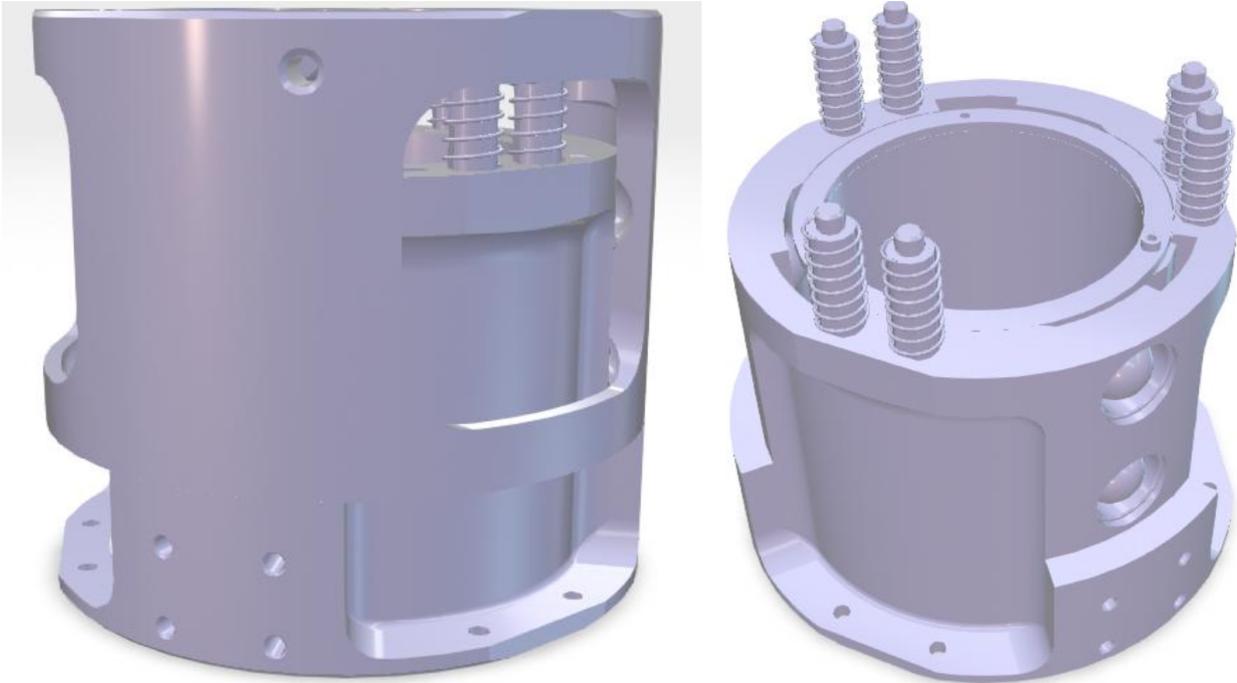


FIGURE 18 – CAO du SSIE 1

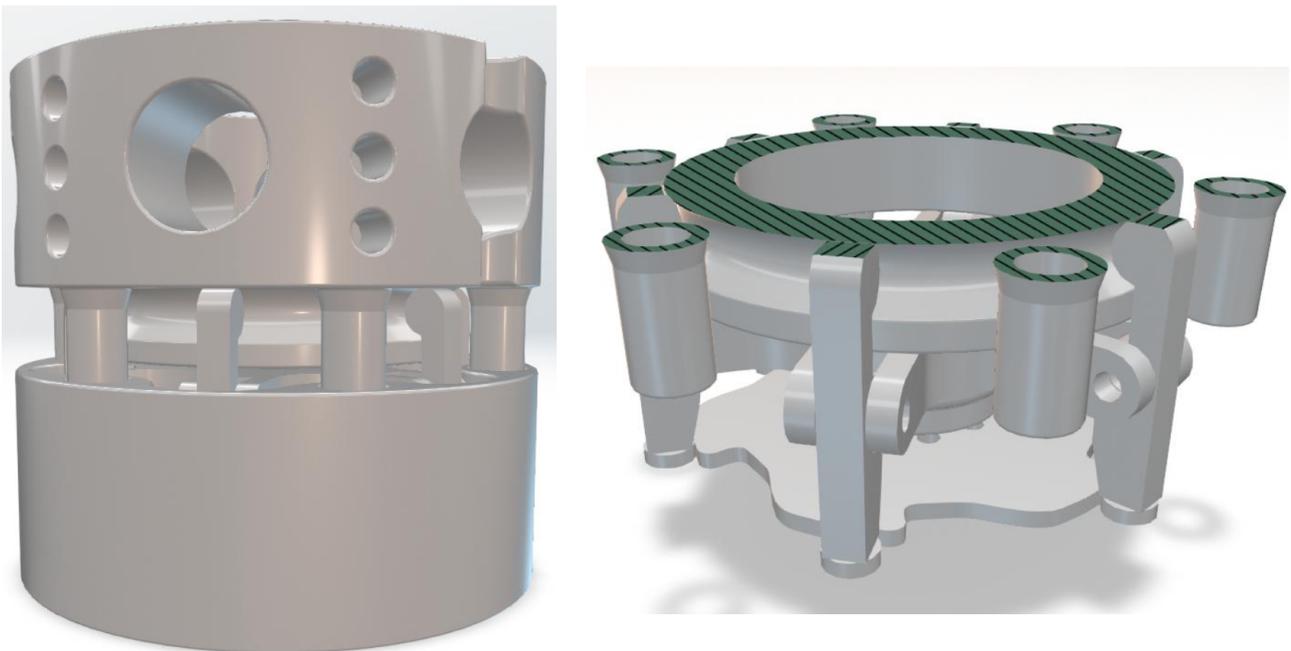


FIGURE 19 – CAO du SSIE 2

Les deux systèmes ont été entièrement réalisés et assemblés en CAO, puis prototypés en impression 3D. Une fois bien dégrossis, nous les avons passés en revue plusieurs fois avec l'atelier jusqu'à la fin de la conception. Leur apport fut essentiel dans l'amélioration générale des

systemes et en particulier pour assurer leur usinabilité.

En concertation avec eux, nous avons finalement fait le choix de la première option, pour plusieurs raisons. La première d'entre elles, la résilience : si le S2 est certes mécaniquement plus élégant, il est aussi plus délicat ; une faiblesse majeure quand la fusée doit être tirée deux fois dans un délai ne permettant pas de réparations majeures. La deuxième, la fabricabilité : S1 comporte trois pièces majeures, massives certes, mais trois, contre un nombre important de petites pièces. La question de la masse justement était à l'avantage de S2, mais l'apogée étant limitée et la stabilité pouvant être garantie dans tous les cas, ce critère ne s'est pas révélé déterminant. Les prototypes n'ont pas permis de les départager d'un point de vue rigidité – critère le plus important, une flèche trop importante ayant disqualifié la plupart de ceux ayant tenté avant nous - le centrage long de S1 fut jugé plus susceptible de répondre aux attentes une fois le bras de levier du deuxième étage pris en compte que la préhension de S1. Enfin, la partie haute de S1 risquant de moins perturber le flux du propulseur du second étage (nécessairement au-dessus de la séparation) que celle de S2 scella la décision.

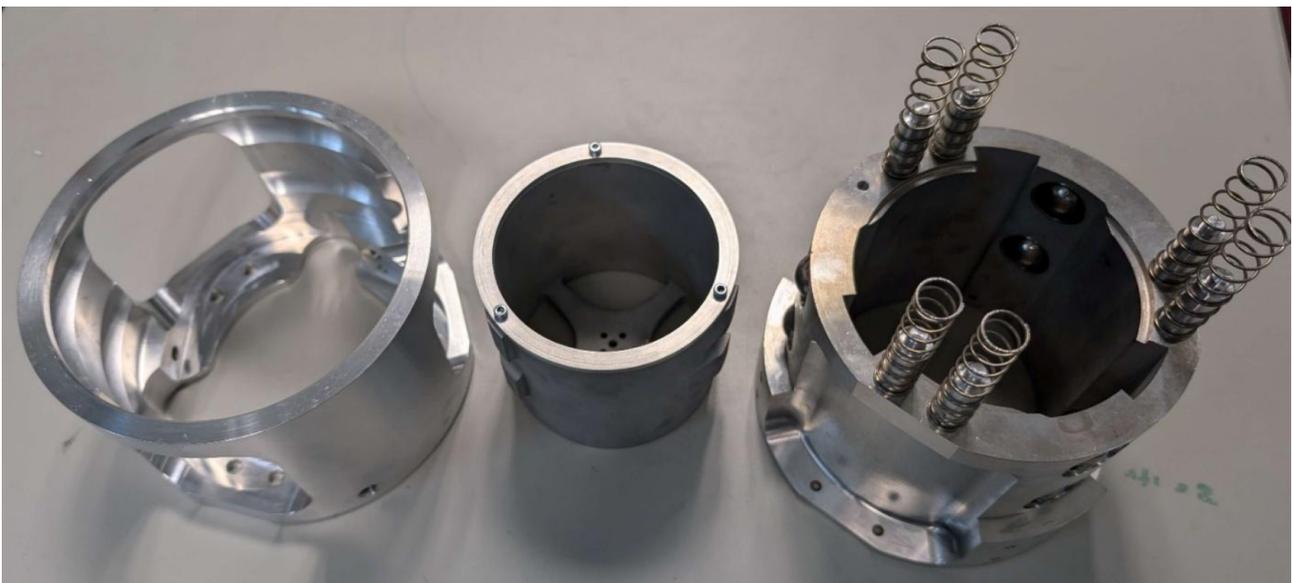


FIGURE 20 – Usinage su SSIE

Intégralement usiné en aluminium, le système de séparation comporte au final peu de pièces. On y retrouve :

- A gauche, la partie dans le second étage. Évidée pour des questions de poids, on y voit les deux gorges dans lesquelles les billes viennent se loger une fois sorties. Elle est fixée par trois vis M8, juste équilibre entre solidité et rapidité puisque devant être installées par le pyrotechnicien après celle du moteur du second étage
- Au milieu, le mobile. Entraîné par un motoréducteur par le dessous, il permet de verrouiller le système en poussant les billes dans les gorges. Une collerette est vissée sur le dessus pour le retenir dans la partie basse

- A droite, la partie basse. Elle est constituée d'un bloc majeur, sur lequel sont montées les tiges pour les ressorts ainsi que des bagues qui empêchent les billes de complètement sortir de leur logement

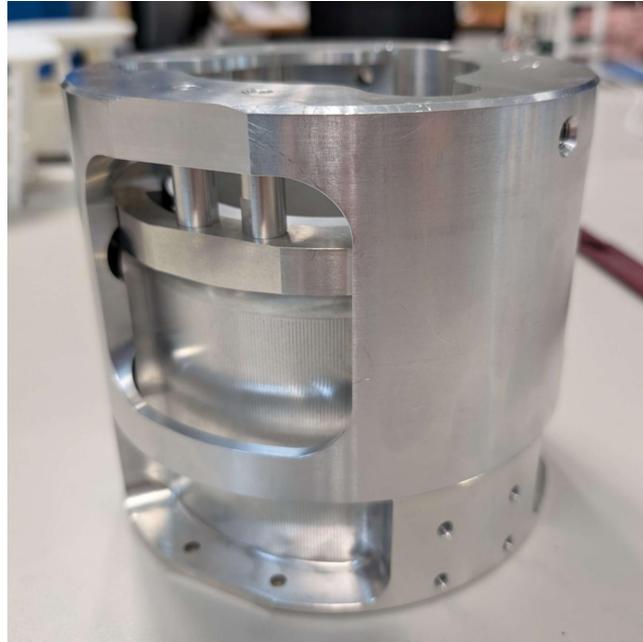


FIGURE 21 – SSIE assemblé

### 3.7.2 Systèmes d'éjection des parachutes

Après avoir expérimenté l'éjection par la coiffe sur SCALAR-V, la conclusion fut que, bien que mécaniquement recherché, le système dont nous disposions avait besoin d'une remise en état pour ne plus risquer de se gripper. De plus, il s'adaptait mal en cas de besoin d'un parachute plus grand que prévu initialement. Ayant peu de marge côté usinage et devant nécessairement avoir une éjection latérale pour l'étage inférieur, ce système a été abandonné.

Nous sommes donc revenus aux bases : un compartiment dans lequel se trouve le parachute et une trappe dont l'ouverture est commandée par un servomoteur. On y retrouve les aides classiques à l'extraction du parachute que sont la mousse dans le compartiment et un lien entre la trappe et le parachute. Pour accroître encore plus cette assistance, nous avons ajouté un ressort, qui permet une éjection de la trappe beaucoup plus franche et ainsi satisfaire d'autant plus REC1. Pour ce qui est de REC5, les efforts étant repris par la peau qui a le même impératif de résistance et pouvant largement les encaisser, il n'y a pas de problème.

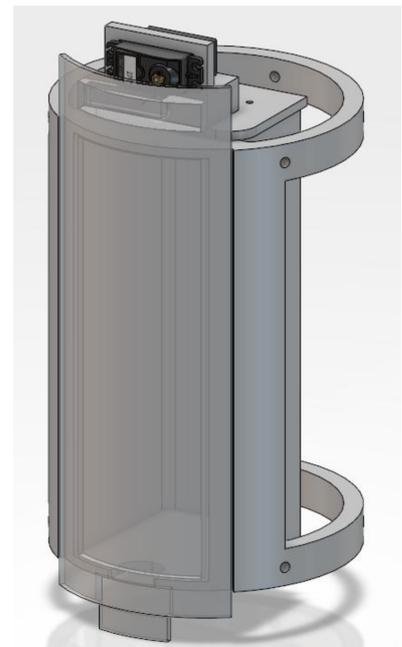


FIGURE 22 – Compartiment parachute

### 3.7.3 Système d'éjection du CanSat

SCALAR-V embarquait deux CanSats, et le système d'éjection avait globalement apporté satisfaction. Toutefois, leurs intégrations pouvaient être simplifiées, et cela était un objectif cette année. De plus, puisque SCALAR-6 n'emporte finalement qu'un seul CanSat, il y avait l'opportunité d'essayer de repartir de zéro. Des idées de butées intermédiaires ont été explorées - pour maintenir le ressort d'éjection comprimé tout en gardant la fermeture de la trappe facile - mais l'unique CanSat étant de surcroît plus petit, il fut jugé qu'elles apportaient une complexité peu utile. L'éjection d'un objet par une trappe latérale à l'aide d'un servomoteur est un principe simple qui laisse peu de place à l'innovation, ce qui aboutit à un système assez similaire à ce qui a pu être fait les années précédentes et ce que l'on peut retrouver côté éjection du parachute.

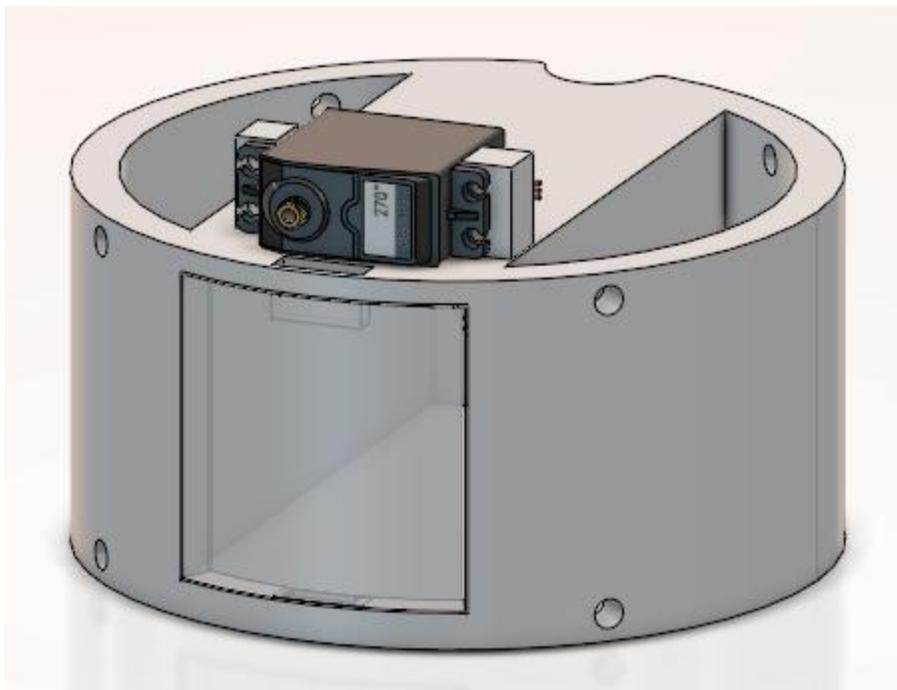


FIGURE 23 – Compartiment CanSat

### 3.7.4 Cages électroniques

SCALAR-6 comporte **trois cages électroniques distinctes** : une pour le premier étage, une dédiée à l'allumage du moteur du second étage et une autre pour les systèmes embarqués généraux dans la coiffe.

**La cage du premier étage** est conçue avec un empilement horizontal des cartes, une géométrie dictée par un impératif de compacité. L'IHM est cependant positionnée sur la tranche afin de correspondre à une ouverture dans la peau. On y trouve également une partie inclinée, conformément au CR5, destinée à fixer les câbles arrachés lors du lancement et à en assurer la détection.

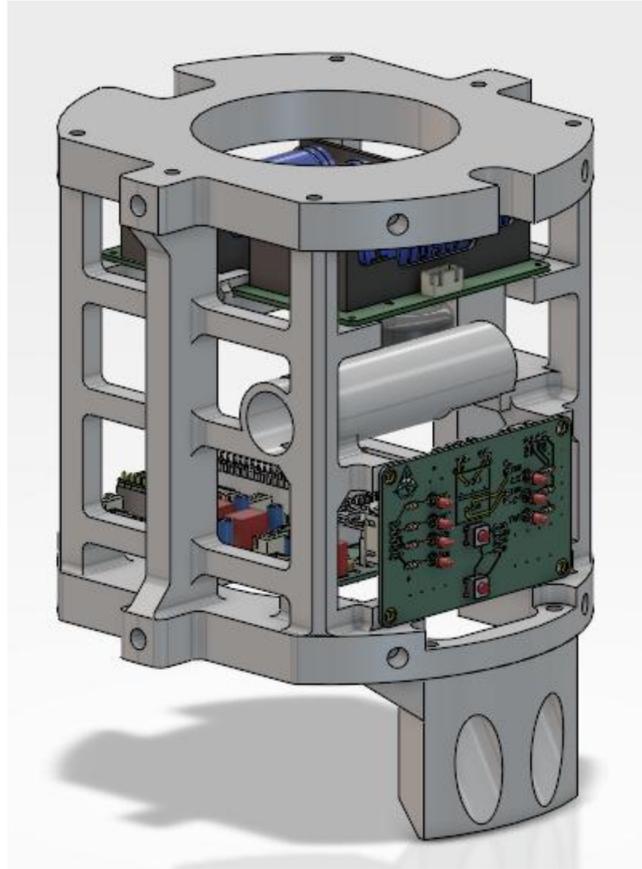


FIGURE 24 – Cage électronique 1er étage

A l'inverse, **la cage dans la coiffe** est pour sa part élancée, le volume n'étant pas ici une restriction. Il était cependant nécessaire d'agencer les différents composants de façon à faciliter le routage des câbles vers le bas de la fusée et pointer les antennes vers le haut.

Entre les deux, **la cage allumage** voit son positionnement lui imposer une contrainte de forme, l'espace entre deux bagues étant suffisant pour travailler. Cependant, la présence du moteur au centre nécessite une géométrie annulaire et une réflexion sur le positionnement des sécurités pyrotechniques, ayant besoin de plus de profondeur que l'électronique classique. Pour des questions d'accessibilité, l'IHM de l'étage supérieur est également positionnée ici, d'où la présence à nouveau d'une ouverture dans la peau.

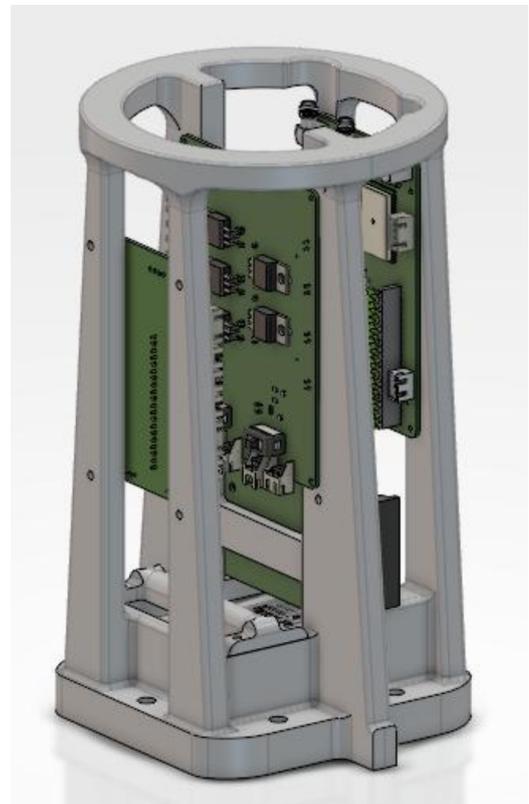


FIGURE 25 – Cage électronique coiffe

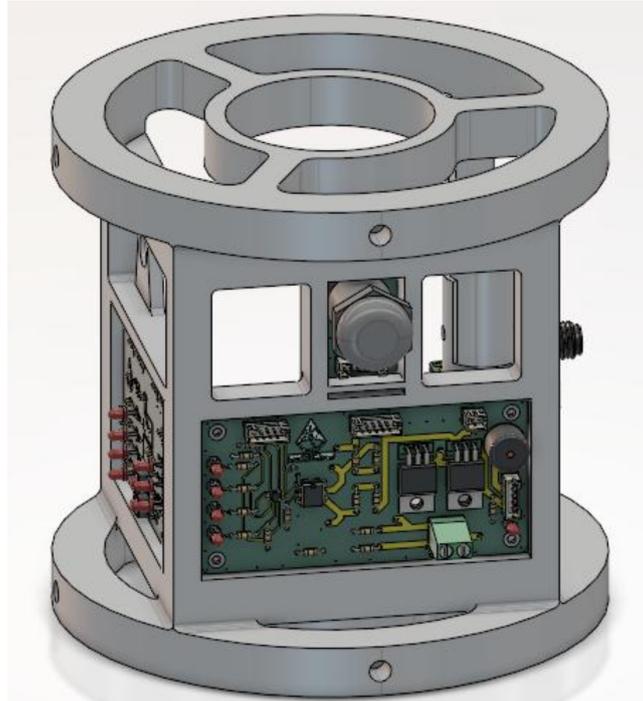


FIGURE 26 – Cage électronique 1er étage

De façon générale, la réflexion s'est articulée autour de trois axes : robustesse et bon maintien des composants, compatibilité avec les systèmes environnants, et intégration pratique des ensembles.

## 4 Systèmes électroniques embarqués

### 4.1 Présentation générale de l'architecture avionique de la fusée

Aucun câble ni signal ne transite entre les deux étages de la fusée, afin de limiter la complexité des systèmes électroniques. Chaque étage comporte ainsi sa propre source d'énergie (batteries, systèmes de régulation de tension et de distribution de puissance), son séquenceur (carte électronique qui commande les actionneurs essentiels au bon fonctionnement de la fusée) sa carte expérience (qui embarque les expériences de chaque étage) et son IHM (qui comporte les boutons permettant d'activer manuellement les actionneurs de chaque étage ainsi que les LED servant à indiquer l'état de fonctionnement des systèmes électroniques).

L'étage supérieur comporte de plus la carte d'allumage du moteur de l'étage supérieur, allumée en vol, ainsi que le dispositif pyrotechnique permettant l'allumage dudit moteur (inflammateur).

En termes d'actionneurs, chaque étage dispose d'un servomoteur afin d'ouvrir et fermer la trappe qui contient son parachute. L'étage supérieur dispose d'un second servomoteur pour contrôler la trappe permettant le largage de la charge utile (Cansat), tandis que l'étage inférieur contrôle quant à lui le moteur du SSIE. Chaque étage dispose également d'un buzzer actif qui, couplé aux LED de l'IHM, permet d'indiquer clairement l'état des systèmes électroniques à bord et de signaler toute erreur dans leur fonctionnement.

### 4.2 Product Breakdown Structures

Les Product Breakdown Structures (PBS) présentent l'architecture matérielle haut niveau des systèmes électroniques embarqués du lanceur, sans rentrer dans le détail des composants des cartes électroniques. Ils permettent de donner un aperçu global de ces systèmes.

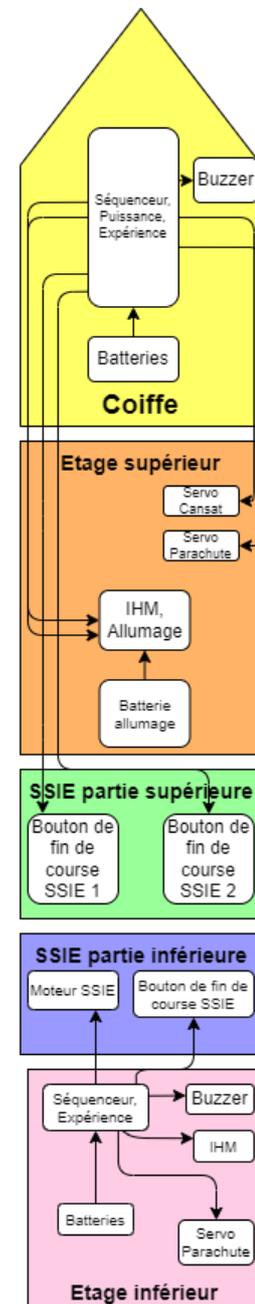


FIGURE 27 – Schéma fonctionnel

### 4.2.1 Product Breakdown Structure de l'étage supérieur

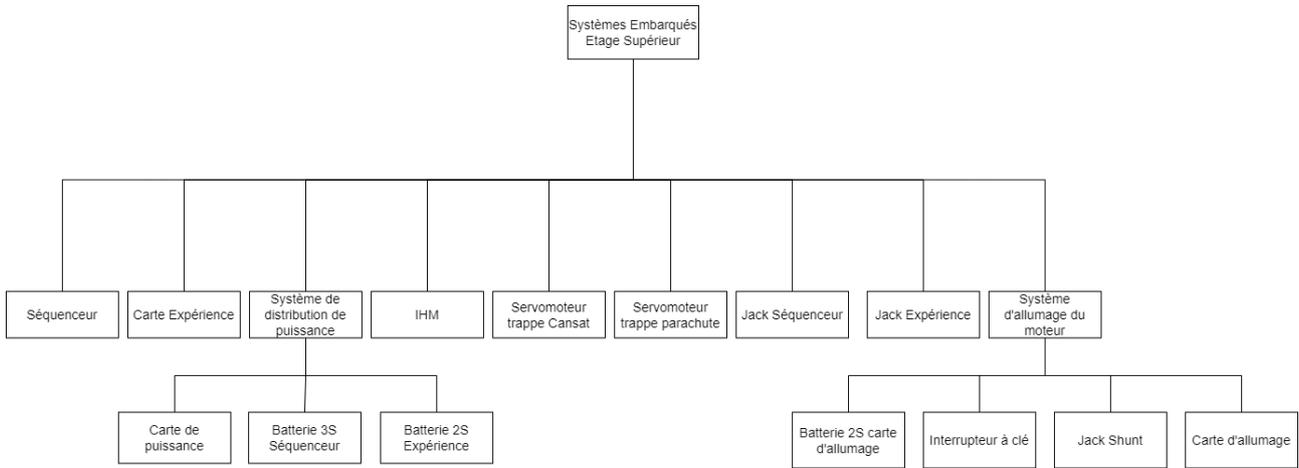


FIGURE 28 – PBS des systèmes embarqués de l'étage supérieur

### 4.2.2 Product Breakdown Structure de l'étage inférieur

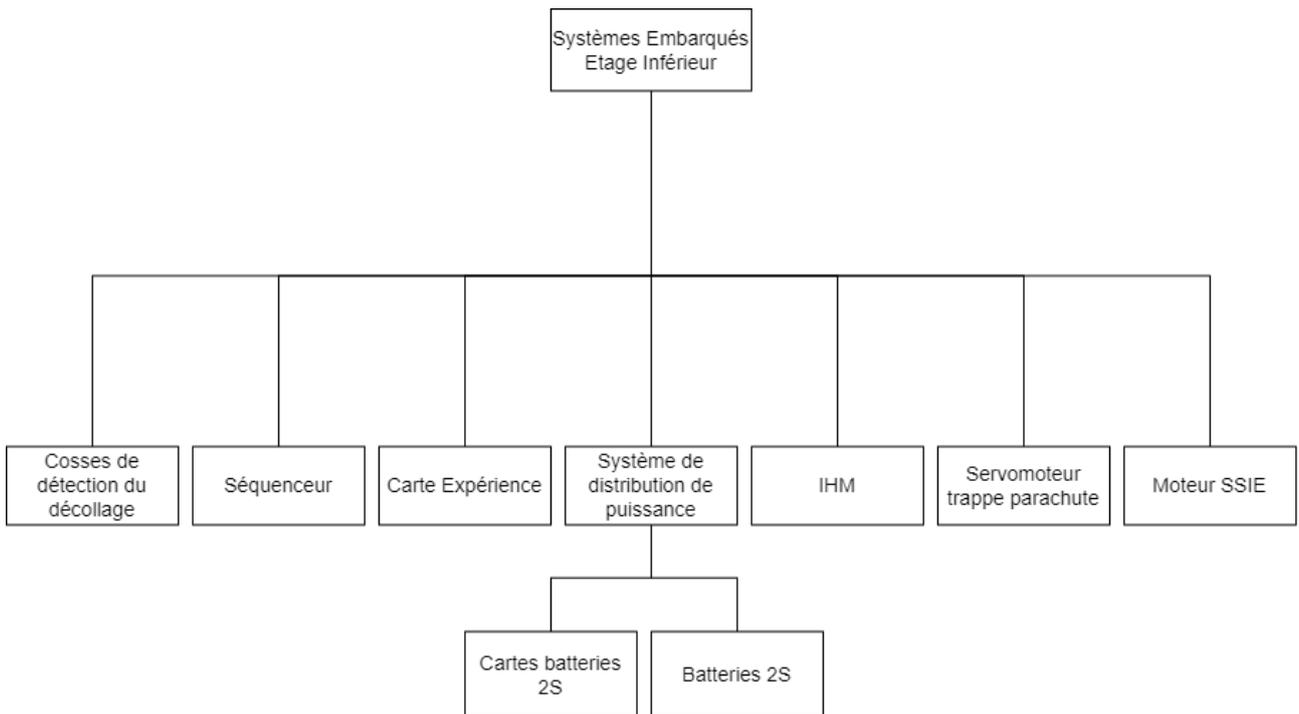


FIGURE 29 – PBS des systèmes embarqués de l'étage inférieur

## 4.3 Synoptiques

Les synoptiques présentent l'architecture fonctionnelle détaillée des systèmes électroniques embarqués, en précisant de plus les composants principaux qui réalisent les fonctions. Les signaux échangés entre composants électroniques sont également précisés. Les synoptiques permettent ainsi d'approfondir la vision globale issue des PBS.



4.3.1 Synoptique de l'étage supérieur

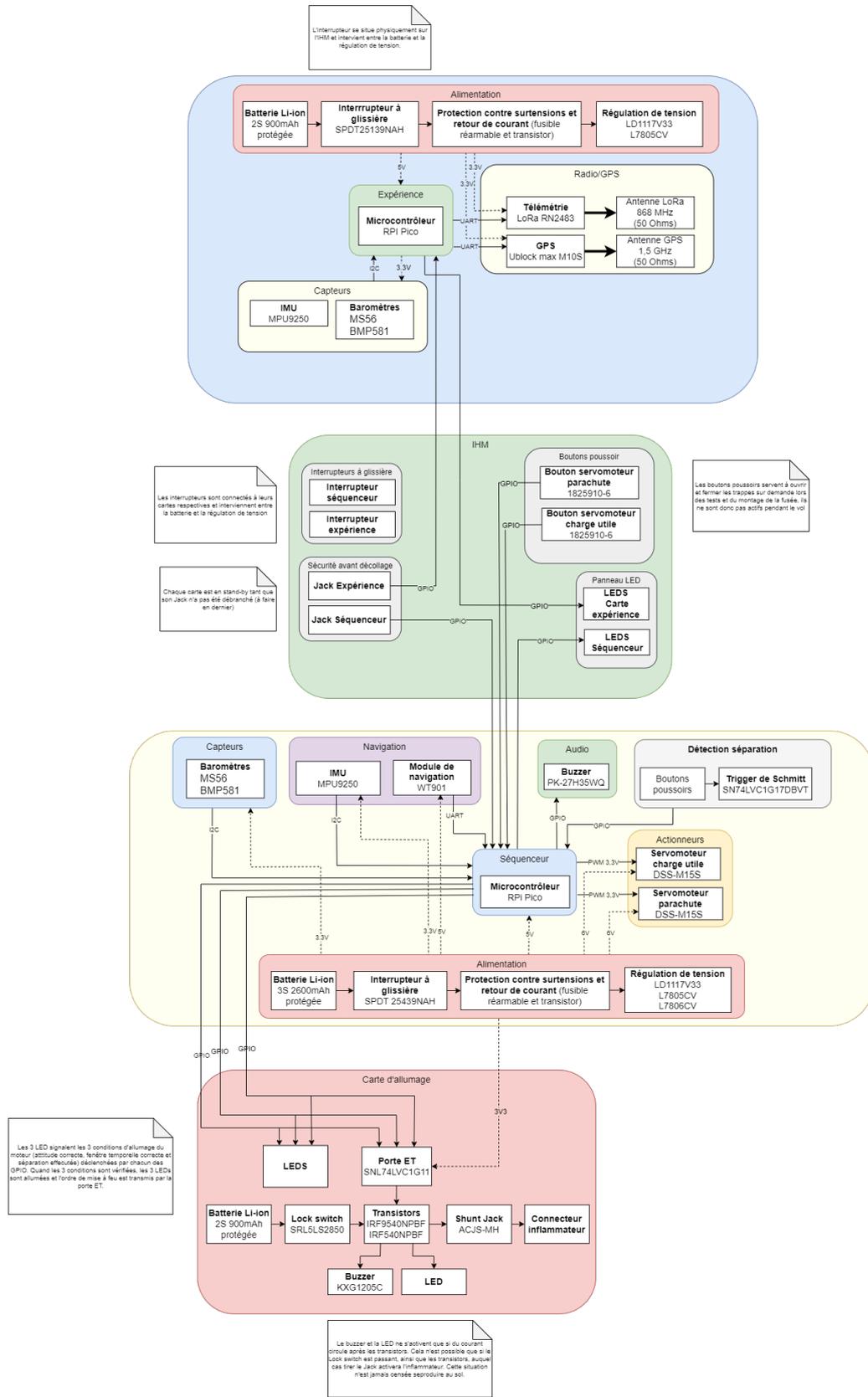


FIGURE 30 – Synoptique de l'étage supérieur

### 4.3.2 Synoptique de l'étage inférieur

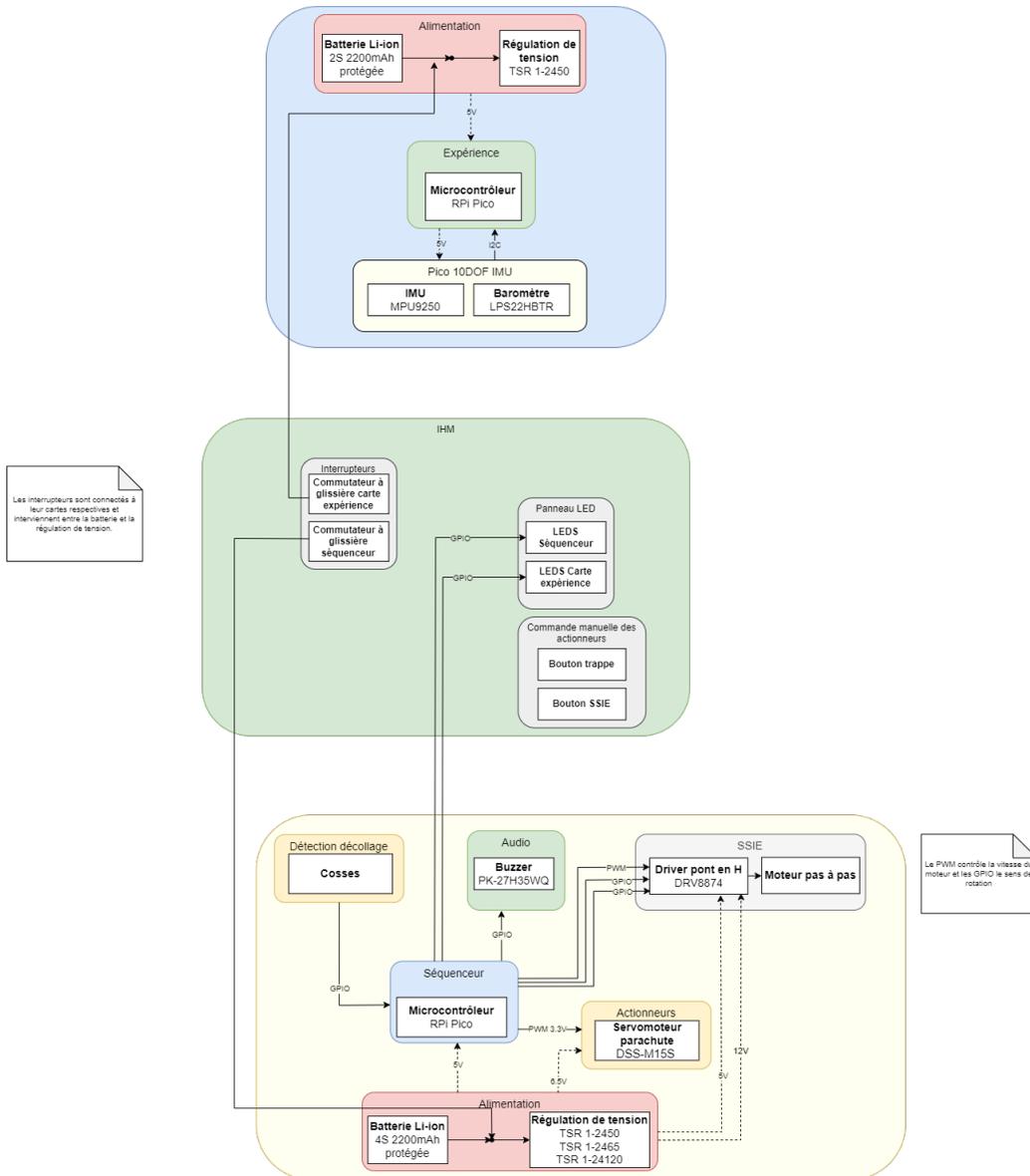


FIGURE 31 – Synoptique de l'étage inférieur

## 4.4 Cahier des charges

Les exigences qui gouvernent la conception des systèmes électroniques embarqués se fondent sur le cahier des charges officiel fourni par le CNES (document applicable APP1). Nous avons donc retravaillé ce document pour rédiger notre propre cahier des charges, qui respecte mieux les bonnes pratiques d'ingénierie système quant à la rédaction des exigences et surtout est plus ciblé pour notre projet.

Nous avons caractérisé chaque exigence par son type, son numéro chronologique parmi les exigences du même type, son numéro de révision, sa description et sa validation.



Les types d'exigences sont :

- Les exigences fonctionnelles, qui définissent ce que le système doit faire.
- Les exigences opérationnelles, qui définissent comment le système doit être opéré.
- Les exigences de qualité, qui garantissent que le système a été fait en suivant des méthodes et procédés rigoureux.
- Les exigences de performances, qui quantifient les performances attendues du système, et qui vont donc plus loin que la simple fonctionnalité.
- Les exigences de mission, qui définissent la mission du système, dont découlent ses fonctions.
- Les exigences de sécurité, qui spécifient des règles de sécurité des biens et des personnes lors de la conception ou l'opération du système.

Les domaines d'exigences spécifient quel aspect du système est concerné par chaque exigence. Ces domaines sont :

- Electronique : l'exigence porte sur l'un des systèmes électroniques de la fusée, hormis la télémétrie et les dispositifs pyrotechniques, qui ont leur domaines dédiés.
- Télémétrie : l'exigence porte sur le dispositif de télémétrie de la fusée.
- Pyrotechnie : l'exigence porte sur le dispositif d'allumage du moteur de l'étage supérieur.
- Harnais : l'exigence porte sur les harnais (connecteurs, câblages...) des systèmes électroniques de la fusée.
- Signalétique : l'exigence porte sur les signaux d'information devant figurer sur la fusée ou être transmis par la fusée, par des moyens auditifs ou visuels.
- Sauvegarde : l'exigence porte sur la sauvegarde des biens et des personnes, lors de l'opération de la fusée, au sol ou en vol.
- Suivi de projet : l'exigence porte sur le suivi, l'organisation ou la documentation du projet.

Le numéro chronologique de chaque exigence permet simplement de dénombrer le nombre d'exigences par type d'exigences. Le numéro de révision indique la version de l'exigence.

La validation décrit succinctement des solutions techniques mises en place pour valider l'exigence.

Les exigences détaillées se trouvent dans le document référence REF2 et n'ont pas été ajoutées au présent dossier de conception afin de ne pas l'alourdir outre mesure.



## 4.5 Dimensionnement des batteries

### 4.5.1 Séquenceur de l'étage supérieur

La consommation en courant du séquenceur de l'étage supérieur est essentiellement due à son microcontrôleur et son module de navigation (se référer à la sous-section Séquenceur de l'étage supérieur dans la section Architecture des cartes électroniques), les appels de courant des servomoteurs étant très brefs.

D'après le document de référence **REF21**, la consommation maximale du microcontrôleur est inférieure à 100 mA. D'après le document **REF28**, la consommation du module de navigation est inférieure à 25 mA. La consommation totale de courant du séquenceur est donc inférieure à 125 mA.

Afin de garantir l'autonomie de 3h minimum requise par le cahier des charges, et en prenant une marge de 50% sur l'autonomie de la batterie, il faut donc une batterie avec une capacité minimale 750 mAh pour le séquenceur de l'étage supérieur.

### 4.5.2 Expérience de l'étage supérieur

La consommation en courant de l'expérience de l'étage supérieur est due à son microcontrôleur, son module GNSS et son module de télémétrie (se référer à la sous-section Carte expérience de l'étage supérieur dans la section Architecture des cartes électroniques).

D'après le document de référence **REF21**, la consommation maximale du microcontrôleur est inférieure à 100 mA. D'après le document **REF11**, la consommation du module GNSS est inférieure à 50 mA. D'après le document **REF16**, la consommation maximale du module de télémétrie est inférieure à 45 mA. La consommation totale de courant de l'expérience est donc inférieure à 200 mA.

Afin de garantir l'autonomie de 3h minimum requise par le cahier des charges, et en prenant une marge de 50% sur l'autonomie de la batterie, il faut donc une batterie avec une capacité minimale 1200 mAh pour l'expérience de l'étage supérieur.

### 4.5.3 Séquenceur de l'étage inférieur

La consommation en courant du séquenceur de l'étage inférieur est essentiellement due à son microcontrôleur (se référer à la sous-section Carte séquenceur et expérience de l'étage inférieur dans la section Architecture des cartes électroniques), les appels de courant du servomoteur et du moteur SSIE étant très brefs.

D'après le document de référence **REF21**, la consommation maximale du microcontrôleur est inférieure à 100 mA.

Afin de garantir l'autonomie de 3h minimum requise par le cahier des charges, et en prenant une marge de 50% sur l'autonomie de la batterie, il faut donc une batterie avec une capacité minimale 600 mAh pour le séquenceur de l'étage inférieur.

### 4.5.4 Expérience de l'étage inférieur

La consommation en courant de l'expérience de l'étage inférieur est due à son microcontrôleur et à son module d'expérience (se référer à la sous-section Carte séquenceur et expérience de l'étage inférieur dans la section Architecture des cartes électroniques).

D'après le document de référence **REF21**, la consommation maximale du microcontrôleur est inférieure à 100 mA. D'après le document **REF5**, la consommation du module expérience est inférieure à 5 mA. La consommation totale de courant de l'expérience est donc inférieure à 2105 mA.

Afin de garantir l'autonomie de 3h minimum requise par le cahier des charges, et en prenant une marge de 50% sur l'autonomie de la batterie, il faut donc une batterie avec une capacité minimale 600 mAh pour l'expérience de l'étage inférieur.

## 4.6 Architecture des cartes électroniques

### 4.6.1 Séquenceur de l'étage supérieur

#### Présentation du produit

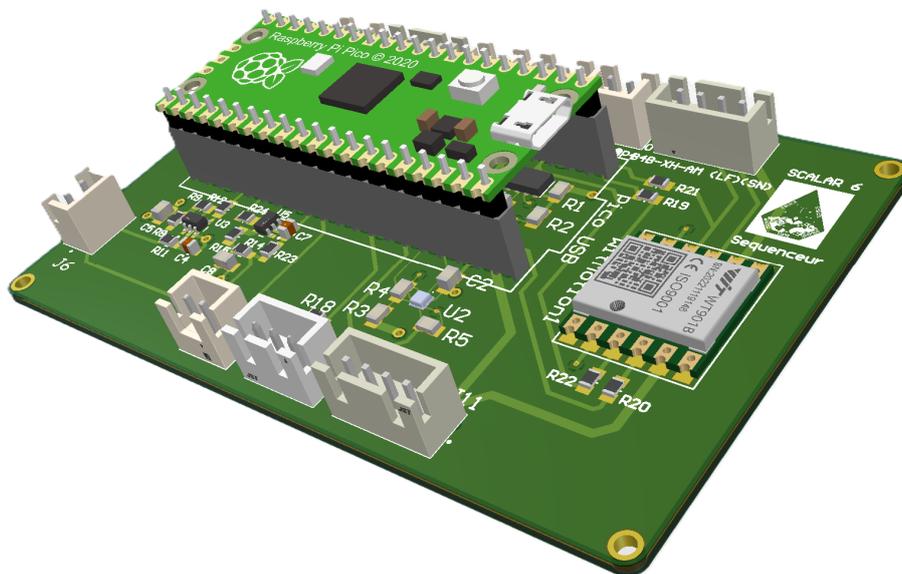


FIGURE 32 – Séquenceur de l'étage supérieur

Le séquenceur de l'étage supérieur commande les actionneurs qui effectuent les actions indispensables au bon fonctionnement de la fusée. Il se compose essentiellement d'un microcontrôleur, d'une carte de navigation et d'entrées/sorties qui interagissent avec les actionneurs. Ses fonctions essentielles sont la détection du décollage, qui démarre une première minuterie, la détection de la séparation, qui démarre une seconde minuterie en redondance avec la première,



l'allumage du moteur de l'étage supérieur lorsque les conditions sont réunies, l'éjection de la charge utile (Cansat) et le dépoïement du parachute de l'étage supérieur.

Le microcontrôleur utilisé est le **Raspberry Pi Pico**, choisi pour sa simplicité d'utilisation, ses performances suffisantes pour un usage sur fusée expérimentale son prix très abordable et la maturité du club quant à son utilisation. Ce microcontrôleur est en effet utilisé lors du projet de formation des nouveaux étudiants du club et a également été utilisé sur SCALAR-V.

La carte de navigation est la **WitMotion JY901**, qui nous a été recommandée par Planète Sciences pour sa simplicité et son efficacité. Ce module, soudable en surface ou avec des broches traversantes, comprend un IMU, un magnétomètre, et un capteur de température, dans un boîtier compact et avec une interface simple via UART.

Deux baromètres, le **BMP581** et le **MS56** ont initialement été prévus, afin de mesurer l'altitude de la fusée plus facilement que via les mesures d'attitude et d'accélération issues de la WitMotion, mais pour des raisons budgétaires et de simplicité, ils n'ont pas été soudés sur la carte. De même, l'IMU **MPU 9250**, initialement prévu en redondance de la WitMotion, n'a pas été soudé.

Afin de détecter la séparation inter-étages, deux boutons poussoirs **TD1150AF100Q**, choisis pour leur petite taille, sont placés dans le SSIE. Ils sont appuyés quand les étages sont reliés et sont relâchés lorsque les étages sont séparés. Sur chacun de ces deux boutons, l'une des broches est reliée au séquenceur, l'autre à la masse. Lorsque les étages sont reliés, la ligne est donc rappelée à la masse, et quand les étages sont séparés, une résistance de tirage tire la ligne à 3V3 sur le séquenceur. Afin de garantir une transition propre entre l'état bas et l'état haut, un trigger de Schmitt **SNL74CV1G17** est utilisé sur chacun des deux boutons. Ces triggers de Schmitt ont été choisis car ils ont déjà été utilisés sur des fusées expérimentales tirées par Planète Science dont les schémas des cartes électroniques sont librement accessibles en ligne.

Les servomoteurs utilisés pour ouvrir la trappe du parachute et du Cansat sont les **DSS-M15S** de DFROBOT. Ces servomoteurs sont contrôlés par PWM et disposent d'un retour analogique. Ils ont été choisis pour leur couple maximal de plus de  $13 \text{ kg.cm}^{-1}$ , suffisant pour ouvrir les trappes en vol d'après le retour d'expérience de SCALAR-V, et pour leur simplicité d'utilisation par rapport aux servomoteurs intelligents fonctionnant en UART de SCALAR-V.

Le buzzer connecté au séquenceur est le modèle **PK-27H35WQ** de Mallory Sonalert Product Inc. C'est un buzzer actif, comme celui embarqué auparavant sur SCALAR-V. Il a été choisi pour son niveau sonore de 100 dB à 30 cm à une tension de 12 V, performances équivalentes au buzzer de SCALAR-V, qui s'est montré très satisfaisant.



Le séquenceur est également connecté à un Jack, retiré juste avant le lancement afin d'armer le séquenceur pour détecter le décollage avec la carte de navigation, à deux boutons poussoirs situés sur l'IHM de l'étage supérieur, qui servent à activer manuellement l'ouverture et la fermeture des trappes du parachute et du Cansat lors des opérations pré-lancement, et à un interrupteur à glissière, également situé sur l'IHM, qui sert à allumer et éteindre le séquenceur.

Enfin, conformément au cahier des charges, le séquenceur est connecté à quatre LED situées sur l'IHM. Trois d'entre elles sont allumées en permanence quand le séquenceur est mis sous tension, pour signaler que les lignes de tension 3V3, 5V et 6V sont actives. La dernière est contrôlée par le séquenceur et clignote de différentes façons pour signaler l'état du séquenceur, conjointement avec le buzzer.

### Schématique

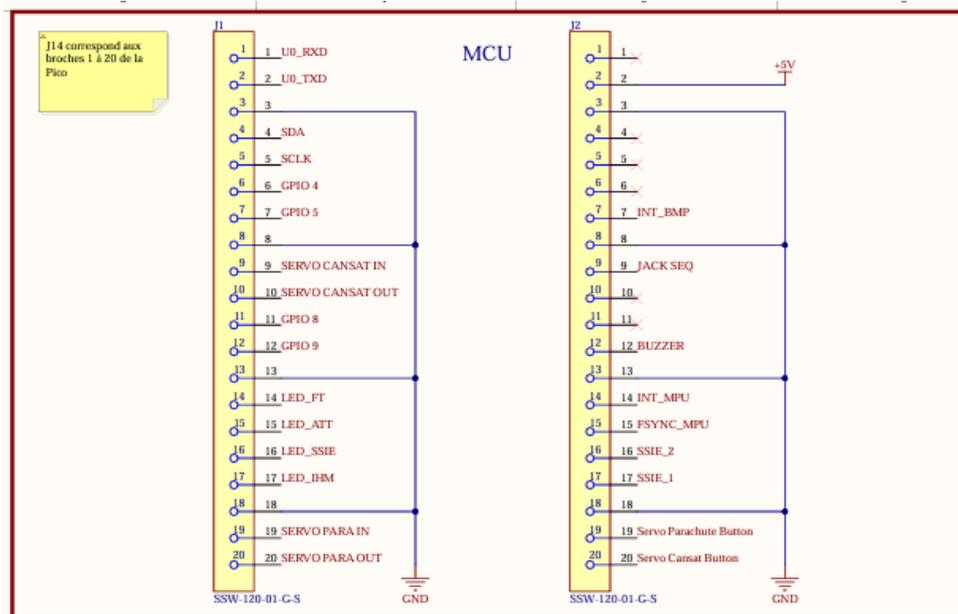


FIGURE 33 – Schématique du séquenceur de l'étage supérieur

Le microcontrôleur n'étant pas soudé au séquenceur, mais inséré dans deux rangées de connecteurs pour être retiré de la carte facilement, il est représenté sur la schématique par les symboles des deux connecteurs d'une rangée à vingt broches qui servent à le connecter. Les tableaux ci-dessous explicitent les fonctions des broches.



Connecteur J1		
1	U0_RXD	Ligne RX du port UART 0, connecté à la WitMotion
2	U0_TXD	Ligne TX du port UART 0, connecté à la WitMotion
3	GND	Connecté à la masse
4	SDA	Ligne SDA du bus I2C partagé par les capteurs de pression et le MPU
5	SCLK	Ligne SCL du bus I2C partagé par les capteurs de pression et le MPU
6	GPIO 4	GPIO non utilisé, relié à un connecteur libre
7	GPIO 5	GPIO non utilisé, relié à un connecteur libre
8	GND	Connecté à la masse
9	SERVO CANSAT IN	Retour analogique du servomoteur du Cansat
10	SERVO CANSAT OUT	Commande en PWM du servomoteur du Cansat
11	GPIO 8	GPIO non utilisé, relié à un connecteur libre
12	GPIO 9	GPIO non utilisé, relié à un connecteur libre
13	GND	Connecté à la masse
14	LED_FT	GPIO passant à l'état haut dans la fenêtre temporelle de l'allumage du moteur de l'étage supérieur et relié à l'une des trois entrées de la porte logique ET de la carte d'allumage



Numéro de broche	Nom sur la schématique	Description
15	LED_ATT	GPIO passant à l'état haut dans la fenêtre d'attitude autorisée pour l'allumage du moteur de l'étage supérieur et relié à l'une des trois entrées de la porte logique ET de la carte d'allumage
16	LED_SSIE	GPIO passant à l'état haut une fois la séparation effectuée relié à l'une des trois entrées de la porte logique ET de la carte d'allumage
17	LED_IHM	GPIO contrôlant la LED d'état du séquenceur située sur la carte d'allumage
18	GND	Connecté à la masse
19	SERVO PARA IN	Retour analogique du servomoteur du parachute
20	SERVO PARA OUT	Commande en PWM du servomoteur du parachute

TABLE 7 – Description des broches 1 à 20 du séquenceur de l'étage supérieur

<b>Connecteur J2</b>		
1	NC	Non connectée
2	+5V	Alimentation 5V du microcontrôleur
3	GND	Connecté à la masse
4	NC	Non connecté
5	NC	Non connecté
6	NC	Non connecté
7	INT_BMP	Signal d'interruption du capteur de pression BMP581
8	GND	Connecté à la masse
9	JACK SEQ	Broche connectée au Jack du séquenceur. A l'état haut lorsque le Jack est inséré, à l'état bas lorsqu'il est retiré.



Numéro de broche	Nom sur la schématique	Description
10	NC	Non connecté
11	NC	Non connecté
12	BUZZER	A l'état haut pour allumer le buzzer
13	GND	Connecté à la masse
14	INT_MPU	Signal d'interruption de l'IMU MPU9250
15	FSYNC_MPU	Signal de synchronisation du MPU9250
16	SSIE_2	Broche connectée à l'un des deux boutons de détection de la séparation. A l'état bas quand les deux étages sont reliés, à l'état haut quand les étages sont séparés.
17	SSIE_1	Broche connectée à l'autre bouton de détection de la séparation. A l'état bas quand les deux étages sont reliés, à l'état haut quand les étages sont séparés.
18	GND	Connecté à la masse
19	Servo Parachute Button	Connecté au bouton poussoir commandant l'ouverture ou la fermeture manuelle de la trappe parachute de l'étage supérieur. A l'état bas quand le bouton est relâché, à l'état haut quand le bouton est pressé.
20	Servo Cansat Button	Connecté au bouton poussoir commandant l'ouverture ou la fermeture manuelle de la trappe Cansat de l'étage supérieur. A l'état bas quand le bouton est relâché, à l'état haut quand le bouton est pressé.

TABLE 8 – Description des broches 21 à 40 du séquenceur de l'étage supérieur

Une erreur est à signaler sur les branchements : les broches de retour analogique des servomoteurs auraient dû être placées sur des broches ADC du microcontrôleur pour être pleinement utilisées. Ce n'est pas le cas ici, les broches utilisées sont des broches uniquement numériques, elles ne peuvent donc que détecter un changement d'état haut à état bas et inversement provenant des signaux de sortie des servomoteurs, le seuil se situant aux alentours des 2V. Cette erreur limite le retour d'information venant des servomoteurs, mais ne compromet en rien la fiabilité du dispositif, les servomoteurs pouvant tout à fait être utilisés sans cette fonction.

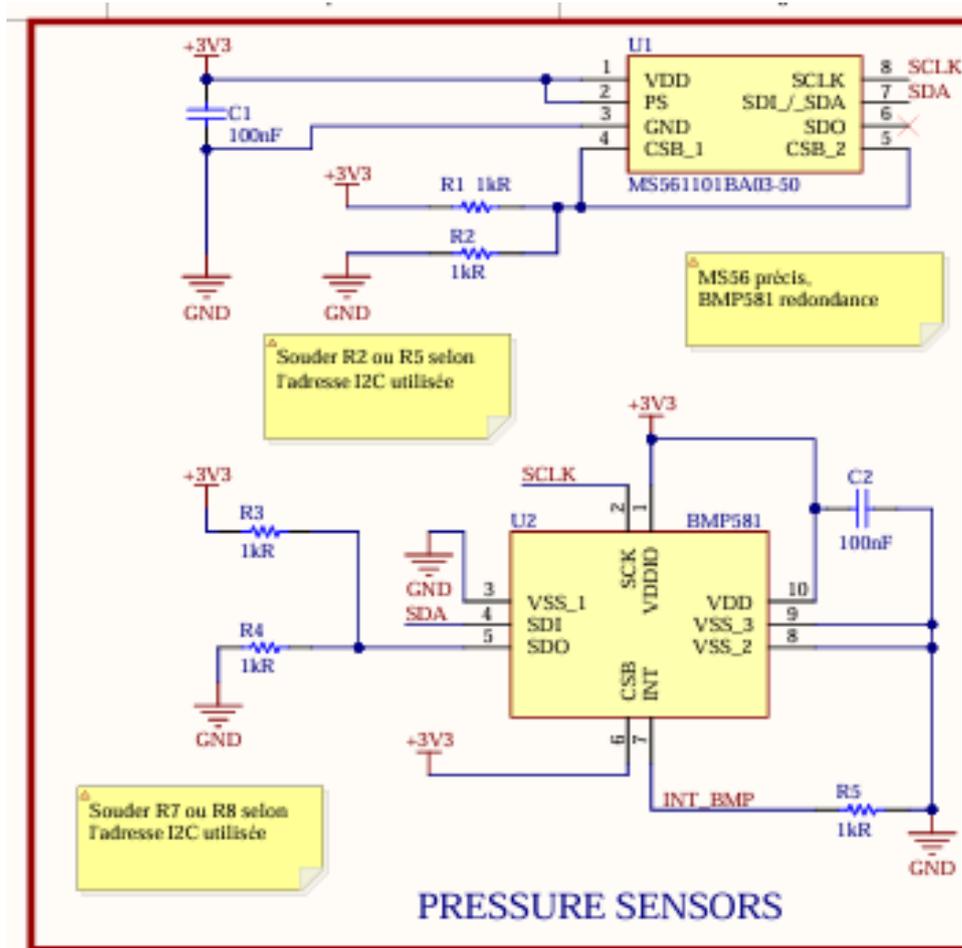


FIGURE 34 – Schématique des capteurs de pression du séquenceur de l'étage supérieur

Les branchements des deux capteurs de pression suivent les recommandations de leurs fiches techniques. Le MS56 a été choisi comme capteur principal pour sa précision, tandis que le BMP581 vient en redondance. Les deux capteurs partagent le même bus I2C, leur adresse peut être configurée en reliant leur broche d'adresse au 3V3 ou à la masse via une résistance.

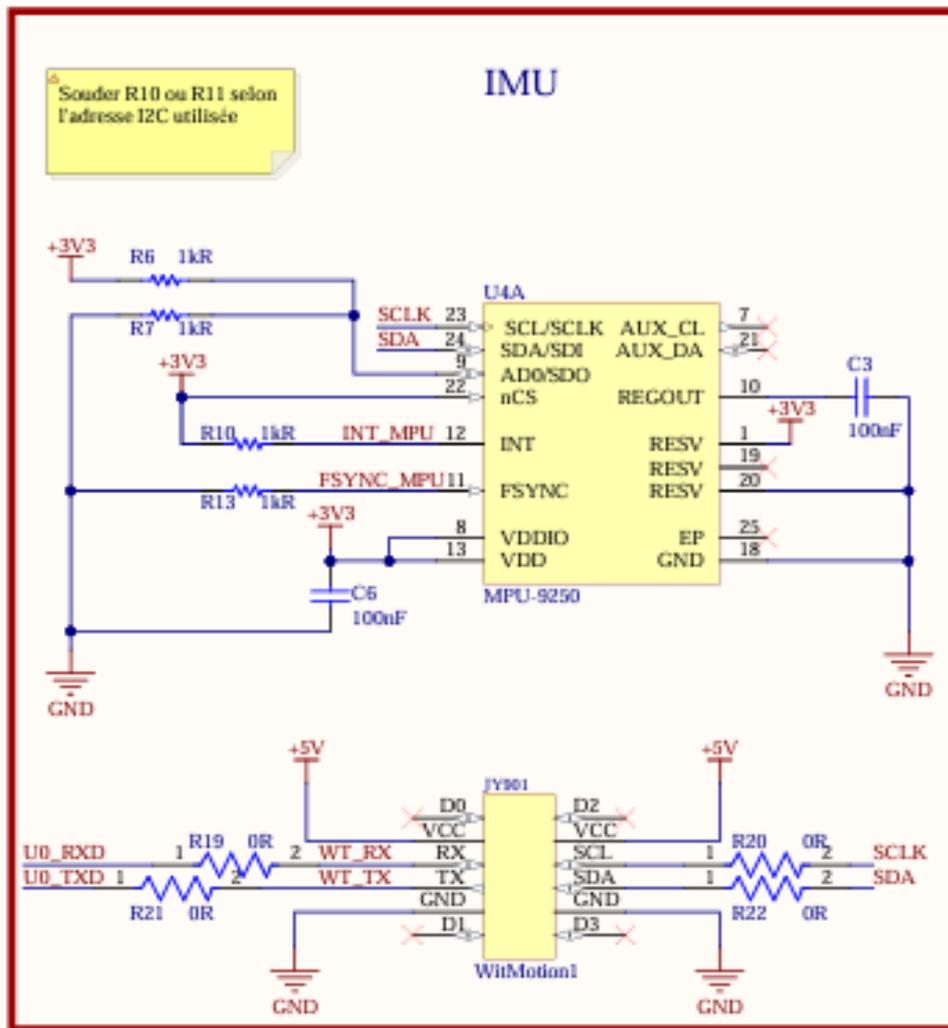


FIGURE 35 – Schématique des IMU du séquenceur de l'étage supérieur

La WitMotion peut être connectée en UART, sur le port UART 0 du microcontrôleur, ou en I2C, en fonction des résistances soudées. Hormis cela, ses branchements ne présentent aucune subtilité. Les branchements du MPU9250, prévu en redondance, suivent les recommandations de sa fiche technique.

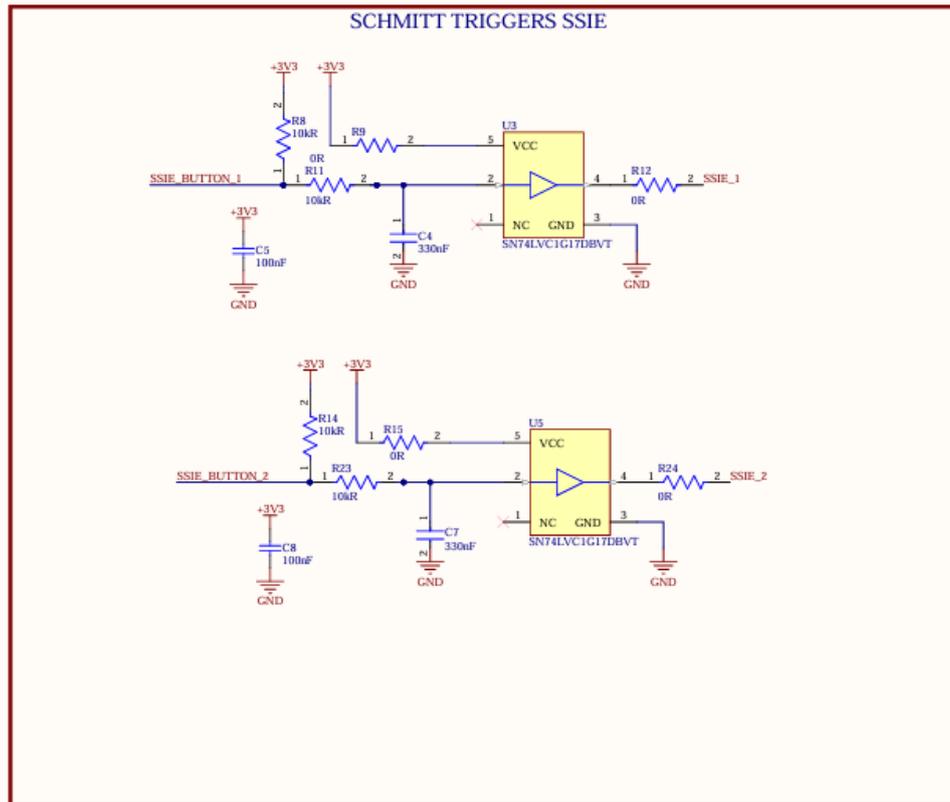


FIGURE 36 – Schématique des triggers de Schmitt du séquenceur de l'étage supérieur

Les triggers de Schmitt sont essentiels afin de garantir une transition la plus propre possible de l'état bas à l'état haut des signaux de détection de la séparation des deux étages, et ainsi éviter des erreurs de détection qui pourraient compromettre le déclenchement du système d'allumage.

Chaque trigger de Schmitt est alimenté en 3V3, ce qui définit la tension de l'état haut en sortie du trigger. Une capacité de découplage de 100nF placée proche de la broche d'alimentation du trigger sur le PCB permet de lisser la tension d'entrée.

Le signal d'entrée du trigger de Shmitt, provenant du bouton, est lissé par une capacité de 330 nF et son courant est limité par une résistance de 10 kΩ. Une résistance de tirage de 10 kΩ maintient le signal d'entrée à 3V3 lorsque la broche est laissée flottante. La sortie du trigger de Schmitt est alors aussi à 3V3.

Lorsque le bouton est appuyé, il connecte le signal d'entrée du trigger à la masse, l'entrée est donc à l'état bas et la sortie du trigger aussi. Une fois le bouton relâché, la résistance de tirage tire la ligne à 3V3 et le trigger de Schmitt garantit une transition propre du signal à sa sortie, vers le microcontrôleur.

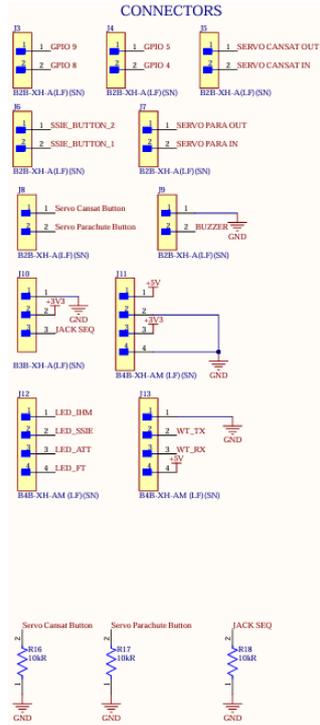


FIGURE 37 – Schématique des connecteurs du séquenceur de l'étage supérieur

Les connecteurs J3 et J4 ne sont pas utilisés et permettent de connecter des GPIO du séquenceur à des périphériques branchés à la carte au besoin.

Les connecteurs J5 et J7 accueillent les signaux d'entrée et de sortie des servomoteurs.

Le connecteur J6 accueille les deux signaux venant des deux boutons de détection de la séparation des étages. Chacun des signaux est connecté à l'entrée d'un des triggers de Schmitt.

Le connecteur J8 est relié aux deux boutons sur l'IHM permettant de commander manuellement les trappes. Les résistances de rappel R16 et R17 maintiennent ces signaux à l'état bas lorsque les boutons sont relâchés. Quand un des boutons est appuyé, le signal correspondant passe à l'état haut.

Le connecteur J9 est branché directement au buzzer. Ce branchement n'est pas optimal car il limite la tension arrivant au buzzer à 3V3, ce qui limite donc son volume sonore. L'idéal eût été de connecter la broche BUZZER du microcontrôleur à la grille d'un transistor dont la source est reliée à l'entrée du buzzer et le drain à la tension batterie. La source doit de plus être tirée à la masse avec une résistance de rappel quand le buzzer n'est pas sollicité. De cette façon, le microcontrôleur commande simplement la grille du transistor, et la tension d'alimentation du buzzer est fournie par les batteries, ce qui lui donne un volume sonore plus important.

Le connecteur J10 connecte le Jack du séquenceur. Le Jack n'est pas directement branché sur ce connecteur cependant, car le séquenceur se situe dans la coiffe de la fusée, loin de l'IHM. Le Jack est d'abord branché à un connecteur sur l'IHM, lui-même connecté à un connecteur



d'où partent les câbles 3V3, GND et JACK SEQ vers le connecteur J10 sur le séquenceur. De cette façon, le branchement du Jack est déporté au niveau de l'IHM. Quand le Jack est branché, JACK SEQ est à l'état haut, et la résistance R18 rappelle le signal JACK SEQ à la masse quand le Jack est retiré, ce qui évite ainsi les états flottants.

Le connecteur J11 est relié à la carte de puissance de l'étage supérieur et alimente le séquenceur en 3V3 et en 5V.

Les LED de la partie séquenceur de l'IHM sont connectées à J12.

Enfin, J13 sort les lignes RX et TX de la WitMotion, ainsi que l'alimentation 5V de la WitMotion et la masse, afin de connecter la WitMotion à un PC via un adaptateur USB-Série. Cela est nécessaire afin de calibrer la WitMotion avec le logiciel fourni.

### Routage

Le séquenceur est routé sur quatre couches, deux couches externes pour les signaux et pistes de puissance, et deux plans de masse internes.

Le routage du séquenceur de l'étage supérieur ne présente pas de subtilités particulières.

### 4.6.2 Carte expérience de l'étage supérieur

#### Présentation du produit

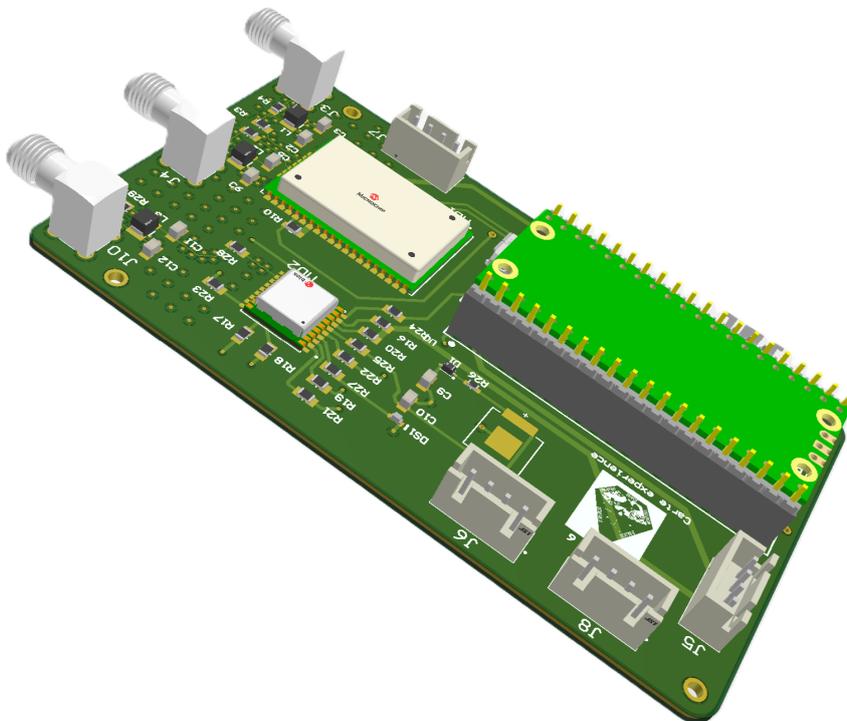


FIGURE 38 – Carte expérience de l'étage supérieur



La carte expérience de l'étage supérieur comprend deux expériences. Un récepteur GNSS doit récupérer la position de l'étage supérieur au cours du vol et surtout une fois posé, et un module de télémétrie doit envoyer en temps réel au sol les données issues du récepteur GNSS, le but étant de reconstruire la trajectoire de la fusée au cours du vol, mais surtout de connaître la position de la fusée après l'atterrissage.

Le récepteur GNSS choisi est le **MAX M10-S** de ublock. Ce récepteur GNSS a déjà volé sur fusée expérimentale et son fonctionnement est simple. Son coût est également très raisonnable pour ses bonnes performances. L'antenne GNSS choisie est l'antenne **1002857** de KYOCERA. Cette antenne présente de très bonnes qualités et de très bonnes performances y compris sur un récepteur en mouvement comme une fusée expérimentale, ce qui justifie le choix de cette antenne assez onéreuse (43€ l'unité sur Digikey).

Le module de télémétrie choisi est le module LoRa **RN2483** de Microchip. La modulation LoRa a été choisie pour sa consommation d'énergie faible au regard de sa portée (quelques kilomètres en espace libre). Le module choisi peut émettre sur la bande de fréquence allant de 863MHz à 870MHz, ce qui permet d'utiliser la bande de fréquence allant de 869MHz à 869,4MHz, qui est la bande de fréquence avec la plus grande puissance d'émission maximale autorisée au C'Space (500mW). L'antenne LoRa utilisée est l'antenne **TI.83.A111** de Taoglas. Cette antenne est compacte, performante et peut émettre sur la bande de fréquences allant de 863MHz à 873MHz, et est donc compatible avec l'émetteur utilisant la bande de fréquence de 869MHz à 869,4MHz. Il est ainsi possible d'émettre avec une puissance maximale de 500mW, ce qui maximise les chances de recevoir le signal au sol.

La carte expérience a par ailleurs été équipée des mêmes capteurs de pression que le séquenceur, ainsi que de l'IMU MPU9250, mais ces composants n'ont finalement pas été soudés pour des raisons de budget et de simplicité.

Le microcontrôleur utilisé est une **Raspberry Pi Pico**, tout comme sur le séquenceur.

La carte expérience est, comme le séquenceur, équipée d'un Jack qui permet de démarrer l'émission des données une fois les opérations pyrotechniques finies sur la fusée et que le pyrotechnicien a pu s'éloigner. Cette sécurité est importante car la puissance émise par la télémétrie est susceptible, bien que cela soit particulièrement exceptionnel, de faire détonner l'inflamateur du moteur de l'étage supérieur. Il est donc nécessaire que le pyrotechnicien ait pu s'éloigner de la fusée avant de commencer toute émission de données.

## Schématique

Les schématiques des capteurs déjà présents sur le séquenceur de l'étage supérieur ne seront pas détaillées ici, nous référons à la section sur la schématique du séquenceur. Tout comme pour le séquenceur, le microcontrôleur est inséré dans deux connecteurs.

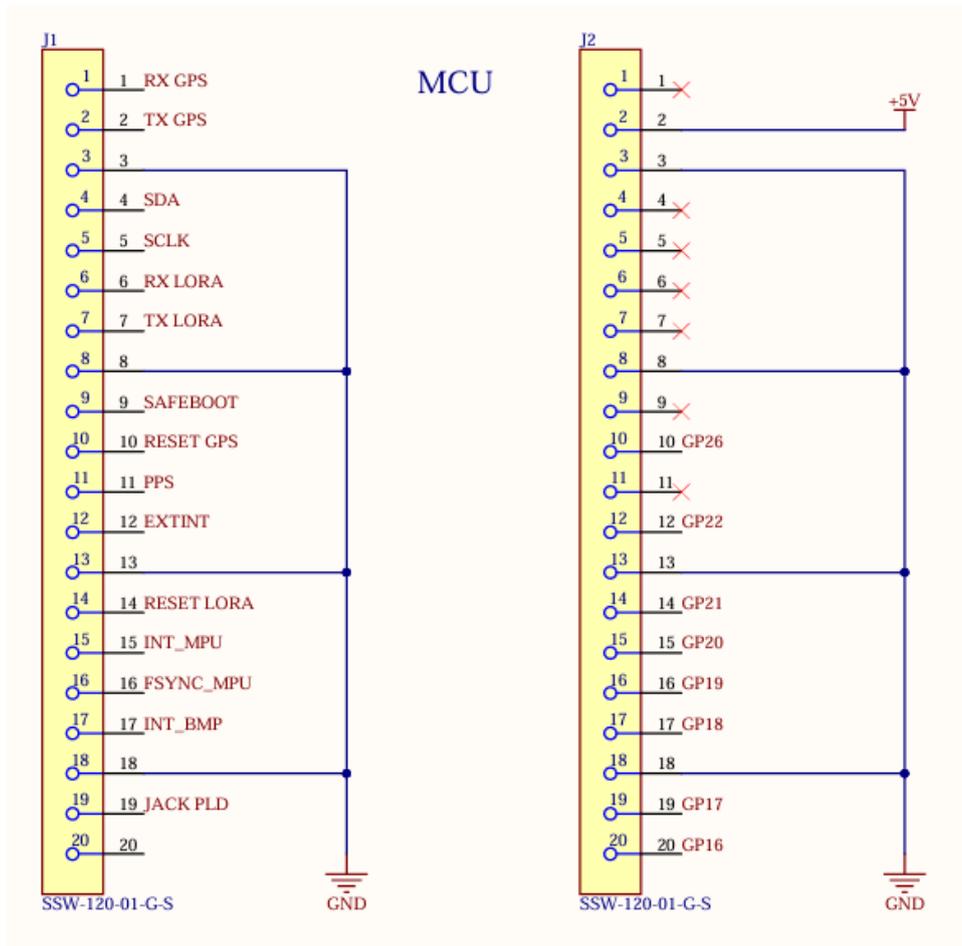


FIGURE 39 – Schématique du microcontrôleur de la carte expérience de l'étage supérieur

Les tableaux ci-dessous explicitent les fonctions des broches.

Connecteur J1		
1	RX GPS	Ligne RX de la liaison UART au GPS
2	TX GPS	Ligne TX de la liaison UART au GPS
3	GND	Connecté à la masse
4	SDA	Ligne SDA du bus I2C partagé par les capteurs de pression et le MPU



Numéro de broche	Nom sur la schématique	Description
5	SCLK	Ligne SCL du bus I2C partagé par les capteurs de pression et le MPU
6	RX LORA 4	Ligne RX de la liaison UART au LoRa
7	TX LORA	Ligne TX de la liaison UART au LoRa
8	GND	Connecté à la masse
9	SAFEBOOT	Signal de boot du GNSS
10	RESET GPS	Signal de réinitialisation du GNSS
11	PPS	Timepulse du GNSS, qui envoie un signal au microcontrôleur à chaque réception de données GNSS
12	EXTINT	Signal d'interruption venant du GNSS
13	GND	Connecté à la masse
14	RESET LORA	Signal de réinitialisation du LoRa
15	INT_MPU	Signal d'interruption de l'IMU MPU9250
16	FSYNC_MPU	Signal de synchronisation du MPU9250
17	INT_BMP	Signal d'interruption du capteur de pression BMP581
18	GND	Connecté à la masse
19	JACK PLD	Broche connectée au Jack de la carte expérience. A l'état haut lorsque le Jack est inséré, à l'état bas lorsqu'il est retiré.
20	NC	Non connecté

TABLE 9 – Description des broches 1 à 20 du microcontrôleur de la carte expérience de l'étage supérieur



<b>Connecteur J2</b>		
1	NC	Non connectée
2	+5V	Alimentation 5V du microcontrôleur
3	GND	Connecté à la masse
4	NC	Non connecté
5	NC	Non connecté
6	NC	Non connecté
7	NC	Non connecté
8	GND	Connecté à la masse
9	NC	Non connecté
10	GP26	Broche non utilisée, connectée à un connecteur libre
11	NC	Non connecté
12	GP22	Broche non utilisée, connectée à un connecteur libre
13	GND	Connecté à la masse
14	GP21	Broche non utilisée, connectée à un connecteur libre
15	GP20	Broche non utilisée, connectée à un connecteur libre
16	GP19	Broche non utilisée, connectée à un connecteur libre
17	GP18	Broche non utilisée, connectée à un connecteur libre
18	GND	Connecté à la masse
19	GP17	Broche non utilisée, connectée à un connecteur libre
20	GP16	Broche non utilisée, connectée à un connecteur libre

TABLE 10 – Description des broches 21 à 40 du microcontrôleur de la carte expérience de l'étage supérieur

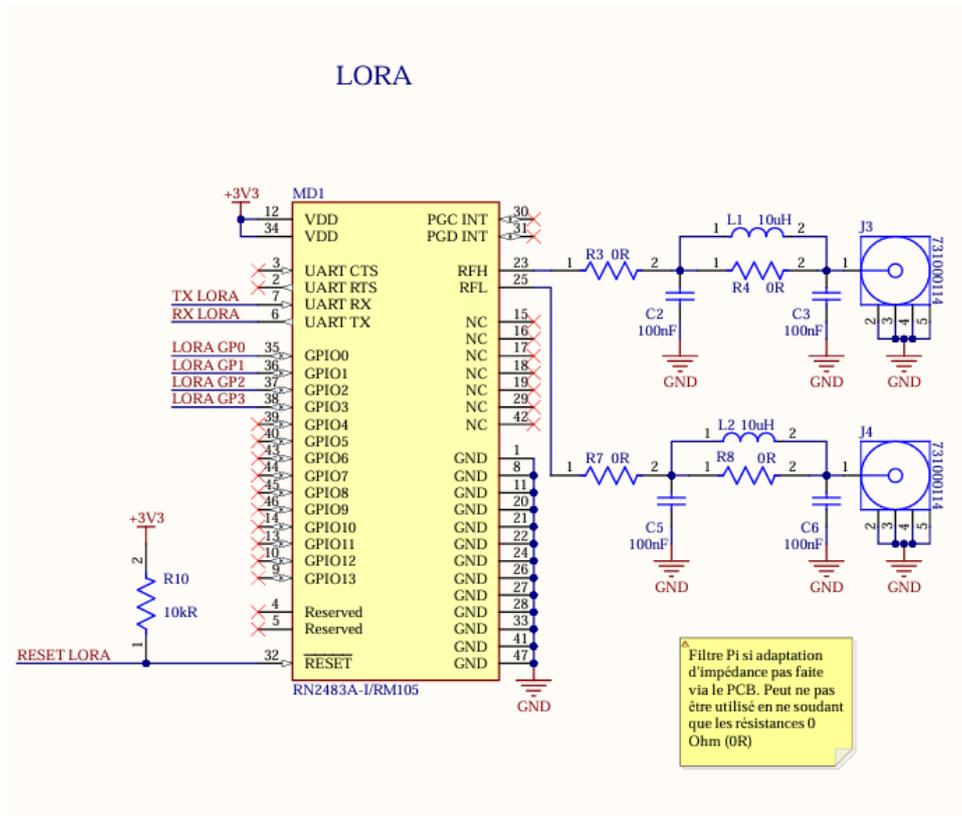


FIGURE 40 – Schématique du module LoRa

Le branchement du module LoRa est assez simple. A noter simplement le choix d'une résistance de tirage externe pour maintenir le signal de réinitialisation à l'état haut quand il n'est pas sollicité. Le module peut être connecté à deux antennes, une pour la bande de fréquence autour de 868MHz (autorisée en France), l'autre pour la bande de fréquence autour de 915MHz. Les antennes sont reliées directement au module via les résistances de  $0\Omega$  dans le cas où la piste sur le PCB est bien adaptée à  $50\Omega$ , ce qui est nécessaire pour transmettre proprement les signaux radiofréquence et éviter les réflexions parasites dans la ligne à cause de désadaptations d'impédance. Si la piste n'est pas adaptée comme il faut, le filtre Pi peut être soudé à la place des résistances  $0\Omega$  avec des valeurs d'inductance et de capacité choisies pour assurer l'adaptation d'impédance entre l'entrée du filtre et la sortie. Quatre GPIO du module LoRa sortent directement sur un connecteur non utilisé pour permettre d'ajouter des fonctionnalités au module si besoin.

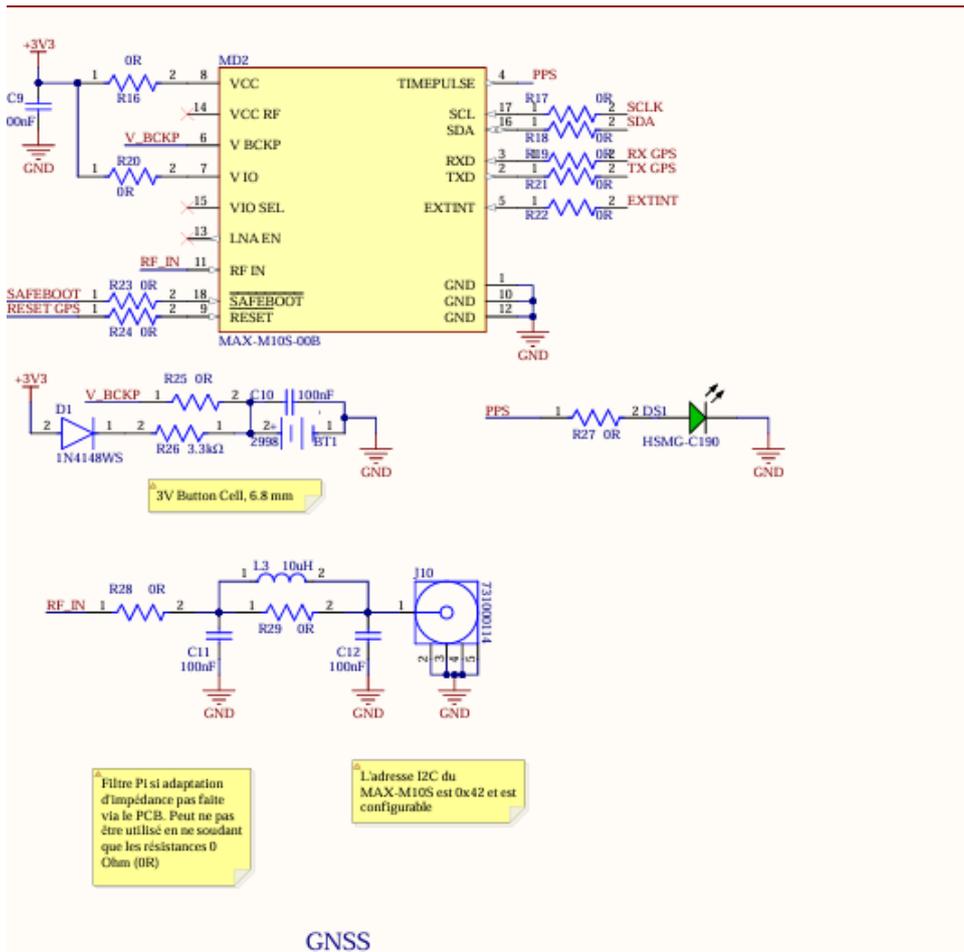


FIGURE 41 – Schématique du module GNSS

Comme pour le module LoRa, l'antenne du GNSS peut être reliée directement ou via un filtre Pi. Une LED reliée au signal TIMEPULSE clignote à chaque réception de données GNSS. Une pile bouton peut être utilisée comme alimentation de secours du module GNSS en mode veille. Le module peut communiquer avec le microcontrôleur en UART ou en SPI, selon les résistances de 0Ω soudées. Les broches de boot, de réinitialisation et d'interruption sont connectées au microcontrôleur via des 0Ω, pour permettre une reprise au fil en cas d'erreur.

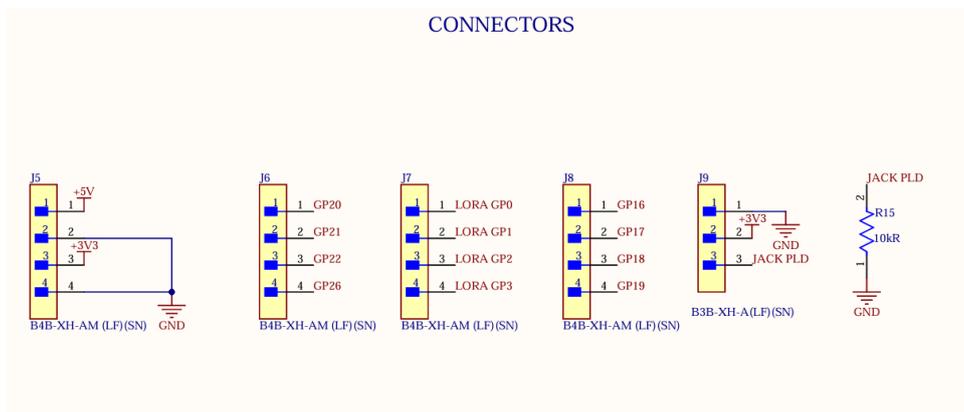


FIGURE 42 – Schématique des connecteurs de la carte expérience de l'étage supérieur



Le connecteur J5 connecte les pistes de puissance à 3V3 et 5V issues de la partie expérience de la carte de puissance de l'étage supérieur à la carte expérience. Les connecteurs J6, J7 et J8 sont des connecteurs libres reliés à des GPIO non utilisés du module LoRa et du microcontrôleur. Enfin, le connecteur J9 est connecté au Jack de la carte expérience de la même façon que le Jack du séquenceur est relié au séquenceur en étant déporté à proximité de l'IHM.

### Routage

La carte expérience est routée sur quatre couches, deux couches externes pour les signaux et pistes de puissance, et deux plans de masse internes.

Le routage de la carte expérience nécessite d'adapter à  $50\Omega$  les pistes transportant les signaux radiofréquence vers les antennes, ce qui se fait en adaptant la largeur des pistes pour que leur impédance soit de  $50\Omega$ . La largeur des pistes à utiliser étant donné le stackup de la carte a directement été calculée sur Altium.

De plus, les lignes transportant les signaux radiofréquences doivent être isolées des perturbations extérieures. Cela se fait par du via stitching et du via shielding.

Le via stitching consiste à disposer des via de masse de part et d'autre de la piste transportant le signal, tout le long du parcours de la piste. La distance entre les via doit être inférieure à un vingtième de la longueur d'onde. Dans le cas de la piste transportant le signal GNSS à 1,56GHz, les via doivent donc être espacés de 5,3mm au maximum. Quant à la piste transportant le signal LoRa à la fréquence de 868MHz environ, l'espace entre les via est au maximum de 9,5mm.

Le via shielding quant à lui vise à améliorer la continuité entre les plans de masse en maillant la carte de via de masse uniformément répartis. Des vias ont ainsi été répartis sur toute la partie de la carte avec les pistes radiofréquence.

A noter une erreur dans le placement des connecteurs du microcontrôleur de cette carte : les deux connecteurs ont été inversés et sont un peu trop espacés, de sorte qu'il a fallu souder les broches du microcontrôleur non pas dans les trous prévus à cet effet, mais dans les demi-trous sur les bords du microcontrôleur, et dans la direction opposée à celle habituelle, ce qui fait que le microcontrôleur est retourné sur la carte finale.

### 4.6.3 Carte de puissance de l'étage supérieur

#### Présentation du produit

La carte de puissance de l'étage supérieur est en charge de fournir les tensions régulées (3V3, 5V, 6V) aux cartes de l'étage supérieur à partir des batteries. Elle se compose de deux parties, le côté séquenceur et le côté expérience. Les deux côtés n'ont aucune liaison électrique, pas même la masse, afin de garantir l'isolation entre le séquenceur et les autres cartes.

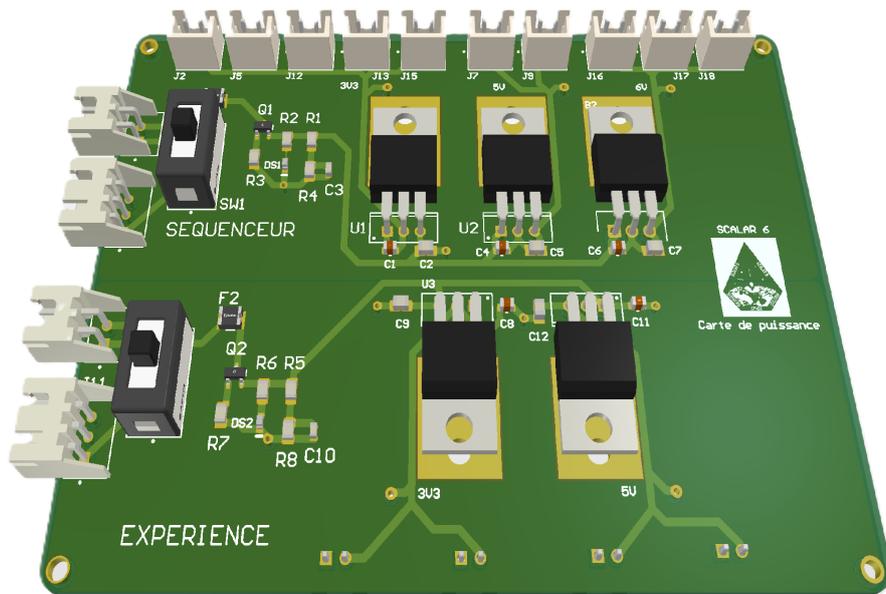


FIGURE 43 – Carte de puissance de l'étage supérieur

La partie séquenceur est alimentée par une batterie **Keppower 3S1P 18650 2600mAh 10,8V** avec BMS intégré, compacte, avec une capacité suffisante pour alimenter les systèmes du séquenceur pendant toute la durée des opérations en rampe et en vol, et fournissant une tension suffisante pour alimenter les régulateurs 6V des servomoteurs.

La partie séquenceur comporte en effet trois régulateurs linéaires de tension, qui permettent d'abaisser la tension de sortie de la batterie aux niveaux de tension désirés afin d'alimenter les systèmes du séquenceur : un régulateur 3V3 **LD1117V33**, un régulateur 5V **L7805CV** et un régulateur 6V **L7806CV**.

Le régulateur 3V3 alimente tous les dispositifs actifs de la fusée, hormis les microcontrôleurs et la WitMotion (alimentés en 5V), les servomoteurs (alimentés en 6V) et l'inflammeur de la carte d'allumage (alimenté par sa propre batterie). Le régulateur 6V a été choisi en particulier pour son courant maximal de 1,5A, supérieur au courant de décrochage des servomoteurs, ce qui signifie que ce régulateur peut soutenir le maximum de courant qui peut être demandé par les servomoteurs. Des régulateurs linéaires ont été privilégiés à des régulateurs à découpage car, bien que leur rendement soit inférieur à cause des pertes thermiques, ils n'émettent pas d'ondes électromagnétiques, ce qui permet de ne pas perturber les signaux radiofréquences de la carte expérience.

Un circuit de protection contre les surtensions et surintensités situé en amont des régulateurs permet de protéger la carte de puissance en cas de dysfonctionnement de la batterie, tout comme la batterie est elle même protégée des dysfonctionnements venant du circuit par son BMS.

La carte peut être allumée ou éteinte par un interrupteur à glissière **25139NAH** situé sur l'IHM de l'étage supérieur et connecté par des câbles à la carte de puissance. La partie expérience est analogue à la partie séquenceur, le régulateur 6V en moins, et est alimentée par une batterie 3S. La partie séquenceur est alimentée par une carte batterie 2S 2200mAh avec BMS intégré. Cette carte batterie est présentée dans la sous-section **Cartes batteries**.

### Schématique

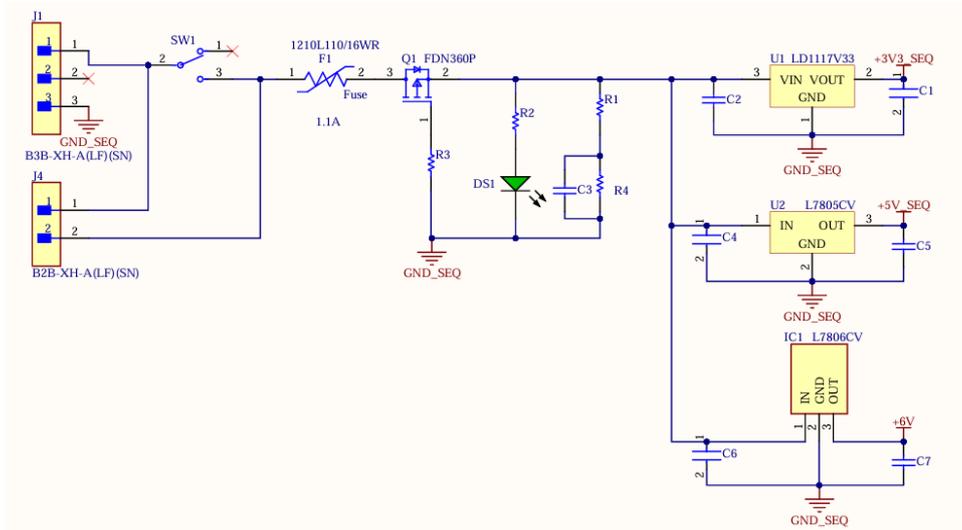


FIGURE 44 – Schématique de la partie séquenceur de la carte de puissance de l'étage supérieur

Le connecteur de la batterie et de l'interrupteur sont situés en amont du circuit de protection. Le circuit de protection comprend un fusible réarmable pour prévenir les pics de courant trop importants. Le transistor prévient des retours de courant. La LED s'allume lorsque la carte est active. Le filtre RC lisse la tension arrivant aux régulateurs, situés en aval de la protection du circuit. Les capacités de découplage sur les régulateurs ont été choisies conformément aux fiches techniques de ces composants.

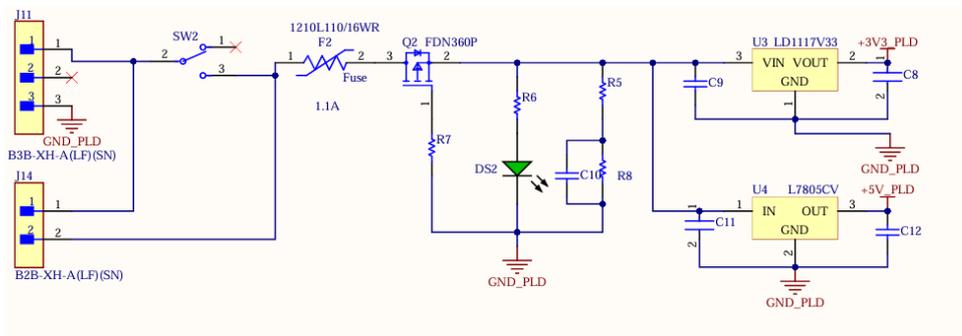


FIGURE 45 – Schématique de la partie expérience de la carte de puissance de l'étage supérieur

La schématique de la partie expérience est analogue à la partie séquenceur.

### Routage

La carte de puissance est routée sur deux couches, une pour les pistes de puissance, l'autre pour les plans de masse. Comme mentionné dans la présentation de cette carte, la carte possède deux plans de masse distincts, un pour la partie séquenceur, l'autre pour la partie expérience.

Les pistes de la carte de puissance sont larges pour réduire au mieux leur résistance au courant, comme cela est préconisé pour des circuits de puissance.

Les régulateurs ont été choisis en boîtier TO-220 pour plaquer leur tab contre la carte, directement contre le plan de masse, et ainsi dissiper la chaleur produite par les régulateurs dans le plan de masse. Cependant, si le tab des régulateurs 5V et 6V est bien connecté à la masse des régulateurs, le tab des régulateurs 3V3 choisis est connecté à sa tension de sortie. Plaquer le tab contre le plan de masse dégagé dessous provoque donc un court circuit. Pour remédier à ce problème, du scotch électrique a été placé entre le tab et le plan de masse, pour isoler électriquement ces deux parties tout en permettant de plaquer le tabe contre la carte afin de dissiper la chaleur du régulateur. La vis utilisée pour maintenir le régulateur est en plastique pour ne pas connecter électriquement le tab et la masse.

#### 4.6.4 IHM de l'étage supérieur

##### Présentation du produit

L'IHM de l'étage supérieur permet de mettre en marche les cartes électronique de cet étage lors des opérations pré-lancement. Elle est scindée en deux parties, séquenceur et expérience, qui ne partagent aucun lien électrique, comme c'est le cas sur la carte de puissance.



FIGURE 46 – IHM de l'étage supérieur

Chaque partie de l'IHM dispose d'un interrupteur à glissière **25139NAH** afin d'allumer ou d'éteindre la carte correspondante, de LED pour indiquer l'état de chaque carte ainsi que le bon fonctionnement des lignes de puissance issues de la carte de puissance.



La partie séquenceur de l'IHM dispose de plus de deux boutons poussoirs reliés au séquenceur, qui permettent d'activer manuellement l'ouverture et la fermeture des trappes du parachute et du CanSat lors des opérations pré-lancement.

### Schématique

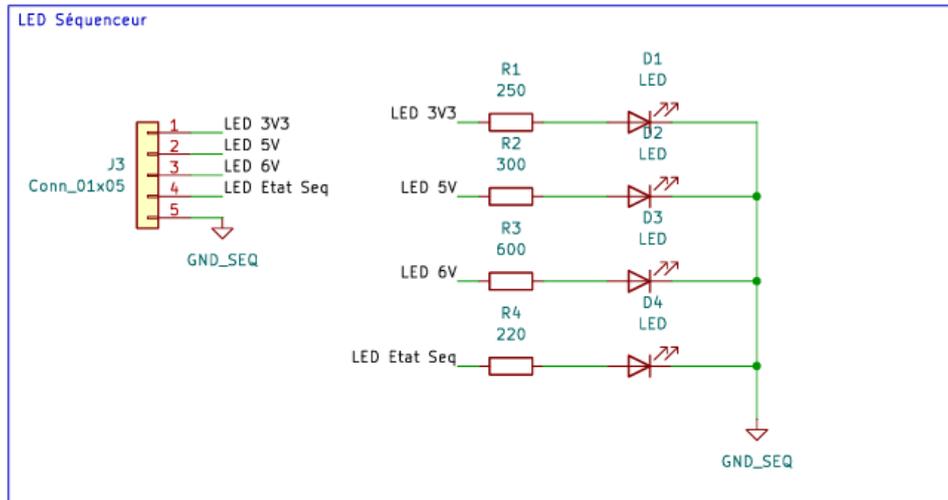


FIGURE 47 – Schématique des LED séquenceur de l'IHM de l'étage supérieur

Sur la partie séquenceur, la LED Etat est connectée à l'une des broches du microcontrôleur du séquenceur et permet de signaler l'état du microcontrôleur (phase de vol, fonctionnement nominal ou erreur). Les autres LED sont directement reliées aux sorties de puissance de la partie séquenceur de la carte de puissance et sont allumées lorsque la batterie de la partie séquenceur de la carte de puissance est branchée à la carte de puissance et l'interrupteur de la partie séquenceur de l'IHM en position allumée. Les LED de la partie expérience sont branchées de façon analogue.

Chaque LED est connectée en série à une résistance, dont la valeur est calculée pour obtenir environ un courant de 20 mA à travers la LED.

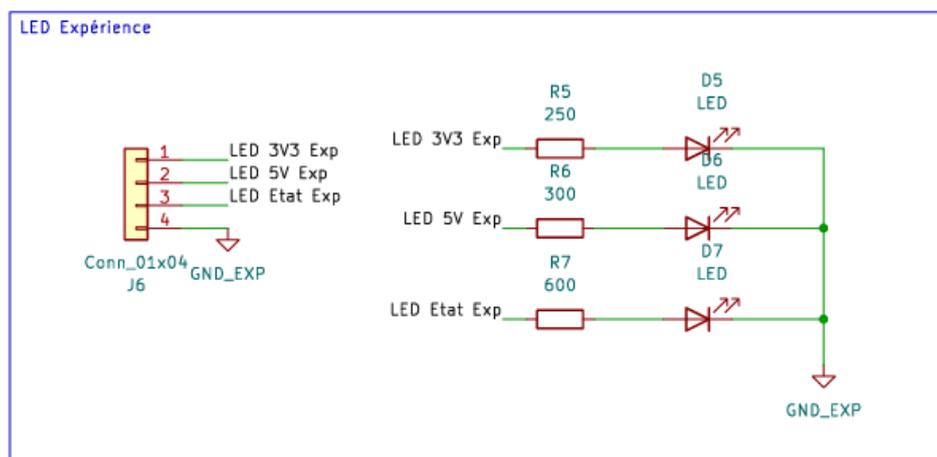


FIGURE 48 – Schématique des LED expérience de l'IHM de l'étage supérieur

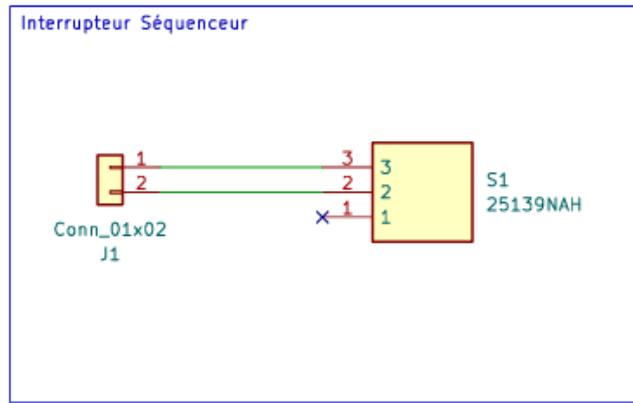


FIGURE 49 – Schématique de l'interrupteur séquenceur de l'IHM de l'étage supérieur

Les interrupteurs à glissière choisis pour allumer et éteindre les cartes sont des interrupteurs SPDT, i.e à 3 positions et pouvant ouvrir et fermer deux circuits différents. Lorsque l'interrupteur est sur la position du milieu, les deux circuits sont ouverts. Lorsque l'interrupteur est sur la position 1, la broche du côté 1 et la broche du milieu sont reliées. Lorsque l'interrupteur est sur la position 2, la broche du côté 2 et la broche du milieu sont reliées. Sur l'IHM seul un des côtés est utilisé, l'autre côté est laissé déconnecté. Deux des trois broches sont ainsi reliées à un connecteur d'où partent deux câbles connectés de l'autre côté à la partie séquenceur de la carte de puissance, ce qui permet de fermer ou d'ouvrir le circuit de la partie séquenceur de la carte de puissance. L'interrupteur de la partie expérience fonctionne de façon analogue.

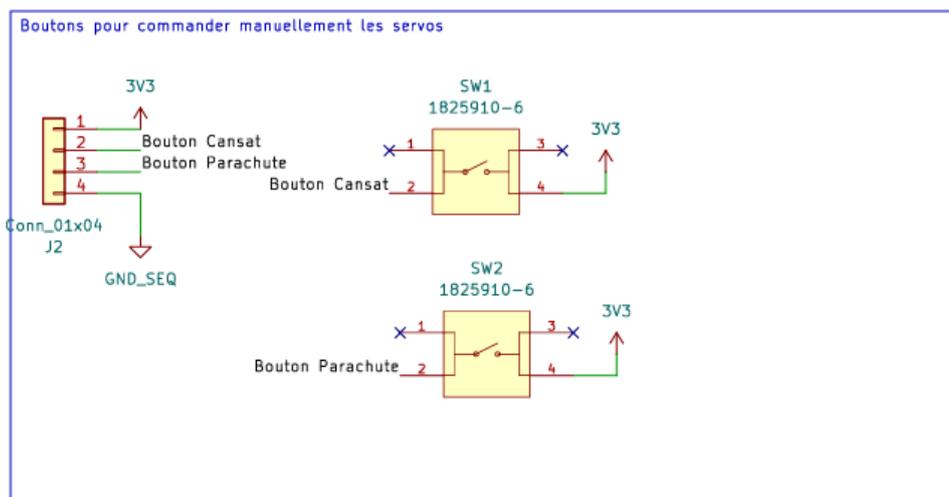


FIGURE 50 – Schématique des boutons de l'IHM de l'étage supérieur

Les deux boutons utilisés pour commander manuellement les trappes sont d'une part reliés à la sortie 3V3 de la partie séquenceur de la carte de puissance, d'autre part chacun à une broche du microcontrôleur du séquenceur, par des câbles. Quand les interrupteurs sont ouverts, les broches correspondantes du microcontrôleurs sont à la masse. Quand les interrupteurs sont fermés, les broches sont tirées à 3V3.

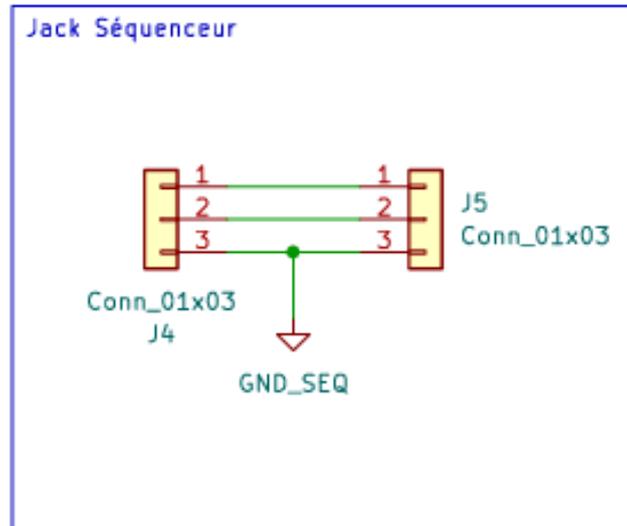


FIGURE 51 – Schématique du Jack de la partie séquenceur de l’IHM de l’étage supérieur

Le Jack du séquenceur n’est pas connecté directement au séquenceur, situé dans la coiffe. Il doit être placé proche de l’IHM et être accessible lors des opérations au sol. C’est pourquoi il est connecté à l’IHM, qui sert de relai. Le connecteur du Jack sur l’IHM est connecté à un autre connecteur, qui lui accueille les câbles qui vont vers le connecteur situé sur le séquenceur. D’où les deux connecteurs directement reliés entre eux. Le Jack de la carte expérience est connecté de façon analogue.

### Routage

L’IHM de l’étage supérieur est routée sur deux couches, l’une pour les signaux et les pistes de puissance, l’autre pour les plans de masse. Comme mentionné dans la présentation de la partie, la carte possède deux plans de masse distincts, pour isoler la partie séquenceur de la partie expérience.

Le routage de l’IHM de l’étage supérieur ne présente aucune autre subtilité.

#### 4.6.5 Carte d’allumage de l’étage supérieur

### Présentation du produit

La carte d’allumage permet l’allumage de l’inflamateur du moteur du second étage de la fusée, de manière fiable et sécurisée. Son fonctionnement est régi par les trois barrières de sécurité imposées par le cahier des charges, résumées dans le schéma ci-dessous.



FIGURE 52 – Carte d’allumage

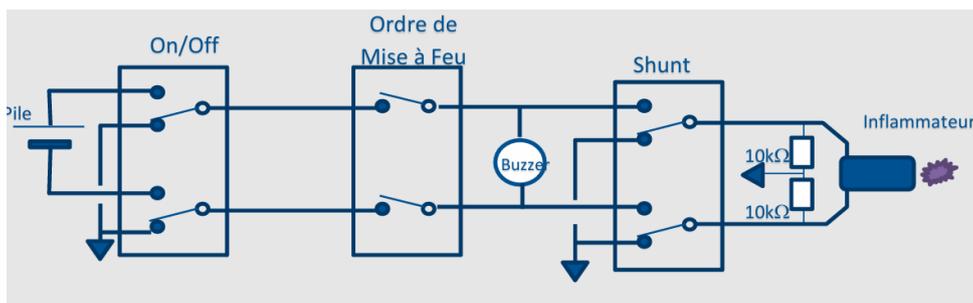


FIGURE 53 – Barrières de sécurité de la carte d’allumage

La sécurité On/off et le Shunt sont des sécurités mécaniques désactivées par le pyrotechnicien lors des opérations en rampe. L’ordre de mise à feu est envoyé par le séquenceur de l’étage supérieur. Tant que ces trois barrières de sécurité ne sont pas toutes désactivées, le circuit n’est pas fermé et la batterie n’est pas reliée à l’inflamateur.

La sécurité On/off est assurée par un interrupteur à clé **SRL KO130OA126**, monté en parallèle sur la ligne d’alimentation. Il permet une coupure physique de l’alimentation. En position verrou OFF, les broches de la batterie sont flottantes et les sorties du verrou connectées à la masse (GND). En position verrou ON, les broches de la batterie sont reliées aux sorties du verrou.

La sécurité shunt est assurée par un connecteur jack femelle trois positions **ACJS-MH**. Lorsque la partie mâle du Jack est insérée, le circuit de mise à feu est ouvert, empêchant toute activation. Les broches de l’inflamateur sont connectées à la masse du circuit via la tige du connecteur mâle. A ce titre, un Jack mâle trois positions classique ne convient pas pour être inséré dans le connecteur femelle, car il laisserait flottantes les broches de l’inflamateur. Ce point est détaillé dans la discussion ci-après sur la schématique. Une fois la tige retirée, les



contacts internes entre la sortie de la sécurité contrôlée par le séquenceur et l'inflamateur se referment.

Enfin, la sécurité contrôlée par le séquenceur fonctionne à partir de transistors rendus passant quand les conditions pour allumer le moteur sont réunies (voir les exigences portant sur la carte d'allumage dans le document **REF2**). Ce circuit est également détaillé dans la discussion sur la schématique qui suit.

La ligne d'allumage dispose de sa propre batterie afin d'éviter toute interaction énergétique non maîtrisée avec le reste de la fusée. La ligne d'alimentation suit un chemin de validation via interrupteur et sécurités en cascade avant d'atteindre l'inflamateur.

Le système nécessite une impulsion de 4 A pendant 30 ms à travers un inflamateur de  $1 \Omega$ . La tension minimale à fournir est donnée par la loi d'Ohm :

$$U = R \cdot I = 1 \Omega \cdot 4 \text{ A} = 4 \text{ V}$$

Il faut donc une batterie capable de délivrer au moins 4 V à 4 A, même brièvement. De plus, il faut que la tension  $U$  délivrée par la batterie soit telle que  $-U/2 \leq -5\text{V}$  et  $+U/2 \geq +5\text{V}$ , afin que les transistors soient suffisamment passants pour permettre le passage des 4A. Cela est expliqué plus en détails dans la section sur la schématique de la carte d'allumage qui suit.

Le choix s'est ainsi porté sur deux batteries **Keppower 2S1P 900mAh 7.2V - 7.4V** mises en série par un connecteur JST SM à 4 broches. Cela répond aux exigences détaillées ci-dessus tout en étant plus compact qu'un pack batterie 4S. Les caractéristiques principales d'un modèle de batterie 2S choisi sont résumées ci-dessous.

Caractéristique	Valeur
Tension nominale	7.4 V
Tension max	8.2 V
Tension min (cut-off)	5.5 V
Capacité	900 mAh
Courant de décharge max	5 A (via BMS)
Poids	50 g
Dimensions	73 mm × 18.7 mm

TABLE 11 – Caractéristiques de la batterie Keppower 2S1P 900mAh 7.2V - 7.4V

## Schématique

Pour des raisons d'intégration à la fusée et afin de limiter la taille de la carte d'allumage, l'interrupteur à clé et le Jack de la carte d'allumage sont placés chacun sur un petit PCB séparé. Ces PCB sont qualifiés de breakouts de la carte d'allumage dans la suite et dans les documents de référence. Sur la carte d'allumage même se trouvent donc des connecteurs permettant de



relier ces breakouts à la carte d'allumage.

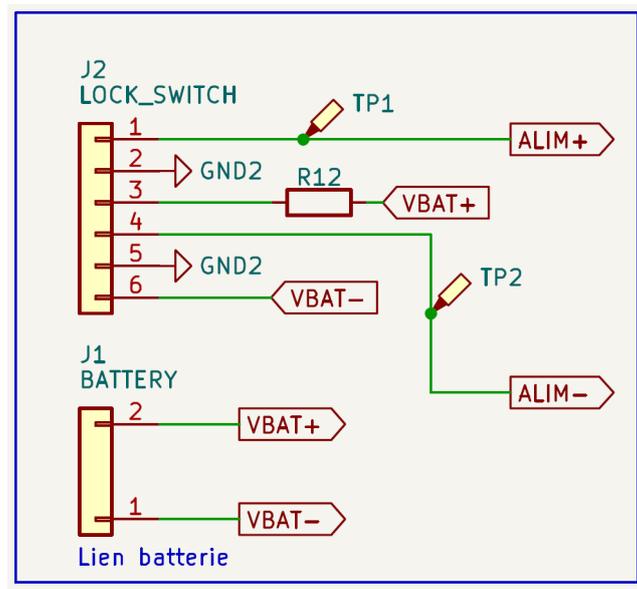


FIGURE 54 – Schématique du connecteur de l'alimentation et de la clé de la carte d'allumage

La batterie de la ligne d'allumage est branchée au connecteur J1, ses deux bornes sont +VBATT et -VBATT sur la schématique. Le verrou sur sa breakout est relié au connecteur J2 de la carte d'allumage. Lorsque le verrou est en position ON, VBAT+ est relié à ALIM+, et VBAT- est relié à ALIM-. Dans le cas contraire, ALIM+ et ALIM- sont à la masse et VBAT+, VBAT- sont ouverts. La schématique de l'interrupteur à clé, sur sa carte de breakout, est donnée ci-dessous.

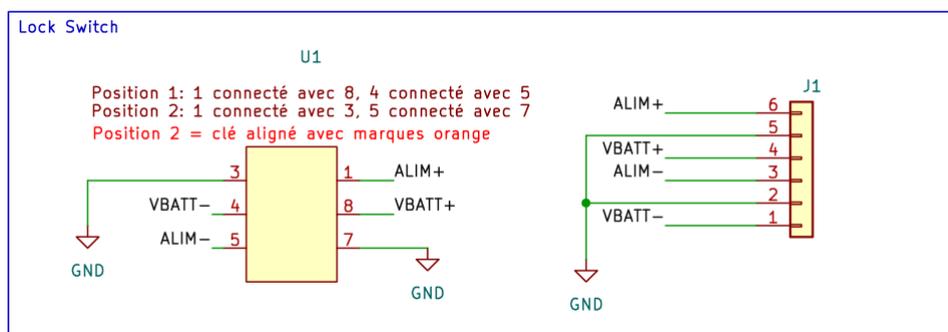


FIGURE 55 – Schématique de la breakout de l'interrupteur à clé

La sécurité Shunt est un Jack femelle trois positions. Ce type de connecteur comporte six broches communément nommées T, R, S, TN, RN et SN. Lorsqu'aucune tige n'est insérée dans le connecteur femelle, la broche T est reliée à TN, R à RN, et S à SN. Lorsque la tige en métal est insérée, elle relie T, R et S entre eux, et ouvre les connexions entre T et TN, R et RN, et S et SN. La broche S étant reliée à la masse sur la breakout, la tige relie ainsi T et R à la masse lorsqu'elle est insérée.

Il est important de noter que ce n'est pas le fonctionnement classique d'un Jack TRS. Un connecteur Jack mâle standard, lorsqu'il est inséré, ouvre les connexions entre T et TN, R et RN, et S et SN, mais ne relie pas T et R à la masse. Un Jack modifié dans lequel T et R sont reliés à S, ou une simple tige métallique est utilisée pour la sécurité shunt.

Les correspondances entre les lignes de la carte d'allumage et les broches standard d'un connecteur Jack sont explicitées sur la schématique de la breakout du shunt de la carte d'allumage.

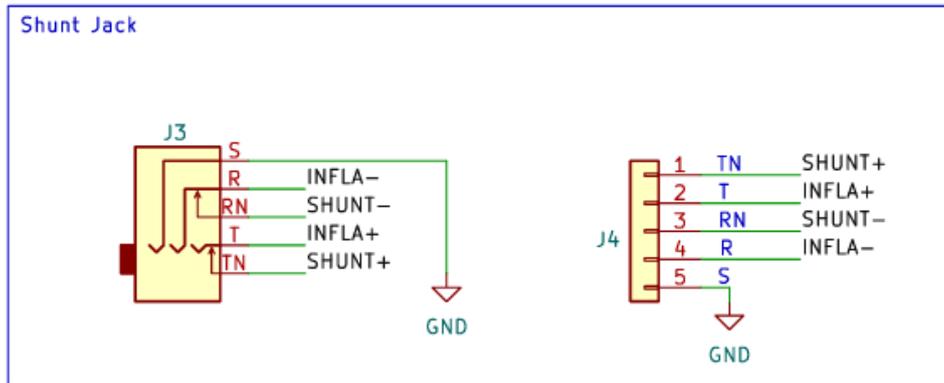


FIGURE 56 – Schématique de la breakout du Jack shunt de la carte d'allumage

Ainsi, SHUNT+ et INFLA+ d'une part sont connectées quand le Jack est retiré, ainsi que SHUNT- et INFLA- d'autre part. Quand le Jack est retiré, SHUNT+ et SHUNT- sont ouverts et les bornes de l'inflamateur sont directement reliées à la masse. Cette breakout est reliée à la carte d'allumage et à l'inflamateur par le connecteur J4 comme suit.

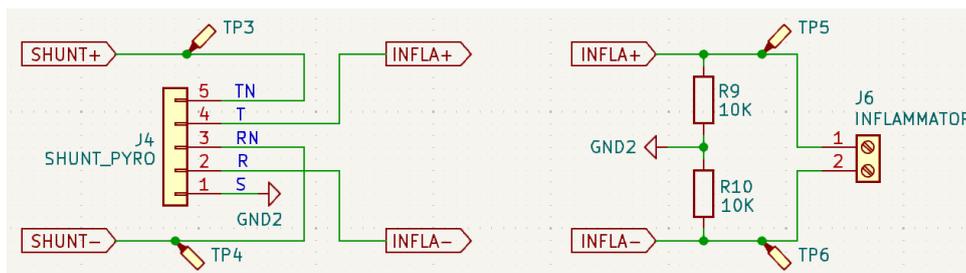


FIGURE 57 – Schématique du connecteur du Jack shunt de la carte d'allumage

Les résistances de rappel R9 et R10 garantissent que les bornes de l'inflamateur ne soient pas flottantes et restent à la masse lorsque les deux sécurités mécaniques sont passantes et qu'il ne reste que l'ordre à envoyer du séquenceur pour faire détoner l'inflamateur.

Reste enfin la sécurité pilotée par le séquenceur. Celle-ci est construite autour de trois impératifs :

- La ligne d'allumage doit être isolée de tout autre circuit électrique. Les signaux provenant du séquenceur doivent donc être isolés de la ligne d'allumage par un optocoupleur assurant



un découplage galvanique entre la logique de commande et la partie puissance, protégeant ainsi l'électronique et isolant les masses.

- La commande de mise à feu est activée uniquement si les trois conditions du séquenceur sont réunies (fenêtre, attitude, séparation). Il a été choisi d'effectuer la vérification de la validité de ces trois conditions simultanément électroniquement avec une porte logique ET plutôt que logiciellement. La sortie de la port ET n'est active que si les trois conditions pour l'allumage en entrée de la porte sont à l'état haut.
- La sécurité pilotée par le séquenceur étant contrôlée électriquement, et non pas mécaniquement comme les deux autres sécurités, des transistors s'imposent.

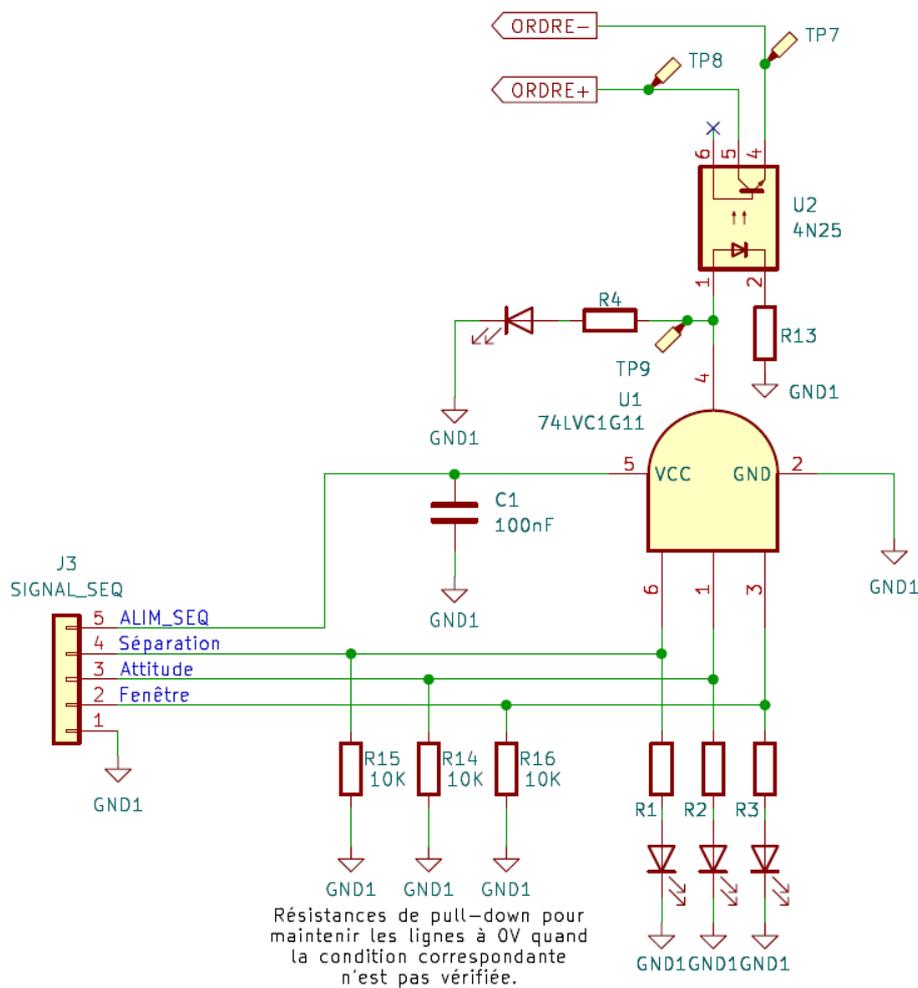


FIGURE 58 – Schématique de la partie commande de la carte d'allumage

Le connecteur J3 amène les signaux venant du séquenceur à la carte d'allumage. La porte logique ET **SN74LVC1G11**, étant un composant actif, il est nécessaire de l'alimenter par une tension 3V3. Les lignes Attitude, Séparation et Fenêtre sont chacune reliées au GPIO correspondant sur le séquenceur. Les résistances de rappel tirent ces lignes à la masse lorsque le séquenceur ne les sollicite pas. Lorsqu'une de ces trois conditions est vérifiée, la ligne correspondante est tirée à l'état haut par le séquenceur. Cela est signalé par l'allumage d'une LED,



reliée à la ligne correspondante via une résistance de  $100\Omega$  qui limite le courant circulant dans la LED.

Lorsque les trois lignes sont à l'état haut simultanément, la sortie de la porte logique passe elle aussi à l'état haut. Cela vient exciter la LED dans l'optocoupleur **4N25** et rend donc passant le transistor de l'optocoupleur. Les deux grilles des transistors de la carte d'allumage, **ORDRE+** et **ORDRE-**, sont alors reliées, ce qui rend les transistors passants.

La résistance **R13** de  $100\Omega$  limite le courant passant à travers la LED de l'optocoupleur. La LED en série avec la résistance **R4** de  $\Omega$  s'allume lorsque la sortie de la porte logique est à l'état haut, ce qui, couplé aux LED des lignes venant du séquenceur, permet de s'assurer du bon fonctionnement de la porte logique.

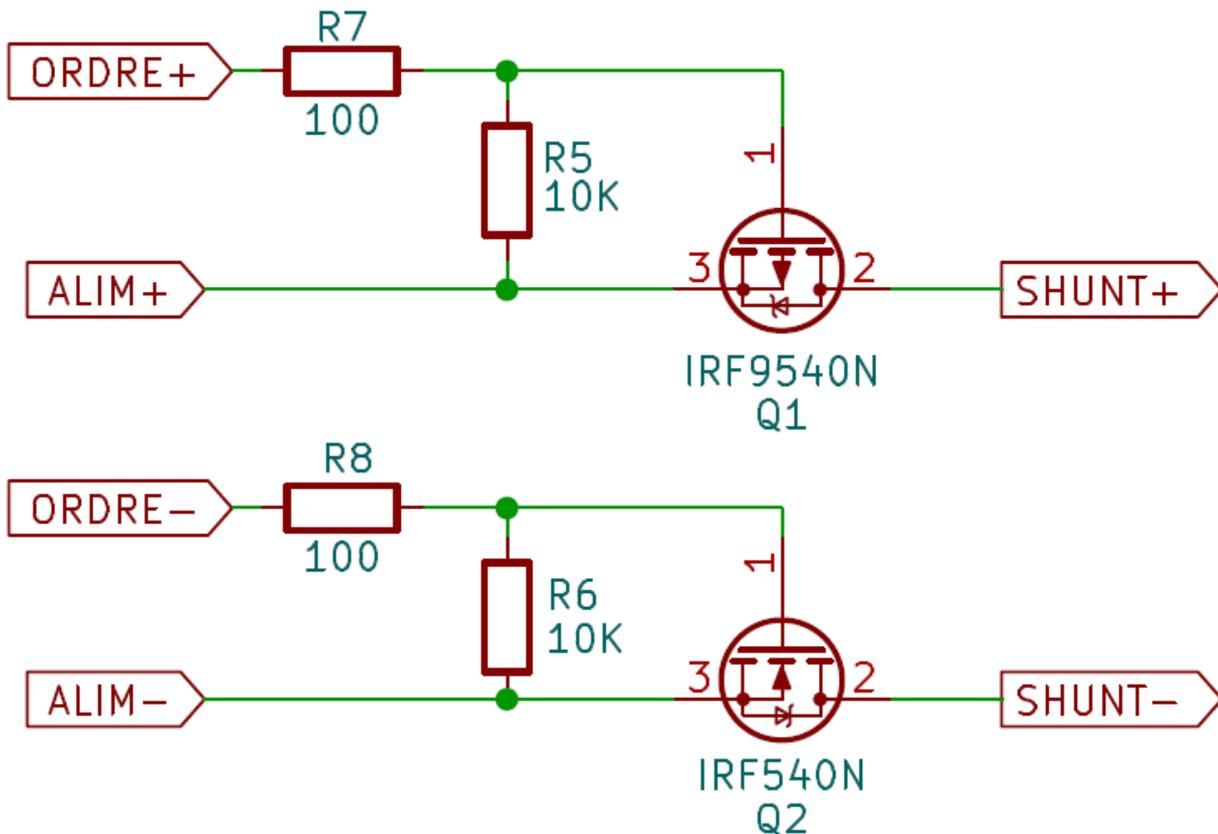
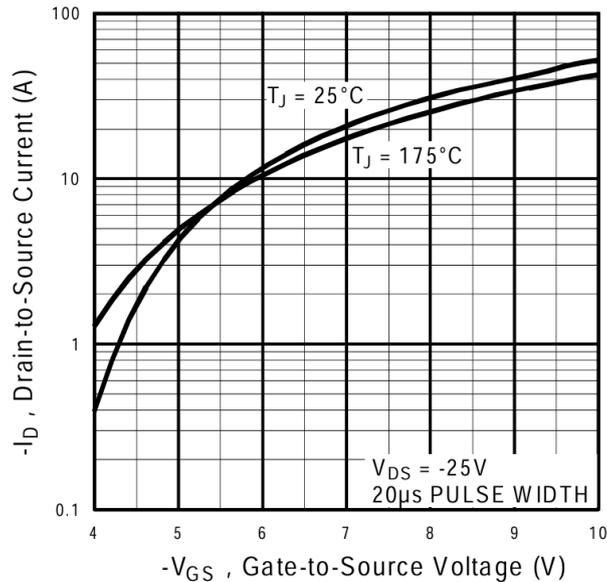


FIGURE 59 – Schématique des transistors de la carte d'allumage

Le transistor de puissance **IRF9540N** est un P-MOS, dont la tension de seuil vaut au moins  $-4V$ . Cependant, une tension grille-source de  $-4V$  appliquée à ce transistor ne suffit pas à le rendre complètement passant, d'après la figure suivante, extraite du document **REF29**.

FIGURE 60 – Courant maximal à travers le transistor P-MOS en fonction de  $-V_{GS}$ 

Pour une tension grille-source égale à  $-4\text{V}$  (i.e.  $-V_{GS} = 4\text{V}$ ), le courant maximal admissible par le transistor est d'environ  $400\text{mA}$ , bien inférieur aux  $4\text{A}$  requis pour allumer l'inflammeur. Il faut une tension grille-source d'au moins  $5\text{V}$  pour obtenir un courant suffisant.

La grille du P-MOS est connectée à  $\text{ORDRE}^+$  via une résistance de  $100\Omega$  qui limite l'appel de courant de la grille lorsque le transistor est sollicité, la source est connectée à  $\text{ALIM}^+$ , et le drain à  $\text{SHUNT}^+$ .

Le transistor de puissance **IRF540N** est un N-MOS, dont la tension de seuil vaut au plus  $+4\text{V}$ . Là encore, pour accepter un courant suffisant pour allumer l'inflammeur, il faut cependant appliquer une tension grille-source plus élevée.

La grille du N-MOS est connectée à  $\text{ORDRE}^-$  via une résistance de  $100\Omega$  qui limite l'appel de courant de la grille lorsque le transistor est sollicité, la source est connectée à  $\text{ALIM}^-$ , et le drain à  $\text{SHUNT}^-$ .

Lorsque l'optocoupleur est ouvert,  $\text{ORDRE}^+$  et  $\text{ORDRE}^-$  sont ouvertes. Aucun courant ne circule donc entre  $\text{ALIM}^+$  et  $\text{ORDRE}^+$  d'une part, et entre  $\text{ALIM}^-$  et  $\text{ORDRE}^-$  d'autre part. D'après la loi d'Ohm, la tension aux bornes des résistances  $R_7$ ,  $R_5$ ,  $R_8$  et  $R_6$  est donc nulle. La grille du P-MOS est donc au même potentiel que sa source, de même pour le N-MOS. Pour chacun des transistors, la tension grille-source est donc nulle, les transistors ne laissent donc pas passer le courant.

Lorsque l'optocoupleur est passant,  $\text{ORDRE}^+$  et  $\text{ORDRE}^-$  sont reliés et le schéma électrique équivalent vu par le circuit est le suivant.

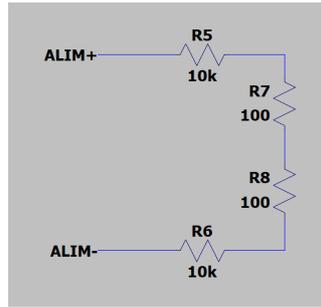


FIGURE 61 – Schéma équivalent optocoupleur passant

Les résistances de  $100\Omega$  étant négligeables par rapport aux résistances de  $10k\Omega$ , ce circuit revient à mettre en série deux résistances de  $10k\Omega$  au bornes de la batterie (quand la sécurité avec l'interrupteur à clé est passante). La source du N-MOS est au potentiel ALIM+, celle du P-MOS est au potentiel ALIM-, et leurs grilles sont toutes deux au potentiel du fil entre les deux résistances. En notant  $U=7,4V$  la différence de potentiel au bornes de la batterie, la tension grille-source du N-MOS est donc égale à  $-U/2=-3,7V$ , inférieure à la tension de seuil de  $-2V$  du N-MOS, tandis que la tension grille-source vaut  $U/2=3,7V$ , supérieure à la tension de seuil de  $2V$  du P-MOS. Les transistors sont donc bien passants lorsque l'ordre de mise à feu est donné, et bloquants sinon.

Il faut garder en mémoire que l'ordre de mise à feu n'est envoyé par le séquenceur qu'une fois en vol. Par conséquent, lorsque le pyrotechnicien commence par tourner la clé de la première sécurité, les bornes de la batterie de la ligne d'allumage sont reliées aux lignes ALIM+ et ALIM-, mais les lignes ALIM+ et ALIM- ne sont pas reliées aux lignes SHUNT+ et SHUNT- car les transistors ne sont pas passants. Pour prévenir tout incident en cas de dysfonctionnement de la carte qui rendrait passants les transistors alors que la fusée est encore sur rampe, un buzzer et une LED situés après les transistors permettent de signaler que les transistors sont passants alors qu'ils ne devraient pas l'être, comme cela est détaillé sur la schématique suivante.

#### Buzzer et LED de sécurité

Le buzzer actif ne sonne que lorsque du courant circule après les MOSFET, la LED ne brille que dans ce cas également. Cela se produit si Lock Switch et les MOSFET sont passants, auquel cas tirer le Jack activerait le moteur.

**ENTENDRE CE BUZZER OU VOIR CETTE LED  
AU SOL SIGNALÉ UN DANGER EN CAS D'ARRACHAGE DU SHUNT JACK.**

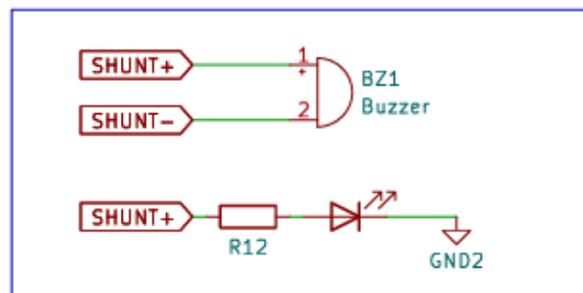


FIGURE 62 – Schématique du buzzer de la carte d'allumage



Si un dysfonctionnement venait à rendre les transistors passant alors que l'ordre n'a pas été envoyé par le séquenceur, une fois l'interrupteur à clé tourné les bornes de la batterie seraient connectées à SHUNT+ et SHUNT-, ce qui ferait sonner le buzzer actif et briller la LED connectée à SHUNT+.

## Routage

Le routage a été réalisé sur 4 couches pour faciliter la séparation des signaux et des plans de référence. Les couches internes sont dédiées aux plans de masse, permettant de réduire les interférences et d'assurer un bon retour de courant.

Couche	Type	Épaisseur (mm)	$\varepsilon_R$	$\text{tg } \delta$
F.Cu	Signal	0.07	3.3	0
In1.Cu	Masse interne	0.0152	—	—
In2.Cu	Masse interne	0.0152	—	—
B.Cu	Signal	0.07	3.3	0
Dielectric 1 (Prepreg)	FR4	0.0994	4.1	0.02
Dielectric 2 (Core)	FR4	1.265	4.43	0.02
Dielectric 3 (Prepreg)	FR4	0.0994	4.1	0.02

TABLE 12 – Stack-up et paramètres diélectriques du PCB de la carte d'allumage

Le poids de cuivre des pistes a été adapté selon les besoins des deux zones fonctionnelles du circuit. Sur la partie commande, un poids de 0,5 oz pour les pistes est suffisant étant donné les faibles courants impliqués et facilite le routage. En revanche, sur la face puissance, un poids de 2 oz a été choisi pour garantir une bonne tenue en courant et limiter les échauffements lors de la mise à feu.

Sur les couches internes dédiées aux plans de masse, nous avons défini deux zones distinctes : une pour la puissance et une pour la commande. Ces zones sont placées de part et d'autre de l'optocoupleur afin d'assurer une isolation électrique entre la partie puissance (inflammateur) et la partie commande (lignes venant du séquenceur). Cela permet de limiter les perturbations électromagnétiques, le passage d'un domaine à l'autre (ordre vers puissance) se fait uniquement via l'optocoupleur, qui assure la barrière galvanique.

Des vias de liaison ont été placés régulièrement autour du PCB pour relier les différents plans de masse entre les couches internes et externes. Cette grille périphérique permet de réduire les boucles de courant en assurant un plan de référence cohérent sur tout le pourtour du circuit.

Enfin, du cuivre a été coulé dans les zones vides des couches externes et relié aux plans de masse interne afin d'augmenter encore la continuité des plans de masse et des chemins de retour du courant.

## Simulations sur LTSpice

Avant la fabrication, une simulation du circuit simplifié a été réalisée sous LTSpice afin de

valider son fonctionnement. Le schéma simulé est présenté en Figure 63.

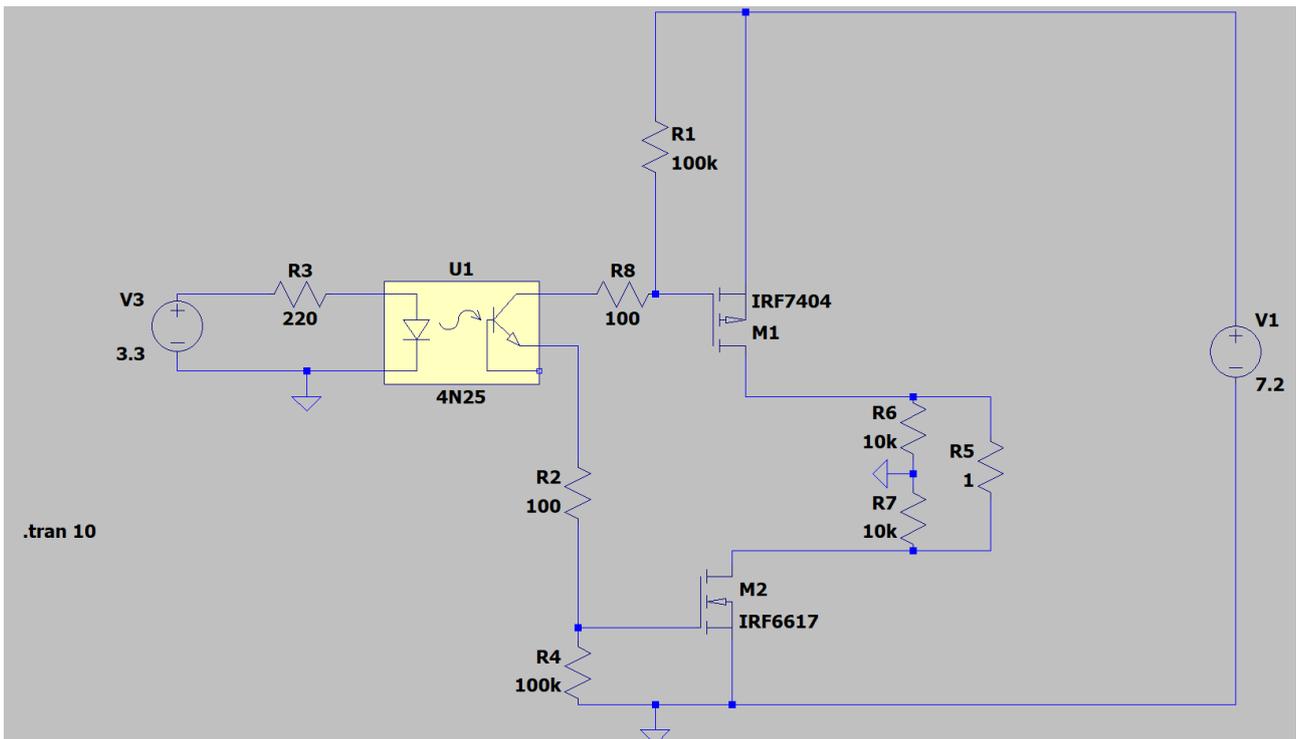


FIGURE 63 – Schéma simplifié du circuit simulé sous LTspice

Ce schéma simule la situation où les sécurités mécaniques sont passantes et où il ne reste que l'ordre de mise à feu à envoyer. Le fonctionnement des transistors a été testé en générant une tension crête à crête d'amplitude 7,4V par la source de tension V3. L'état haut du crête à crête correspond à une sortie à l'état haut de la porte logique sur la carte d'allumage (i.e. ordre d'allumage envoyé), tandis qu'un état bas correspond à une sortie à l'état bas de la porte logique, i.e. les trois conditions pour l'allumage ne sont pas simultanément vérifiées. La tension simulée est présentée en Figure 64. A noter que cette simulation a servi à vérifier la logique de fonctionnement des transistors mais ne tient pas compte de la physique des composants. Notamment, la tension grille-source de -4V sur le P-MOS est suffisante pour le rendre complètement passant, ce qui n'est pas le cas en réalité comme expliqué dans la section sur la schématique de la carte.

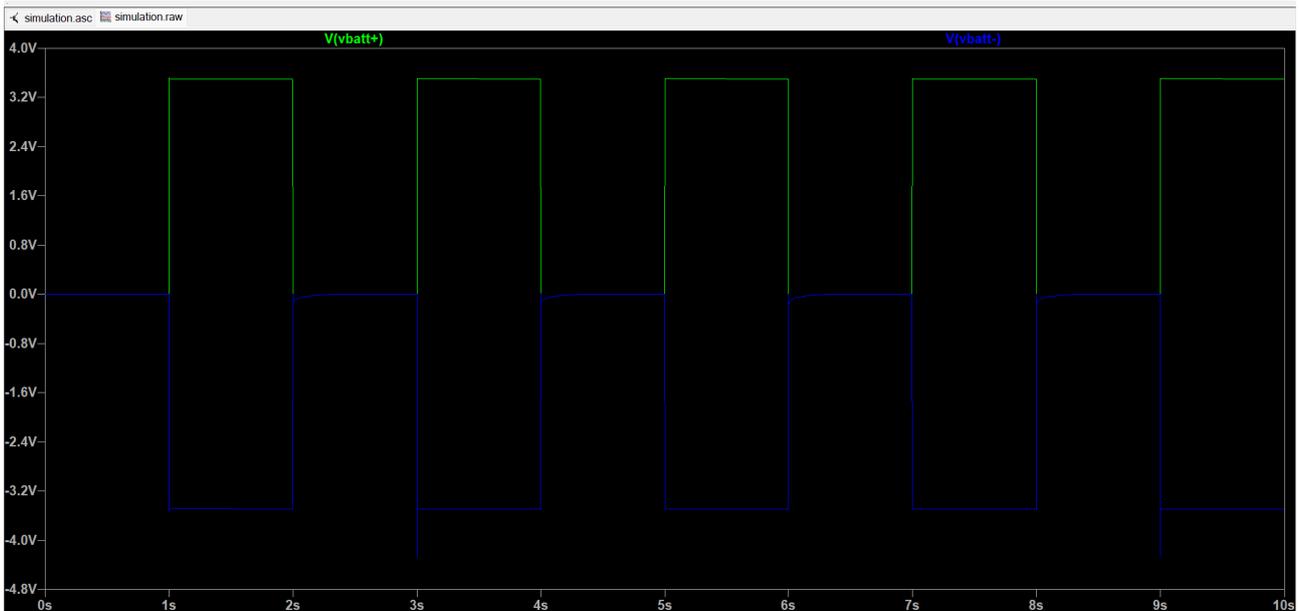


FIGURE 64 – Tension simulant la sortie de la porte logique de la partie commande

La tension obtenue aux bornes de l'inflamateur en réponse à cette sollicitation est présentée en Figure 65.

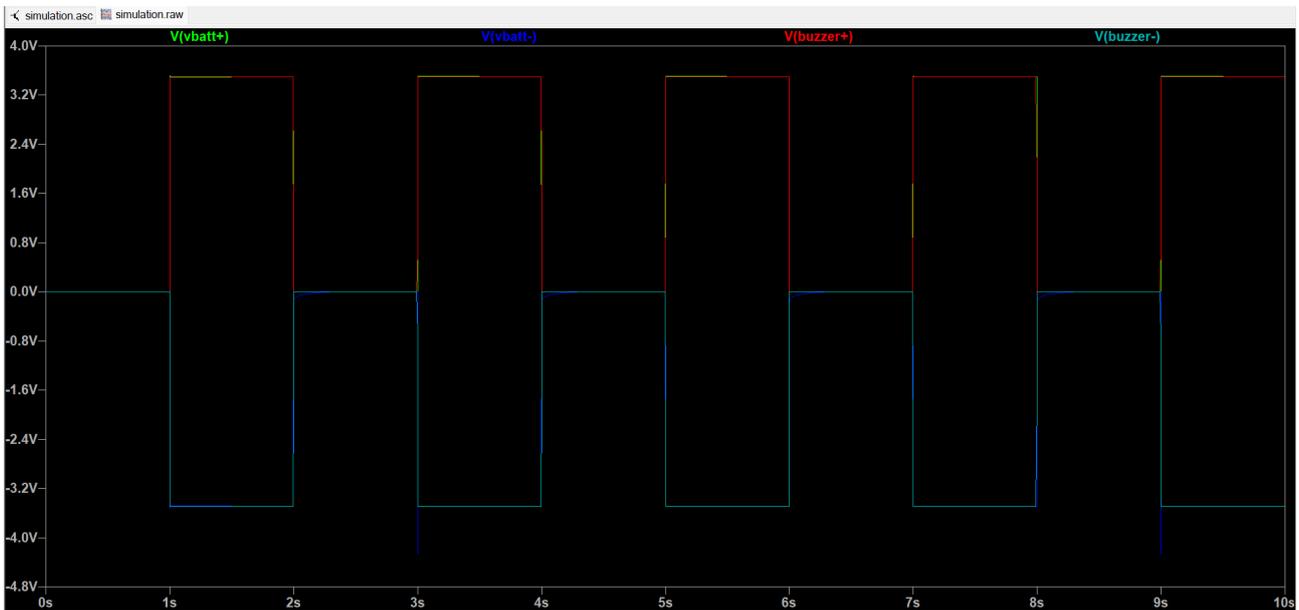


FIGURE 65 – Réponse en tension aux bornes de l'inflamateur

On observe bien une tension nulle aux bornes de l'inflamateur lorsque l'ordre n'est pas envoyé, et une tension égale à la tension batterie lorsque l'ordre est donné. La réponse en tension aux bornes de l'inflamateur suit parfaitement la sollicitation. En appliquant la loi d'Ohm aux bornes de l'inflamateur dont la résistance vaut  $1\Omega$ , on en déduit que le courant traversant l'inflamateur est suffisant pour le faire détoner.

### 4.6.6 Carte séquenceur et expérience de l'étage inférieur

#### Présentation du produit

La carte séquenceur et expérience de l'étage inférieur regroupe sur une même carte le séquenceur et la partie expérience de l'étage inférieur, contrairement à l'étage supérieur dont le séquenceur et la carte expérience constituent deux cartes distinctes. Les deux parties sont totalement distinctes électriquement, y compris au niveau des plans de masse.

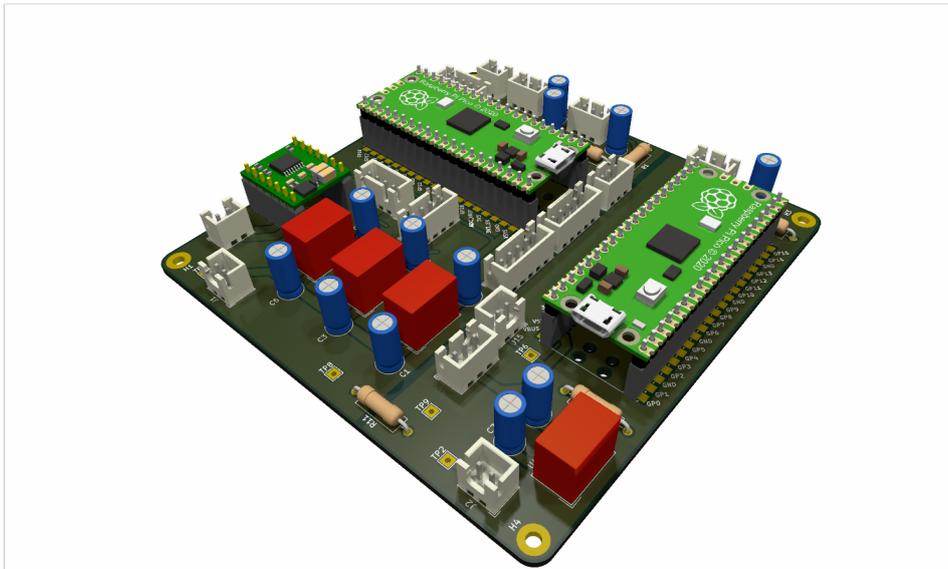


FIGURE 66 – Carte séquenceur et expérience de l'étage inférieur

Le séquenceur de l'étage inférieur a pour fonctions de détecter le décollage afin de démarrer sa minuterie de commande la séparation des deux étages et de déployer son parachute. L'expérience de l'étage inférieur comprend l'enregistrement des données de vol de l'étage inférieur par un IMU et l'enregistrement de la pression au cours du vol avec un baromètre.

Cette carte comprend également les régulateurs de tension pour alimenter le séquenceur et l'expérience, elle peut donc directement être alimentée par des batteries, contrairement aux cartes de l'étage supérieur dont les circuits de régulation de tension sont situés sur la carte de puissance. La partie séquenceur est alimentée par deux cartes batteries mises en série pour obtenir une batterie 4S (voir la sous-section sur les cartes batteries), tandis que la partie expérience est alimentée par une batterie Li-ion **Keppower 2S1P 900mAh 7.2V - 7.4V** identique à la batterie de la ligne d'allumage.

La carte séquenceur et expérience utilise uniquement des composants traversants, tandis que les cartes de l'étage supérieur font la part belle aux composants montés en surface.

De telles différences entre les deux étages s'expliquent par deux raisons. D'une part, les cartes électroniques de l'étage supérieur n'ont pas été conçues par le même étudiant que la carte électronique de l'étage inférieur, chacun ayant eu ses propres choix de conception. D'autre part,



les cartes de l'étage supérieur sont situées dans la coiffe de la fusée, qui dispose d'un grand espace vertical, et la carte expérience de l'étage supérieur possède des antennes, ce qui rendait une disposition verticale des cartes plus pertinente par rapport à la disposition horizontale choisie pour l'étage inférieur, dans lequel le compartiment alloué à l'électronique a une hauteur plus courte.

Les microcontrôleurs choisis sont des **Raspberry Pi Pico**, comme sur les cartes de l'étage supérieur. Les régulateurs de tension sont des régulateurs à découpage de la série **TSR 1-24XX** de Traco Power, qui ont déjà volé sur SCALAR-V, ce qui justifie leur choix.

Le séquenceur dispose notamment d'un driver de moteur pont en H **DRV8874** de Pololu, afin de piloter le moteur du SSIE. Ce driver a été choisi pour sa plage de tension allant de 7V à plus de 30V, ce qui permet donc de l'utiliser avec les 12V requis pour le moteur du SSIE. Ce modèle a également été choisi car il est monté sur une carte d'extension connectable avec des broches traversantes. Cela permet d'insérer le driver dans des connecteurs comme les microcontrôleurs, et donc de le retirer au besoin. Cette précaution a été prise car il n'est pas rare de griller un driver de moteur pont en H, le souder à même le PCB n'est donc pas judicieux.

Les deux autres actionneurs reliés au séquenceur de l'étage inférieur sont un servomoteur du même modèle que les servomoteurs de l'étage supérieur et servant à ouvrir et fermer la trappe du parachute de l'étage inférieur, ainsi qu'un buzzer du même modèle que celui de l'étage supérieur et agissant en complément des LED de l'IHM de l'étage inférieur pour indiquer l'état du séquenceur de l'étage inférieur.

Un câble arraché au décollage et connecté à deux cosses, l'une reliée à l'alimentation 3V3, l'autre à une broche du séquenceur, permet de détecter le décollage pour le séquenceur de l'étage inférieur.

Pour vérifier que la séparation a eu lieu, un bouton poussoir, identique à ceux utilisés dans l'étage supérieur, est maintenu appuyé lorsque les étages sont reliés, puis relâché lorsque les étages sont séparés. Seul un bouton a été prévu dans l'étage inférieur car il ne s'agit que d'un simple retour d'information pour le séquenceur de l'étage inférieur, tandis que pour l'étage supérieur, la détection de la séparation est un élément essentiel du plan de vol.

Des Jacks ont été initialement prévus pour armer le séquenceur et l'expérience de l'étage inférieur, comme cela est le cas sur l'étage supérieur, mais ils ne sont finalement pas utilisés.

Enfin, tout comme sur l'étage supérieur, des connecteurs sont prévus pour alimenter des LED sur l'IHM de l'étage inférieur, afin de signaler l'état du séquenceur et de la carte expérience, et le bon fonctionnement des pistes de puissance.

Du côté de l'expérience, l'IMU et le baromètre sont regroupés sur un module **Pico 10DOF** de Waveshare, fait pour Raspberry Pi Pico et largement utilisé sur les minifusées du projet de formation Sparrow. C'est donc la haute maturité technologique de ce composant qui a guidé son choix.



Schématique

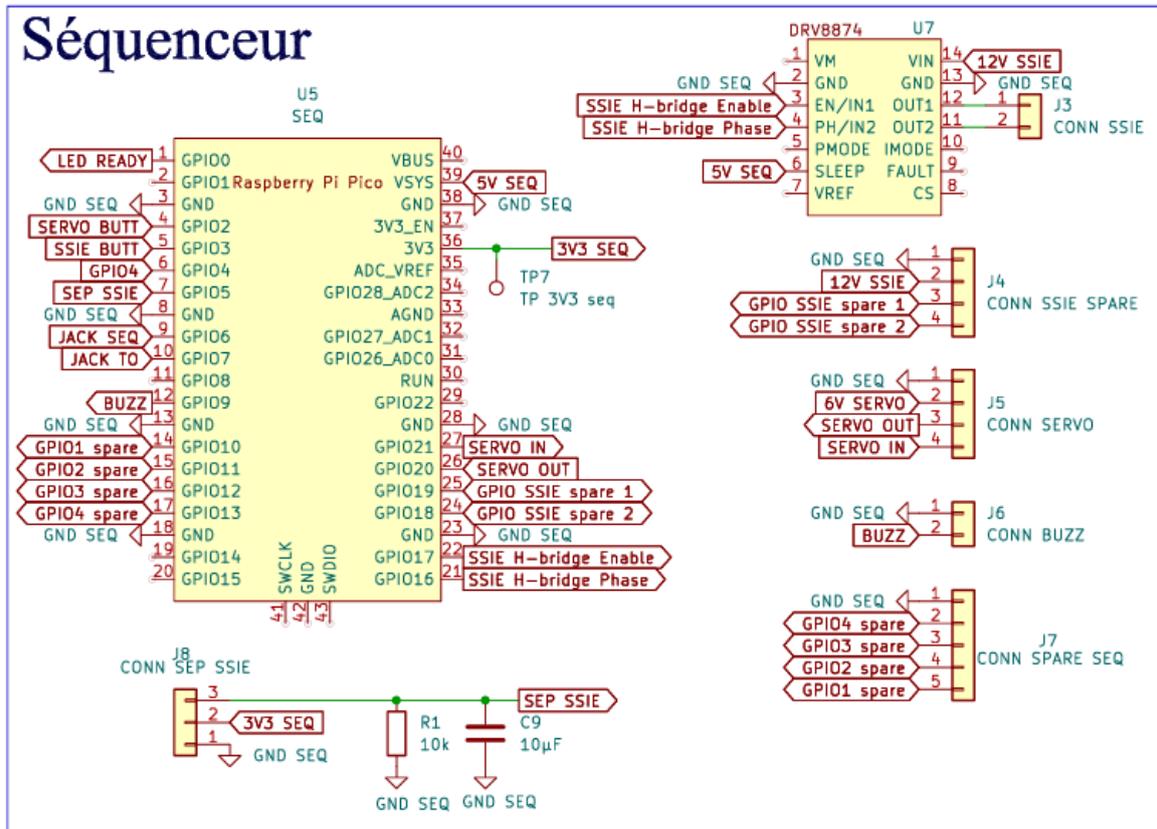


FIGURE 67 – Schématique du séquenceur de l'étage inférieur

Comme pour l'étage supérieur, le microcontrôleur est inséré dans deux connecteurs et non pas soudé directement sur la carte. Le tableau ci-dessous explicite les fonctions des broches du microcontrôleur du séquenceur.

Numéro de broche	Nom sur la schématique	Description
1	LED READY	Connecté à la LED d'état du séquenceur sur l'IHM de l'étage inférieur
2	NC	Non connecté
3	GND	Connecté à la masse



Numéro de broche	Nom sur la schématique	Description
4	SERVO BUTT	Connecté au bouton poussoir commandant l'ouverture ou la fermeture manuelle de la trappe parachute de l'étage inférieur. A l'état bas quand le bouton est relâché, à l'état haut quand le bouton est pressé.
5	SSIE BUTT	Connecté au bouton poussoir commandant l'ouverture ou la fermeture manuelle du SSIE. A l'état bas quand le bouton est relâché, à l'état haut quand le bouton est pressé.
6	GPIO 4	GPIO non utilisé, relié à un connecteur libre
7	SEP SSIE	Broche connectée au bouton de détection de la séparation. A l'état bas quand les deux étages sont reliés, à l'état haut quand les étages sont séparés.
8	GND	Connecté à la masse
9	JACK SEQ	Initialement prévu pour être connecté à un Jack, finalement non utilisé
10	JACK TO	Initialement prévu pour être connecté à un Jack, finalement non utilisé
11	GPIO 8	GPIO non utilisé, relié à un connecteur libre
12	BUZZ	Connecté au buzzer
13	GND	Connecté à la masse
14	GPIO1 spare	GPIO non utilisé relié à un connecteur libre
15	GPIO2 spare	GPIO non utilisé relié à un connecteur libre



Numéro de broche	Nom sur la schématique	Description
16	GPIO3 spare	GPIO non utilisé relié à un connecteur libre
17	GPIO4 spare	GPIO non utilisé relié à un connecteur libre
18	GND	Connecté à la masse
19	NC	Non connecté
20	NC	Non connecté
21	SSIE H-bridge Phase	Contrôle la broche de phase du pont en H
22	SSIE H-bridge Enable	Contrôle la broche d'activation du pont en H
23	GND	Connecté à la masse
24	GPIO SSIE spare 2	Broche non connectée, reliée à un conecteur libre avec une sortie 12V
25	GPIO SSIE spare 1	Broche non connectée, reliée à un connecteur libre avec une sortie 12V
26	SERVO OUT	Retour analogique du servomoteur
27	SERVO IN	Signal de contrôle par PWM du servomoteur d'ouverture de la trappe du parachute
28	GND	Connecté à la masse
29	NC	Non connecté
30	NC	Non connecté
31	NC	Non connecté
32	NC	Non connecté
33	GND	Connecté à la masse
34	NC	Non connecté
35	NC	Non connecté
36	3V3 SEQ	Alimentation en 3V3 du séquenceur par la sortie 3V3 du micro-contrôleur
37	NC	Non connecté
38	GND	Connecté à la masse

Numéro de broche	Nom sur la schématique	Description
39	5V SEQ	Alimentation 5V du microcontrôleur
40	NC	Non connecté

TABLE 13 – Description des broches du séquenceur de l'étage inférieur

Le driver de moteur pont en H contrôle le moteur du SSIE. Ses branchements suivent les indications données par Pololu sur l'image ci-dessous.

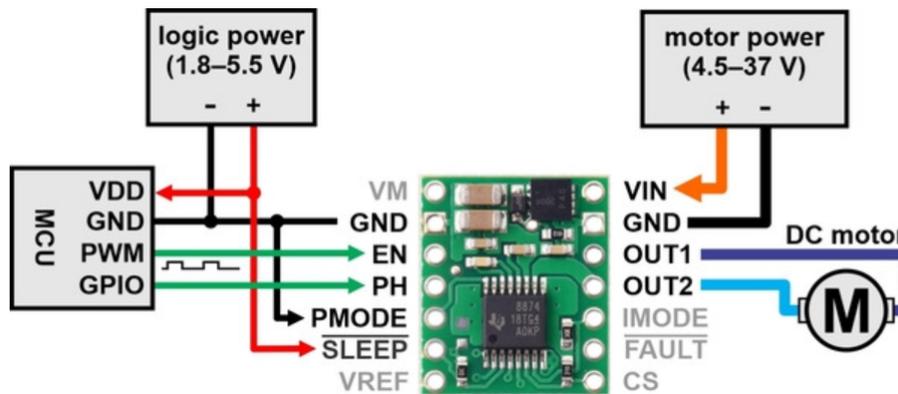


FIGURE 68 – Schéma de branchement du DRV8874

Les connexions du moteur et de l'alimentation du moteur sont réalisées d'un côté de la carte, et les connexions d'alimentation logique et de contrôle sont réalisées de l'autre côté. Le driver nécessite de fournir une tension moteur comprise entre 4,5 V et 37 V à la broche VIN ou VM. Le driver est en mode veille par défaut, et une tension logique comprise entre 1,8 V et 5,5 V doit être fournie à la broche SLEEP pour le faire sortir du mode veille. Cette tension logique peut être partagée avec le dispositif de contrôle, ou peut être fournie par une sortie du dispositif de contrôle, ce qui permet un contrôle dynamique du mode veille. La broche VIN est l'entrée d'alimentation du moteur, protégée contre les inversions de tension et est la broche recommandée pour connecter l'alimentation du moteur. VM est une broche d'alimentation du moteur après le circuit de protection contre les inversions de tension.

Une erreur est donc à signaler sur la schématique : la broche PMODE devrait être reliée à la masse du séquenceur. Cela a été corrigé par une reprise au fil sur le PCB.

Le driver est utilisé en Phase/Enable mode. Le fait de mettre la broche PMODE à l'état bas avant d'activer le driver, comme indiqué dans le schéma ci-dessus, met le circuit en mode de contrôle phase/enable, où la broche PH détermine la direction du moteur et la broche EN peut être alimentée par un signal PWM pour contrôler la vitesse du moteur (c'est ce qu'on appelle typiquement le fonctionnement en magnitude de signe). Ce mode est généralement plus facile à utiliser car il ne nécessite qu'un seul signal PWM, mais il ne permet qu'un fonctionnement entraînement/freinage.

Le moteur requiert une alimentation de 12V pour fonctionner, et est contrôlé par les broches OUT1 et OUT2.

La séparation est détectée par un bouton poussoir comme pour l'étage supérieur.

Les derniers éléments du séquenceur sont le connecteur pour le buzzer actif, le connecteur du servomoteur, le connecteur avec des broches en plus utilisables au besoin et le connecteur avec une sortie 12V et des broches en plus utilisables au besoin.

## Routage

La carte séquenceur et expérience est routée sur quatre couches, les deux couches externes étant pour les signaux et la puissance et les deux couches internes étant des plans de masse. La carte est divisée en deux parties totalement séparées électriquement, y compris au niveau des plans de masse, pour distinguer la partie expérience du séquenceur. Le routage ne présente pas de subtilités en dehors de cela.

### 4.6.7 IHM de l'étage inférieur

#### Présentation du produit

L'IHM de l'étage inférieur permet de mettre en marche les cartes électronique de cet étage lors des opérations pré-lancement. Elle est scindée en deux parties, séquenceur et expérience, qui ne partagent aucun lien électrique.

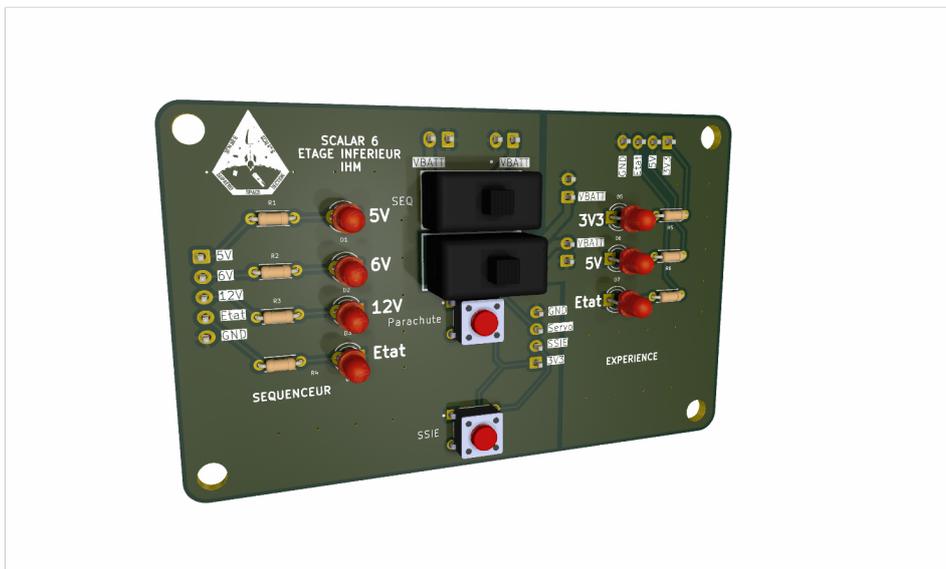


FIGURE 69 – IHM de l'étage inférieur

Chaque partie de l'IHM dispose d'un interrupteur à glissière **25139NAH** afin d'allumer ou d'éteindre la carte correspondante, de LED pour indiquer l'état de chaque carte ainsi que le bon fonctionnement des lignes de puissance.



La partie séquenceur de l'IHM dispose de plus de deux boutons poussoirs reliés au séquenceur, qui permettent d'activer manuellement l'ouverture et la fermeture de la trappe du parachute et du SSIE lors des opérations pré-lancement.

### Schématique

La schématique est analogue à celle de l'IHM de l'étage supérieur, à laquelle nous référons.

### Routage

L'IHM de l'étage supérieur est routée sur deux couches, l'une pour les signaux et les pistes de puissance, l'autre pour les plans de masse. Comme mentionné dans la présentation de la partie, la carte possède deux plans de masse distincts, pour isoler la partie séquenceur de la partie expérience.

Le routage de l'IHM de l'étage supérieur ne présente aucune autre subtilité.

### 4.6.8 Cartes batteries

#### Présentation du produit

Habituellement, les cartes électroniques des fusex du club sont alimentées par des packs batterie avec un nombre de cellules fixes (2S, 3S...). Sur SCALAR 6 a été testé une solution innovante qui permettrait de n'utiliser qu'un seul modèle de batterie **Keppower 18650 - 2200mAh, 3.7V**, compact, avec une capacité importante de 2200mAh et un BMS intégré, pour faire des batteries avec un nombre de cellules modulaire.

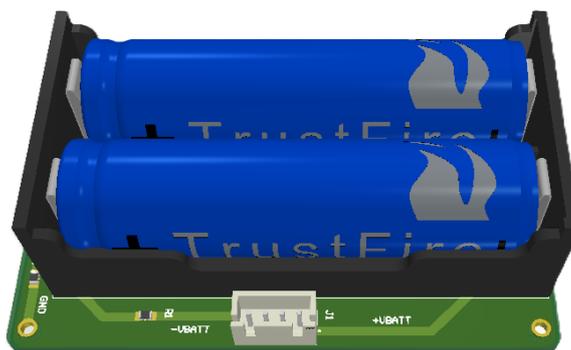


FIGURE 70 – Carte batterie

Pour cela, deux cellules 1S sont mises en série sur une carte batterie pour obtenir une batterie 2S de tension de sortie 7,4V, et de capacité 2200mAh. Puis chaque carte batterie ainsi constituée peut être mise en série avec d'autres cartes batterie afin d'obtenir tout type de batterie à 2N cellules, où N est le nombre de cartes batteries mises en série.

L'avantage d'une telle solution est de permettre de n'acheter qu'un seul modèle de batterie, et donc un seul chargeur, pour de multiples usages ou tensions de sortie requises. Une fois mis en place, ce système permet ainsi de nettement diminuer le coût des batteries dans les projets de fusées pour le club.

La carte batterie est donc on ne peut plus simple. Elle accueille simplement un porte batterie **BK-18650-PC4-ND**, un connecteur JST à 4 broches et deux résistances  $0\Omega$ . La borne + de l'une des batteries va au connecteur, sa borne - va à la borne + de l'autre pour les mettre en série, et la borne - de l'autre peut aller au connecteur ou à la masse pour mettre la carte batterie 2S ainsi constituée avec une autre ou non.

### Schématique

La schématique parle d'elle-même

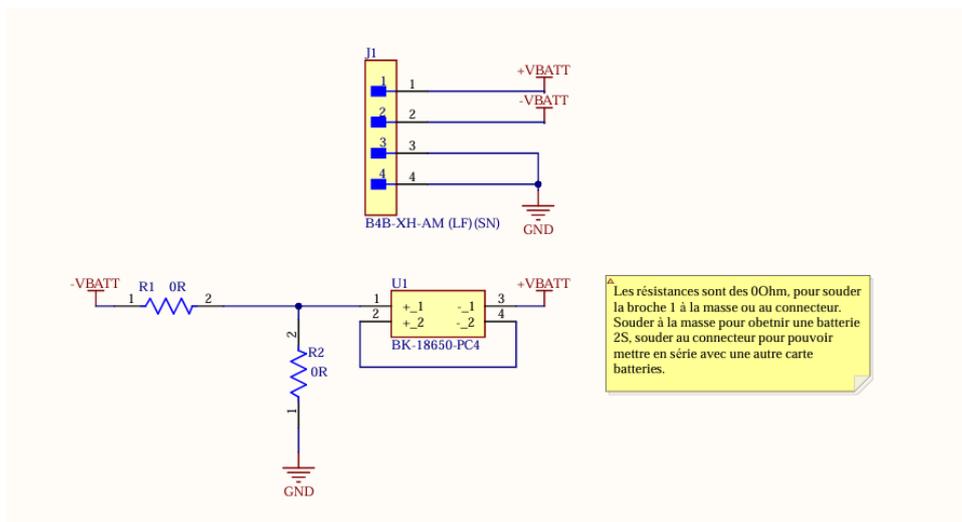


FIGURE 71 – Schématique d'une carte batterie 2S

### Routage

La carte batterie est routée sur deux couches, une pour les pistes de puissance, l'autre pour le plan de masse. Le routage ne présente pas de subtilités particulières.

#### 4.6.9 Interfaces des cartes de l'étage supérieur

Les connexions entre les cartes de l'étage supérieur sont résumées par le schéma suivant. Les lignes en pointillés symbolisent les parties de cartes séparées électriquement.

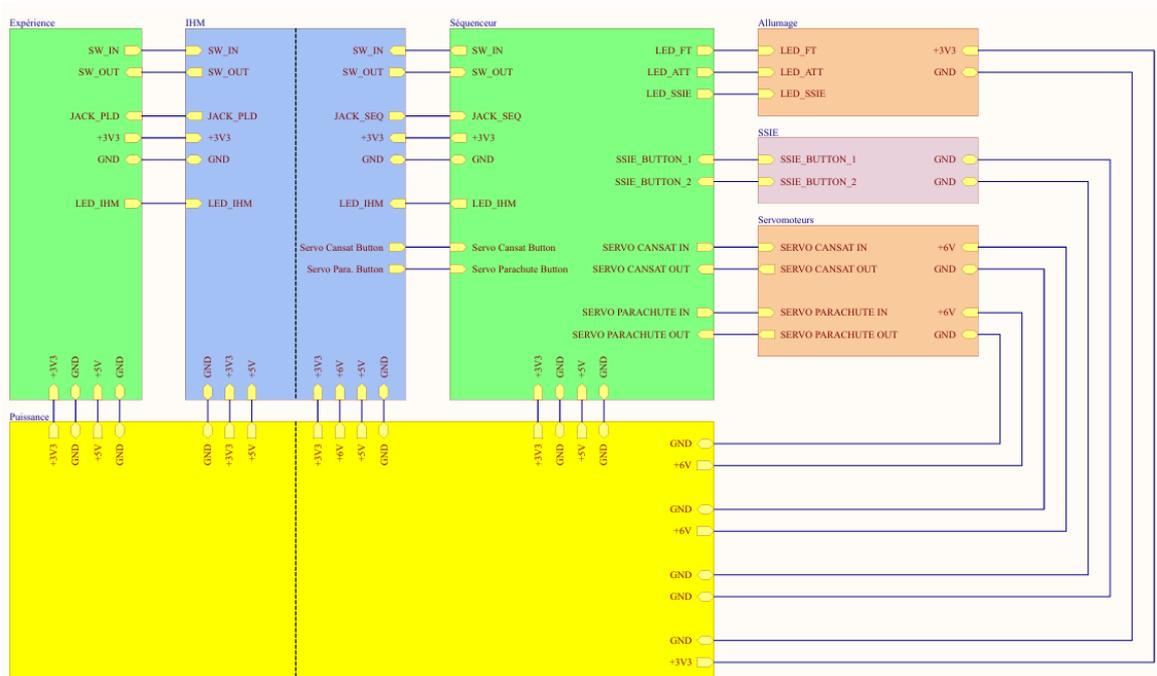


FIGURE 72 – Interfaces des cartes de l'étage supérieur

#### 4.6.10 Interfaces des cartes de l'étage inférieur

Les connexions entre les cartes de l'étage inférieur sont résumées par le schéma suivant. Les lignes en pointillés symbolisent les parties de cartes séparées électriquement.

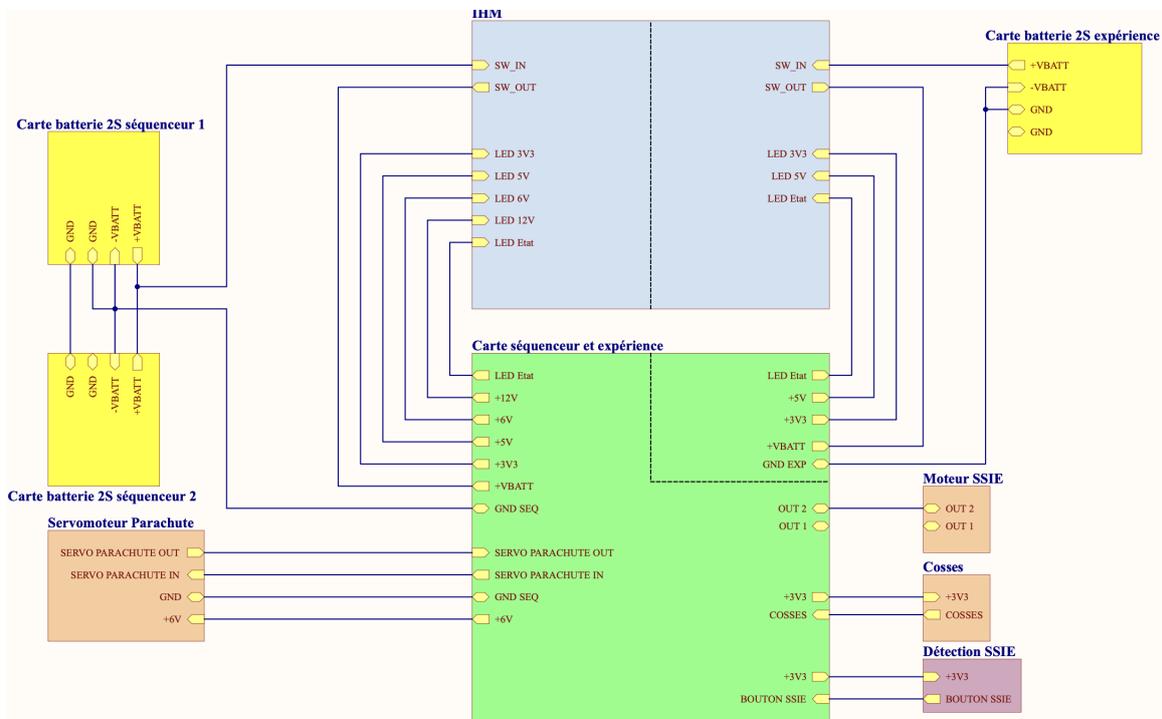


FIGURE 73 – Interfaces des cartes de l'étage inférieur



## 4.7 Erreurs de conception sur les cartes électroniques

### 4.7.1 Séquenceur de l'étage supérieur

- Les retours analogiques des servomoteurs devraient être connectés à des broches ADC du microcontrôleur.
- Le buzzer doit être commandé via un transistor et non pas directement avec le microcontrôleur.

### 4.7.2 Carte expérience de l'étage supérieur

- Les connecteurs du microcontrôleurs ont été échangés lors du routage et sont un peu trop espacés.
- Les connexions de l'UART entre le microcontrôleur et le module LoRa ne sont pas croisées.

### 4.7.3 Carte de puissance de l'étage supérieur

- Le tab des régulateur 3V3 doit être connecté à leur tension de sortie, pas à la masse.

### 4.7.4 Carte séquenceur et expérience de l'étage inférieur

- La broche PMODE du DRV8874 doit être connectée à la masse du séquenceur.
- Les retours analogiques des servomoteurs devraient être connectés à des broches ADC du microcontrôleur.



## 5 Logiciel de vol

### 5.1 Présentation générale du logiciel de vol

Le logiciel de vol de SCALAR 6 consiste en des codes en langage C++ développés pour faire fonctionner les microcontrôleurs Raspberry Pi Pico des séquenceurs et cartes expériences de la fusée. Ces codes ont été développés en utilisant l'extension PlatformIO de l'IDE VSCode.

### 5.2 Paramètres de trajectoire pour le logiciel de vol

#### 5.2.1 Fenêtres temporelles

Le déclenchement des différents systèmes de la fusée obéit à des fenêtrages temporels stricts imposés par les données de stabilité de la fusée, issues de Stabtraj. Ces données, communiquées par le département stabilité et trajectoire de SCALAR 6 au département des Systèmes Embarqués, sont résumées dans les tableaux suivants.

	Instant théorique	Instant minimal acceptable (80% du théorique)	Instant maximal acceptable (120% du théorique)
t_separation (s)	4.67	3.736	5.604
t_maf (s)	6.67	5.336	8.004
t_can (s)	23.74	18.992	28.488
t_par etage1 (s)	12.49	9.992	14.988
t_par etage2 (s)	23.74	18.992	28.488
t_par ensemble (s)	16.18	12.944	19.416
t_par passif etage1 (s)	12.49	9.9992	14.988
t_par passif etage2 (s)	15.49	12.392	18.588
t_par etage2 seul (s)	15.31	12.248	18.372

TABLE 14 – Données temporelles de stabilité de SCALAR 6

L'instant théorique correspond à l'instant précis où l'événement considéré doit se produire à compter du décollage. Par exemple, la séparation inter-étages doit se produire 4,67 s après le décollage dans le cas nominal.

L'instant minimal et l'instant maximal acceptables définissent la fenêtre temporelle autour de l'instant théorique dans laquelle l'événement est autorisé à se produire. Par exemple, la séparation inter-étages doit être ordonnée entre 3,736 s et 5,604 s après le décollage.



Ce tableau regroupe ainsi toutes les données temporelles nécessaires au bon déroulement du vol :

- $t\_separation$  est l'instant de séparation des deux étages.
- $t\_maf$  est l'instant de la mise à feu du moteur de l'étage supérieur.
- $t\_can$  est l'instant d'éjection de la charge utile.
- $t\_par\ etage1$  est l'instant de déploiement du parachute de l'étage inférieur de l'étage inférieur.
- $t\_par\ etage2$  est l'instant de déploiement du parachute de l'étage inférieur de l'étage supérieur.
- $t\_par\_ensemble$  est l'instant de déploiement du parachute de l'étage supérieur dans le cas où la séparation n'a pas lieu, et où le parachute de l'étage supérieur sert donc à ralentir l'ensemble des deux étages.
- $t\_par\_passif\ etage1$  est l'instant de déploiement du parachute de l'étage inférieur dans le cas où l'étage supérieur est passif, i.e. l'étage supérieur n'allume pas son moteur. Sans surprise, ce temps est identique à  $t\_par\ etage1$ .
- $t\_par\_passif\ etage2$  est l'instant de déploiement du parachute de l'étage supérieur dans le cas où l'étage supérieur est passif, i.e. l'étage supérieur n'allume pas son moteur.
- $t\_par\ etage2\ seul$  est l'instant de déploiement du parachute (et de la charge utile) de l'étage supérieur dans le cas d'un vol en fusée mono-étagée avec uniquement l'étage supérieur. Ce cas peut se produire si par exemple la fusée complète ne passe pas le test de flèche et n'est pas autorisée à tirer en bi-étagé.

### 5.2.2 Accélérations de la fusée

L'accélération au décollage et lors de la mise à feu du moteur de l'étage supérieur interviennent également dans le logiciel de vol et sont également obtenues par les calculs de stabilité et trajectoire.

$acc\_to\ (m.s^{-2})$	39,73
$acc\_maf\ (m.s^{-2})$	64,87

TABLE 15 – Données d'accélérations de SCALAR 6

### 5.2.3 Fenêtre d'attitude à l'allumage du moteur de l'étage supérieur

Les dernières données de stabilité entrant en compte pour le logiciel de vol sont l'attitude nominale de la fusée lors de l'allumage du moteur de l'étage supérieur, qui définit la fenêtre d'attitude autorisée pour l'allumage du moteur.

Assiette nominale de l'étage supérieur lors de l'allumage du moteur	71°
Azimut nominal de l'étage supérieur lors de l'allumage du moteur	0°

TABLE 16 – Données d'attitude nominale de l'étage supérieur de SCALAR-6 à la mise à feu de son moteur

L'azimut est compté par rapport à l'azimut de la rampe lors du décollage. Ainsi, l'azimut nominal de l'étage supérieur étant à 0° lors de l'allumage du moteur de cet étage, cela signifie que la fusée est toujours dans la direction que lui a imposé la rampe du décollage.

Ces deux informations permettent de définir la fenêtre d'attitude acceptable pour l'allumage du moteur de l'étage supérieur, comme cela est expliqué par le schéma ci-dessous, tiré du document de référence **REF1**.

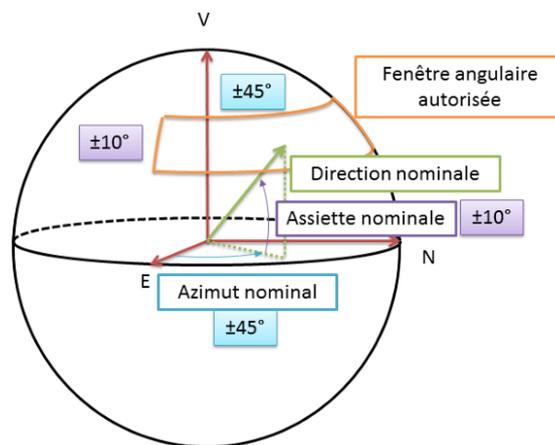


FIGURE 74 – Fenêtre d'attitude pour l'allumage du moteur de l'étage supérieur

Dans le cas de SCALAR-6, la plage d'assiette autorisée est donc entre 61° et 81° au-dessus de l'horizontale, et entre -45° et +45° de part et d'autre de l'azimut de la rampe de lancement.

### 5.3 Signaux visuels et sonores commandés par le logiciel de vol

Lors des opérations en rampe, la fusée doit transmettre un certain nombre d'informations quant à son état de fonctionnement, au statut de ses séquenceurs, ou encore au bon fonctionnement de ses systèmes électroniques de puissance, en accord avec le cahier des charges. Ces informations sont transmises aux pyrotechniciens et aux équipes au sol par des signaux visuels (clignotements de LED situées sur les IHM) et sonores (buzzers reliés aux séquenceurs). La fusée doit aussi pouvoir indiquer son état au cours du vol, notamment pour les tests au sol.

Les différentes signalétiques ainsi utilisées et les noms des signaux correspondants sont détaillés dans les tableaux suivants.



### 5.3.1 Signalétique du séquenceur de l'étage supérieur

Mode	Etat	Période LED état séquen- ceur	Unité	Période buzzer séquen- ceur	Unité	Identifiant signal
		Valeur		Valeur		
Mode stand-by	Nominal	2	s	2	s	STD-01
Mode stand-by	Actionneur actif	0.5	s	2	s	STD-02
Mode décollage	Nominal	1	s	1	s	DEC-01
Mode décollage	Erreur séparation détectée en rampe	0.5	s	0.5	s	DEC-02
Mode séparation	Nominal	1	s	1.5	s	SEPA-01
Mode séparation	Erreur séparation non détectée	0.5	s	1.5		SEPA-02
Mode mise à feu	Nominal	0.5	s	1	s	MAF-01
Mode mise à feu	Erreur mise à feu non ordonnée	0.5	s	1	s	MAF-02
Mode éjection charge utile	Nominal	3	s	3	s	ECU-01
Mode parachute	Nominal	3	s	3.5	s	PAR-01
Mode atterrissage	Nominal	4	s	4	s	ATT-01

TABLE 17 – Signalétique du séquenceur de l'étage supérieur



### 5.3.2 Signalétique de l'expérience de l'étage supérieur

Mode	Etat	Période LED état expé- rience		Identifiant signal
		Valeur	Unité	
Mode stand-by	Nominal	2	s	STD-01
Mode vol	Nominal	1	s	VOL-01
Mode vol	Pas de détection GNSS	0.5	s	VOL-02
Mode at- terrissage	Nominal	30	s	ATT-01
Mode at- terrissage	Pas de détection GNSS	10	s	ATT-02

TABLE 18 – Signalétique de l'expérience de l'étage supérieur

### 5.3.3 Signalétique du séquenceur de l'étage inférieur

Mode	Etat	Période LED état séquen- ceur		Période buzzer séquen- ceur		Identifiant signal
		Valeur	Unité	Valeur	Unité	
Mode stand-by	Nominal	2	s	2	s	STD-01
Mode stand-by	Actionneur actif	0.5	s	2	s	STD-02
Mode décollage	Nominal	1	s	1	s	DEC-01



Mode	Etat	Période LED état séquen- ceur		Période buzzer séquen- ceur		Identifiant signal
		Valeur	Unité	Valeur	Unité	
Mode décollage	Erreur séparation détectée en rampe	0.5	s	0.5	s	DEC-02
Mode séparation	Nominal	1	s	1.5	s	SEPA-01
Mode séparation	Erreur sépara- tion non détectée	0.5	s	1.5	s	SEPA-02
Mode pa- rachute	Nominal	3	s	3.5	s	PAR-01
Mode at- terrissage	Nominal	4	s	4	s	ATT-01

TABLE 19 – Signalétique du séquenceur de l'étage inférieur

### 5.3.4 Signalétique de l'expérience de l'étage inférieur

Mode	Etat	Période LED état expé- rience		Identifiant signal
		Valeur	Unité	
Mode vol	Nominal	2	s	VOL-01

TABLE 20 – Signalétique de l'expérience de l'étage supérieur

## 5.4 Chronologies abstraites

La première étape du développement du code en tant que tel est de définir précisément la chronologie du vol, afin de déterminer quels systèmes activer et quand, prévoir les différents cas d'erreurs, analyser les risques lors du lancement et garantir que toutes les possibilités ont été prises en compte pour s'assurer que la fusée déploie son parachute quoi qu'il arrive. Les

chronologies ainsi établies sont qualifiées d'abstraites dans le sens où elles font abstraction de l'implémentation en C++ des commandes à envoyer ou des actions à effectuer par les actionneurs et ne décrivent ces événements que d'un point de vue logique. L'implémentation en C++ pour les séquenceurs sera détaillée dans les chronologies dites fonctionnelles, qui elles, détaillent le déroulement du code avec les fonctions appelées et les variables utilisées.

### 5.4.1 Chronologie abstraite du séquenceur de l'étage supérieur

La chronologie abstraite du séquenceur de l'étage supérieur reprend les modes signalétiques, ainsi que les données temporelles de trajectoire. Pour un événement donné se produisant à l'instant théorique  $t\_event$ ,  $t1\_event$  désigne l'instant minimal acceptable et  $t2\_event$  désigne l'instant maximal acceptable.

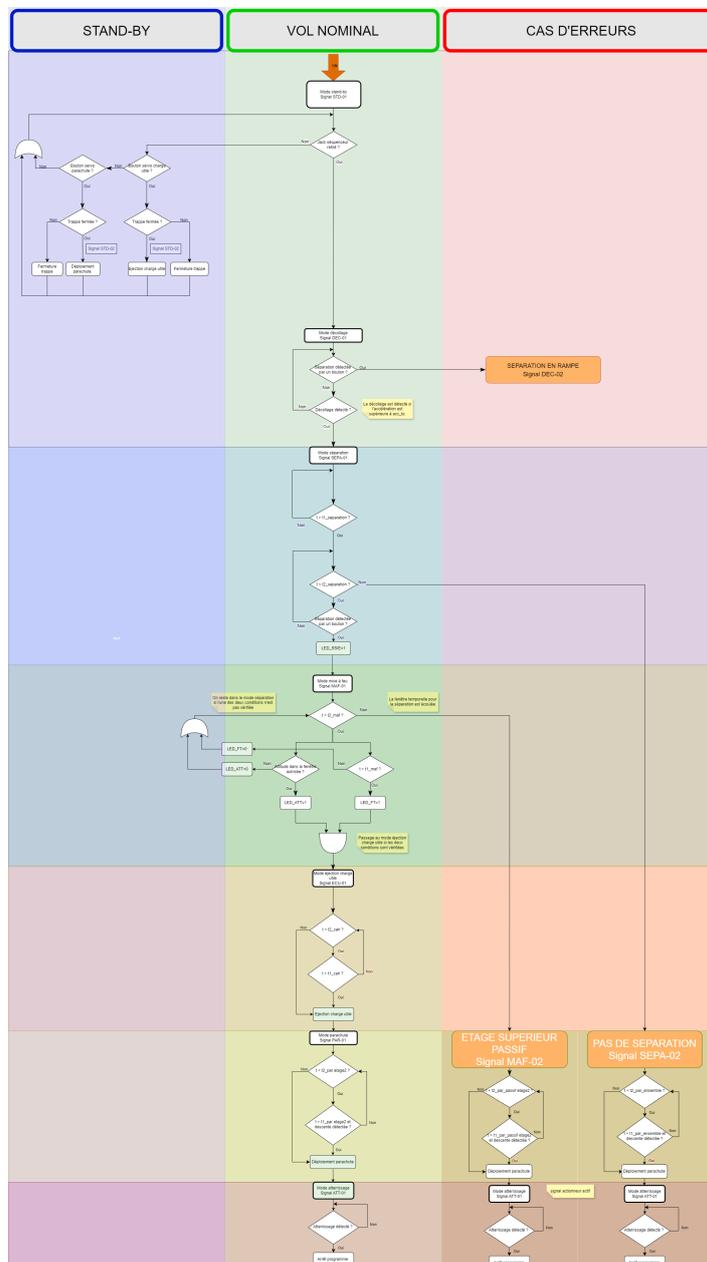


FIGURE 75 – Chronologie abstraite du séquenceur de l'étage supérieur



### 5.5 Chronologie abstraite de l'expérience de l'étage supérieur

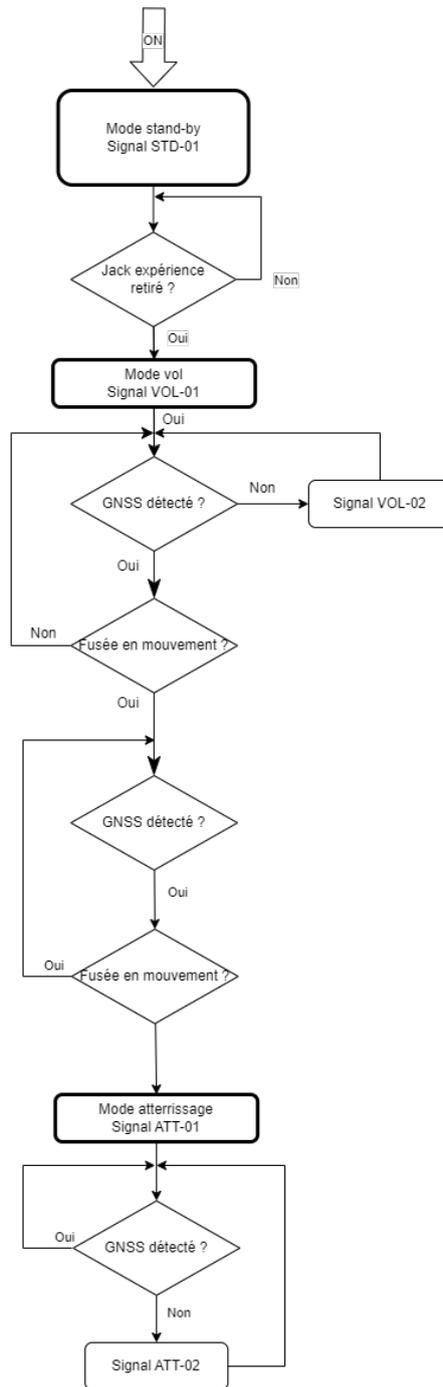


FIGURE 76 – Chronologie abstraite de l'expérience de l'étage supérieur



### 5.6 Chronologie abstraite du séquenceur de l'étage inférieur

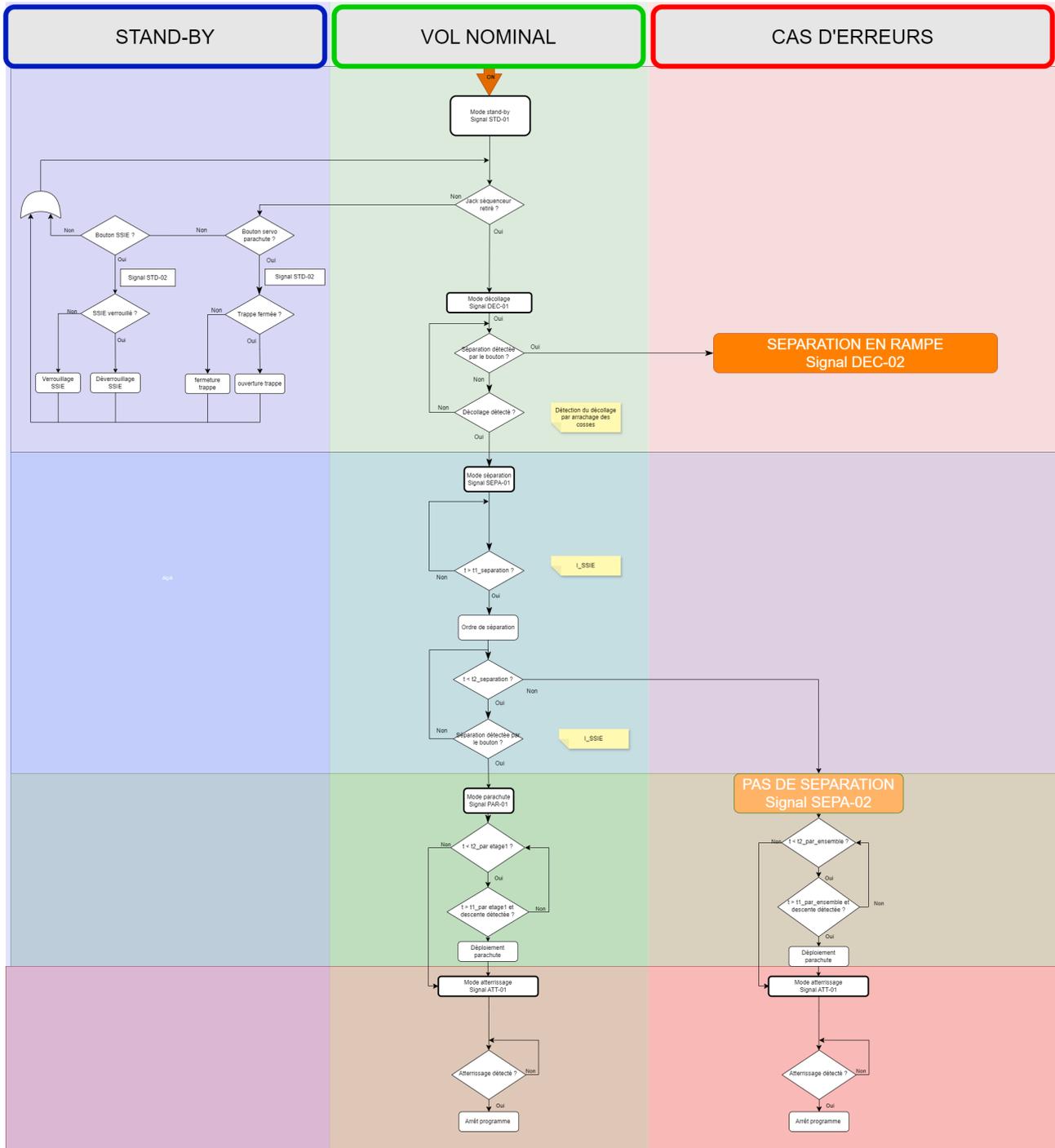


FIGURE 77 – Chronologie abstraite du séquenceur de l'étage inférieur

## 5.7 Chronologie abstraite de l'expérience de l'étage inférieur

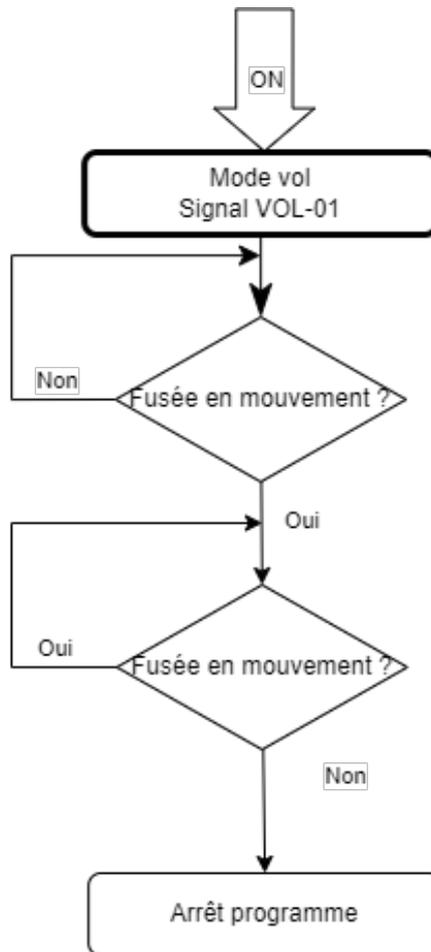
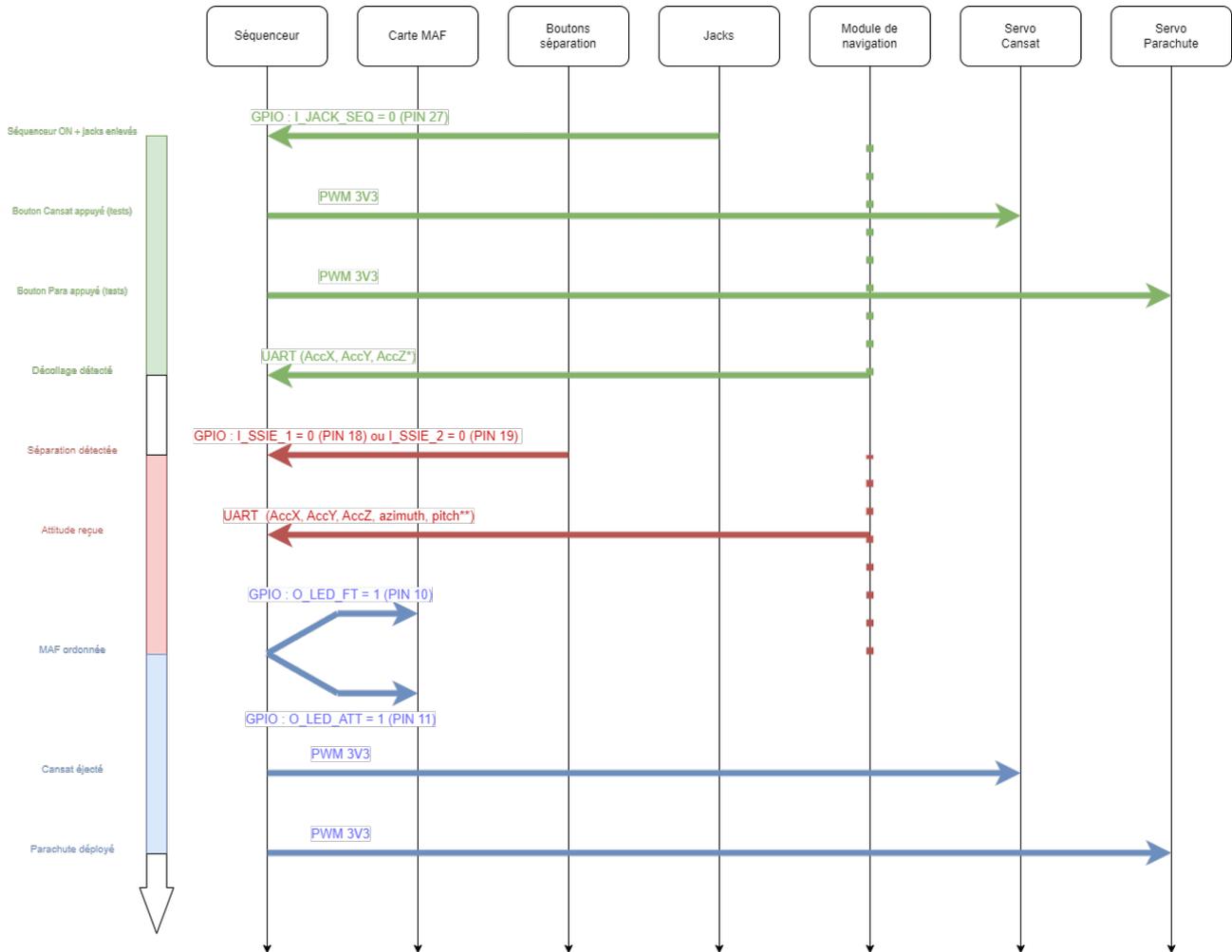


FIGURE 78 – Chronologie abstraite de l'expérience de l'étage inférieur

## 5.8 Flux de données des séquenceurs au cours du vol

Cette section présente deux schémas synthétisant les échanges de données entre les micro-contrôleurs des séquenceurs et les systèmes qui leur sont connectés. Ces diagrammes offrent ainsi un aperçu immédiat des échanges de données au cours du vol et des interactions entre les systèmes constituant les séquenceurs.

### 5.8.1 Flux de données pour le séquenceur de l'étage supérieur



\*Dès que le jack est enlevé, la Witmotion envoie l'accélération verticale au séquenceur pour détecter le décollage

\*\*Dès que la séparation est effectuée et que l'on se trouve dans la fenêtre temporelle de mise à feu, la Witmotion envoie les accélérations, l'azimut et l'assiette afin de vérifier les conditions de mise à feu

FIGURE 79 – Flux de données pour le séquenceur de l'étage supérieur

## 5.8.2 Flux de données pour le séquenceur de l'étage inférieur

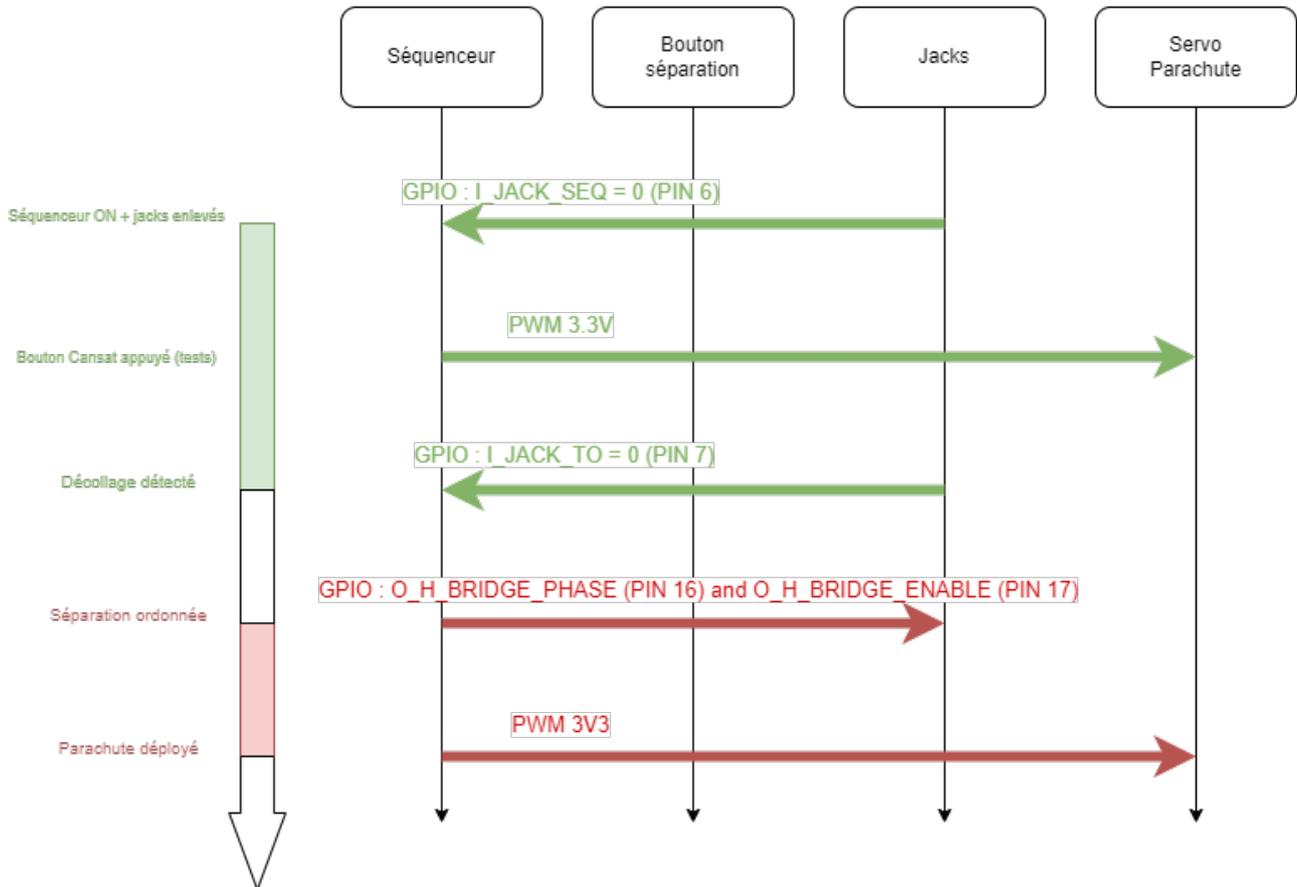


FIGURE 80 – Flux de données pour le séquenceur de l'étage inférieur

## 5.9 Signatures et définitions des fonctions utilisées dans le code

Cette section entre plus dans le détail des codes, en listant les signatures des fonctions utilisées dans le code des séquenceurs et en expliquant brièvement leur utilité, afin de faciliter la compréhension des codes pour qui souhaiterait les parcourir.

### 5.9.1 Signatures des fonctions de l'étage inférieur

`temps_depuis_decollage()` : `void -> uint64_t` : renvoie le temps compté depuis le décollage de la fusée.

`setup()` : `void -> void` : initialise les ports GPIO et PWM nécessaires pour la suite.

`test()` : `void -> void` : boucle du système avant que la jack séquenceur soit enlevé,



permet l'ouverture des trappes si appui sur les boutons.

`decollage() : void -> erreur_t` : boucle du système après que le jack séquenceur soit enlevé et avant le décollage, renvoie une erreur si la séparation est détectée.

`separation() : void -> erreur_t` : boucle du système après le décollage et pendant la fenêtre temporelle de la séparation, renvoie une erreur si la séparation ne s'est pas passée correctement.

`atterrissage() : erreur_t -> void` : gère l'éjection du parachute en fonction de la situation (nominale ou cas d'erreur).

`loop() : void -> void` : organise les différentes étapes du code entre elles , force l'arrêt si la séparation est détectée avant le décollage.

`arret() : void -> void` : bloque le système dans une boucle infinie, empêchant toute autre action.

`ejecterParachute() : void -> void` : envoie le signal pour ouvrir la trappe du parachute.

`fermerTrappe() : void -> void` : envoie le signal pour maintenir la trappe du parachute fermée.

`separerEtage() : void -> void` : envoie le signal pour séparer les deux étages.

### 5.9.2 Signatures des fonctions de l'étage supérieur

`temps_depuis_decollage() : void -> uint64_t` : renvoie le temps compté depuis le décollage de la fusée

`setup() : void -> void` : initialise les ports nécessaires pour la suite

`test() : void -> void` : boucle du système avant que la jack séquenceur soit enlevé, permet l'ouverture des trappes si appui sur les boutons

`decollage() : void -> erreur_t` : boucle du système après que le jack séquenceur soit enlevé et avant le décollage, renvoie une erreur si la séparation est détectée



`separation()` : `void -> erreur_t` : boucle du système après le décollage, renvoie une erreur si la séparation s'est passée trop tôt ou ne s'est pas déclenchée

`miseAFeu()` : `void -> erreur_t` : envoie les signaux à la carte d'allumage lorsque les conditions de mise à feu sont respectées, renvoie une erreur si la mise à feu ne s'est pas déclenchée

`atterrissage()` : `erreur_t -> void` : gère l'éjection du parachute en fonction de la situation (nominale ou cas d'erreur)

`loop()` : `void -> void` : organise les différentes étapes du code entre elles, force l'arrêt si la séparation est détectée avant le décollage et gère les différents cas d'erreur

`arret()` : `void -> void` : bloque le système dans une boucle infinie, empêchant toute autre action

`ejecterParachute()` : `void -> void` : envoie le signal pour ouvrir la trappe du parachute

`fermerTrappeParachute()` : `void -> void` : envoie le signal pour maintenir la trappe du parachute fermée

`ejecterCansat()` : `void -> void` : envoie le signal pour ouvrir la trappe du cansat

`fermerTrappeCansat()` : `void -> void` : envoie le signal pour maintenir la trappe du cansat fermée

`normAcc()` : `void -> float` : renvoie l'accélération verticale calculée avec les données de la Witmotion

`attitudeNominale()` : `void -> bool` : renvoie un booléen indiquant si la fenêtre d'azimut et d'assiette est respectée (azimut et assiette calculés avec les données de la Witmotion)

## 5.10 Chronologies fonctionnelles des séquenceurs

Cette section présente les chronologies fonctionnelles des codes des séquenceurs. Comme annoncé dans la section sur les chronologies abstraites, il s'agit ici de résumer le fonctionnement du code des séquenceurs, en explicitant les fonctions appelées et les variables utilisées.

### 5.10.1 Chronologie fonctionnelle du code séquenceur de l'étage supérieur

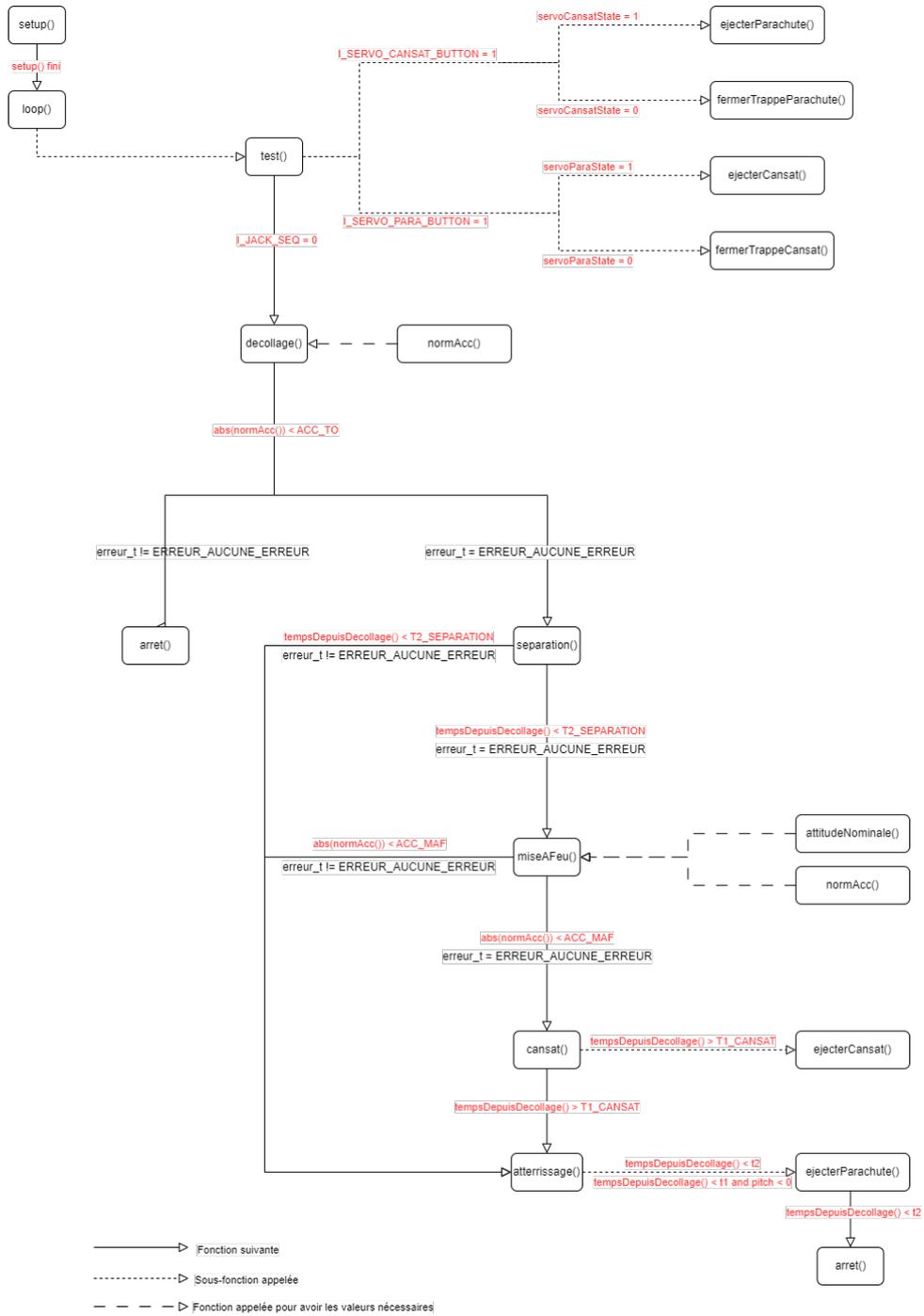


FIGURE 81 – Chronologie fonctionnelle du code séquenceur de l'étage supérieur

### 5.10.2 Chronologie fonctionnelle du code séquenceur de l'étage inférieur

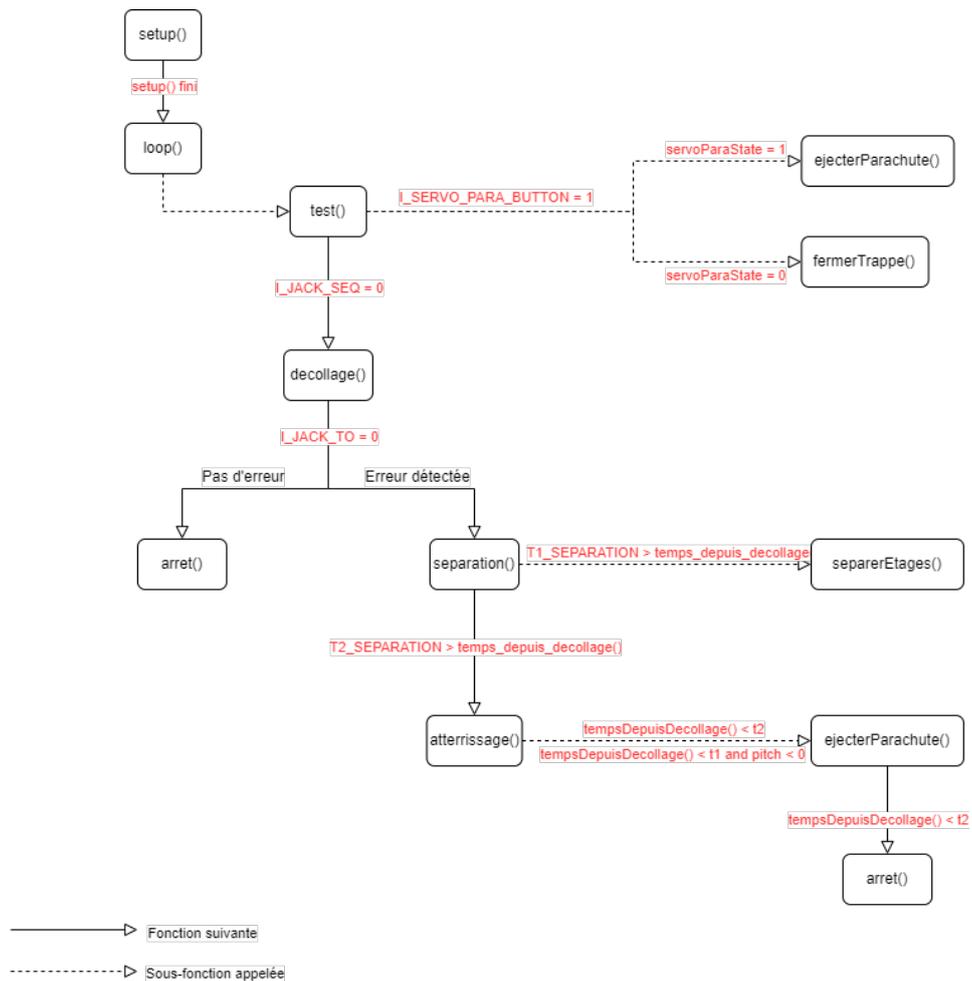


FIGURE 82 – Chronologie fonctionnelle du code séquenceur de l'étage inférieur

## 5.11 Calibration des capteurs

SCALAR-6 embarque deux systèmes de capteurs différents : la carte de navigation WitMotion sur le séquenceur de l'étage supérieur, et la carte Pico 10DOF sur l'expérience de l'étage inférieur.

### 5.11.1 Calibration de la carte de navigation de l'étage supérieur

La WitMotion est calibrée au sol en connectant le module à un port série d'un PC via un adaptateur UART-USB et en utilisant le logiciel fourni par le fabricant. La procédure de calibration de la date, du magnétomètre et de l'accéléromètre est décrite dans le document de référence **REF3**. Le gyroscope ne nécessite pas d'être calibré.

### 5.11.2 Calibration du module Pico 10DOF de l'étage inférieur

Le baromètre **LPS22HBTR** du module Pico 10DOF est calibré en usine et ne nécessite donc aucune autre calibration de la part de l'utilisateur, comme mentionné dans le paragraphe



4.3 de la fiche technique de ce composant (document de référence **REF4**).

L'IMU **MPU9250** du module est calibré en suivant la procédure décrite par le fabricant (Waveshare) dans le document tiré du Wiki du fabricant (document de référence **REF5**).

## 5.12 Détermination de l'attitude de la fusée à partir des capteurs

Cette section décrit les opérations réalisées sur des données brutes de quaternion fournies par la Witmotion afin de calculer l'azimut et l'assiette de la fusée.

### 5.12.1 Normalisation du quaternion

Un quaternion brut ( $qx, qy, qz, qw$ ) doit être normalisé pour représenter une rotation valide. La normalisation consiste à diviser chaque composante par la norme du quaternion.

$$mag = \sqrt{w^2 + x^2 + y^2 + z^2}$$

$$qx/ = mag$$

$$qy/ = mag$$

$$qz/ = mag$$

$$qw/ = mag$$

### 5.12.2 Définition du vecteur "avant" du corps

Le vecteur de référence est l'axe Z local : (0, 0, 1). Ce vecteur représente la direction "nez" du véhicule dans son propre repère.

### 5.12.3 Application de la rotation au vecteur

On convertit le vecteur en quaternion pur ( $w=0$ ) et on applique la rotation.

$$qv = (0, vx, vy, vz)$$

$$q_{conj} = (w, -x, -y, -z)$$

$$q_{res} = q * qv * q_{conj}$$

Le vecteur tourné est donné par ( $q_{res}.x, q_{res}.y, q_{res}.z$ ).

### 5.12.4 Calcul de l'assiette (pitch)

L'assiette correspond à l'angle entre le vecteur tourné et le plan horizontal. Elle est obtenue à partir de la composante Z du vecteur tourné.

$$pitch = \text{asin}(z) \times 180/\pi$$



### 5.12.5 Calcul de l'azimut

L'azimut correspond à l'angle entre la projection du vecteur sur le plan XY et l'axe Nord (Y).

$$\text{azimuth} = \text{atan}(x, y) \times \frac{180}{\pi}$$

Si l'azimut est négatif, ajouter  $360^\circ$  pour obtenir un résultat entre 0 et  $360^\circ$ . Ces opérations permettent de convertir un quaternion brut en angles compréhensibles et exploitables pour le suivi de l'attitude de la fusée.



## 6 Charge utile

### 6.1 Contexte

L'objectif de ce document est de détailler les choix et le processus de développement de la charge utile de la fusée expérimentale bi-étagée dénommée SCALAR-6, devant être lancée à l'occasion du C'Space 2025 à Tarbes. Cette charge utile, baptisée Ardan<sup>1</sup>, est un cansat, c'est-à-dire un mini-satellite de la taille d'une canette, ayant pour objectif d'être lancée à haute altitude afin de réaliser une expérience scientifique. Il a été choisi cette année de réaliser ce Cansat en collaboration avec le programme d'Ouverture Sociale Etudiante (OSE) de Supaéro. Ainsi, nous sommes allés voir, durant l'année scolaire 2024-2025, les collégiens (plus précisément la classe de 4ème<sup>2</sup>) du collège Jules Verne à Carcassonne, afin de leur parler de notre club, de Scalar-6, et de leur expliquer de manière interactive la conception d'un Cansat. Pour que ce Cansat soit concret pour eux, nous avons choisi une expérience simple qui mesure des variables qu'ils connaissent bien : la pression et la température. Nous leur enverrons ces données de vol après le C'Space 2025. Ces données seront mesurées et récupérées durant sa descente sous parachute, après une libération lors de l'apogée atteinte par SCALAR-6.

Remarque sur la collaboration avec les collégiens : Pour des raisons temporelles et matérielles, le Cansat ne peut être réalisée entièrement par les collégiens. En effet, nous ne disposons que de 2 séances (de 3h chacune) avec eux (la première a eu lieu le 9 Janvier, la seconde le 13 Mars). Également, certaines étapes nécessitent de manipuler du matériel avec précaution, et pourrait être dangereuses pour eux, n'ayant pour la plupart jamais bricoler de leur vie. Enfin, l'accès à certains équipements leur est impossible, comme à une imprimante 3D par exemple.

Le principe fut donc le suivant : nous développons l'entièreté du Cansat, ainsi que des tutoriels pour les parties qu'ils sont en mesure de faire, puis lors des séances nous expliquons aux collégiens les étapes importantes du développement du Cansat, en insistant particulièrement sur les étapes qu'ils sont en possibilité de réaliser, en leur laissant expérimenter (même si la contrainte temporelle ne leur permet pas de finir ce qu'ils ont commencé, ils apprennent à réaliser l'action en question et la comprennent).



---

1. En référence au personnage du roman *De la Terre à la Lune*.



## 6.2 Equipe

Le pôle Cansat est constitué de 3 membres :

- Damien Bessède : Responsable du pôle Cansat et de sa sous-partie Structure
- Mehdi Fares : Responsable de la sous-partie Electronique
- Julien Monteiro : Responsable de la sous-partie Parachute

Les 3 membres du pôle ont participé activement à la vulgarisation scientifique auprès des collégiens de Jules Verne, en particulier Julien Monteiro qui a pu assurer la deuxième séance mi-Mars pendant les stages de Damien Bessède et Mehdi Fares.

## 6.3 Architecture Cansat

### 6.3.1 Composants

*Ardan* est composé des éléments suivants :

- Carte principale ESP32-CAM
- Une carte SD de 16Go
- Capteur de pression et température BMP280 [4]
- Batterie LiPo 3,7 Vcc 550 mAh [2]
- Carte de régulation de tension (deux étages buck-boost S7V8A et XL6009) [8]
- Buzzer 12V [3]
- Interrupteur DIP [6]
- Module LoRa WAN (RFM96) [7]
- Un parachute

### 6.3.2 Structure externe

La structure du CanSat est imprimé en 3D à partir de bobines de PLA. Afin de résoudre certains problèmes pratiques et au vu du faible poids du CanSat (petite taille, et creux afin d'accueillir les composants) une approche itérative a été choisie. Plusieurs versions du cansat ont ainsi été réalisés, en vue de converger vers une solution optimale rapidement.

La CAO a été réalisée sur Catia V5 (cf. section **CAO Cansat**). Nous utilisons les imprimantes 3D du Fablab de l'ISAE-Supaéro pour imprimer nos pièces, en passant par le logiciel Bambu Studio.



FIGURE 83 – Modèle 3D sur Bambu Studio, Impression dans une Bambu Lab, Résultat d'impression

## 6.4 Électronique

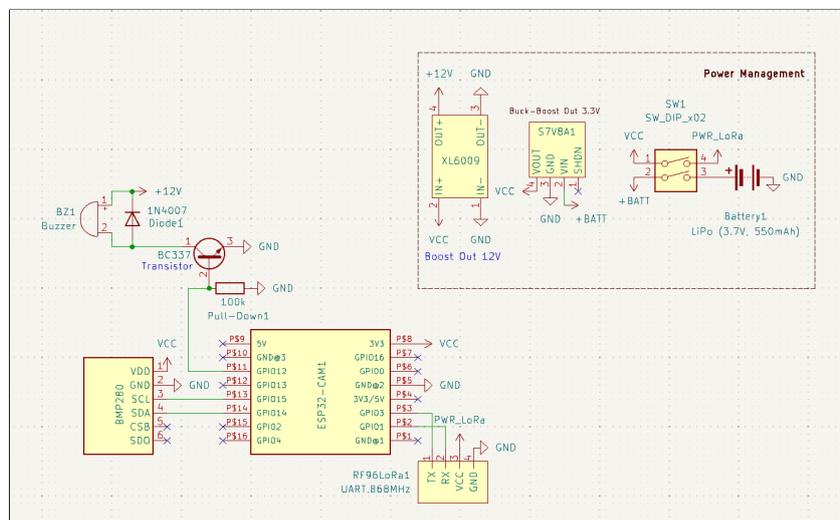


FIGURE 84 – Schéma de l'électronique à bord du cantsat

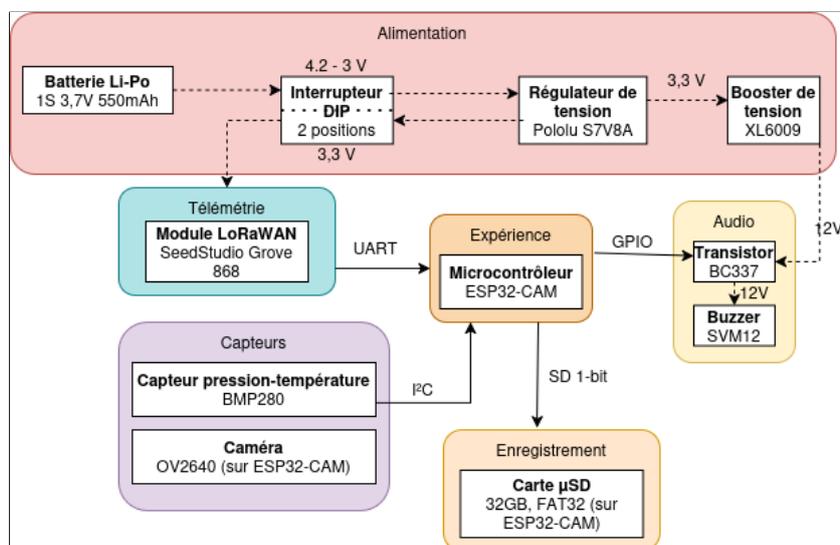


FIGURE 85 – Synoptique de l'électronique à bord du cantsat



FIGURE 86 – Tests électroniques

L'alimentation du cansat est assurée par une batterie LiPo d'une cellule de capacité de 550mAh. La tension nominale de la batterie Li-Po est de 3,7V. Pour assurer une sortie en 3,3V pour la majorité de l'électronique, un convertisseur *buck-boost* (S7V8A) est utilisé. Prenant en entrée une tension entre 2,5 et 8V, largement au-delà de l'intervalle de 3 à 4,2V de la tension de la batterie.

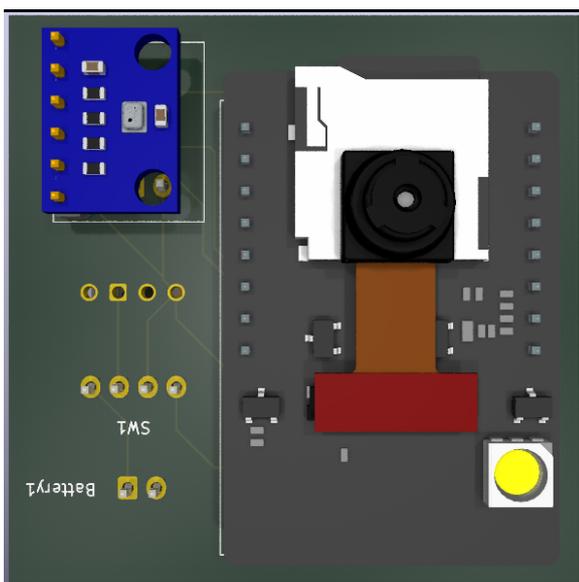
Le buzzer est le seul composant électronique qui ne prend pas en entrée une tension de 3,3V, l'architecture utilise un convertisseur *boost* (XL6009) permettant d'élever la tension de 3,3V en 12V. Une diode (1N4007) est utilisée pour bloquer le retour de l'inductance du buzzer.

Le BMP280 communique avec l'ESP32 en I<sup>2</sup>C et le module LoRa-WAN en UART. Un pin de l'ESP32 est utilisé pour contrôler l'allumage du buzzer à travers un transistor (BC337-25) relié à une résistance pull-down de 100k $\Omega$  pour assurer un état *LOW* en général. Le buzzer est activé au moment de l'atterrissage du cansat.

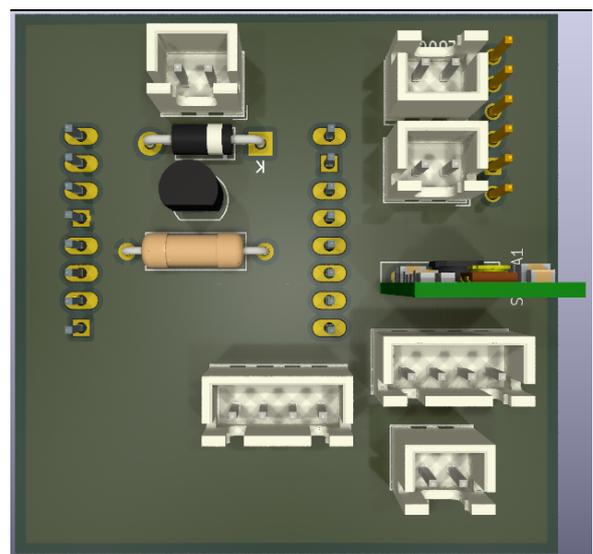
La consommation maximale du dispositif est de 245 milliampères :

- ESP32-CAM en prise d'image : pic de consommation à 200mA@3,3V
- Consommation négligeable du BMP280 (2,7 $\mu$ A)
- Module LoRa : 30mA@3,3V en émission
- Buzzer : 15mA@12V en utilisation

La batterie permet donc un fonctionnement durant 2 heures.



(a) Avant de la carte.



(b) Arrière de la carte.

FIGURE 87 – Vue avant et arrière de la carte.

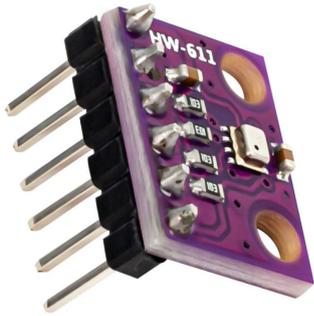


FIGURE 88 – Module BMP280



FIGURE 89 – ESP32CAM

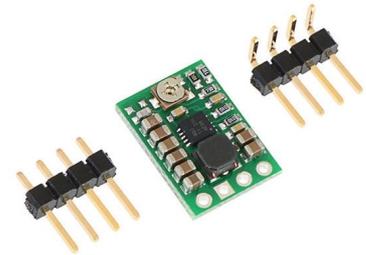


FIGURE 90 – Module S7V8A



FIGURE 91 – XL6009



FIGURE 92 – Module LoRaWAN

### 6.4.1 Tests sur platine de prototypage

- Test des régulateurs de tension : utilisation des potentiomètres pour régler leur sortie, mesures au multimètre pour s'assurer au premier ordre d'un bon output, puis à l'oscillo pour caractériser le bruit/les imperfections
- Alimentation de l'ESP32-CAM seule, code initial de clignotage du flash pour s'assurer du bon fonctionnement.
- Inclusion des périphériques 1 à 1 en commençant par un code de test propre à chaque périphérique puis un code les utilisant tous (ce code là deviens au final le code de vol)
- Debug si nécessaire et vérification des tensions I/O au multimètre/à l'oscillo.

Une fois le prototypage terminé, nous avons pu commencer à travailler sur un design de PCB, selon les contraintes mécaniques (voir CAO). Pour la conception du schéma électronique et du PCB, le logiciel open source *KiCad* est utilisé, selon le workflow suivant : Schéma électronique -> PCB (design préliminaire 2D) -> *GrabCAD/SnapEDA* -> Modèle 3D

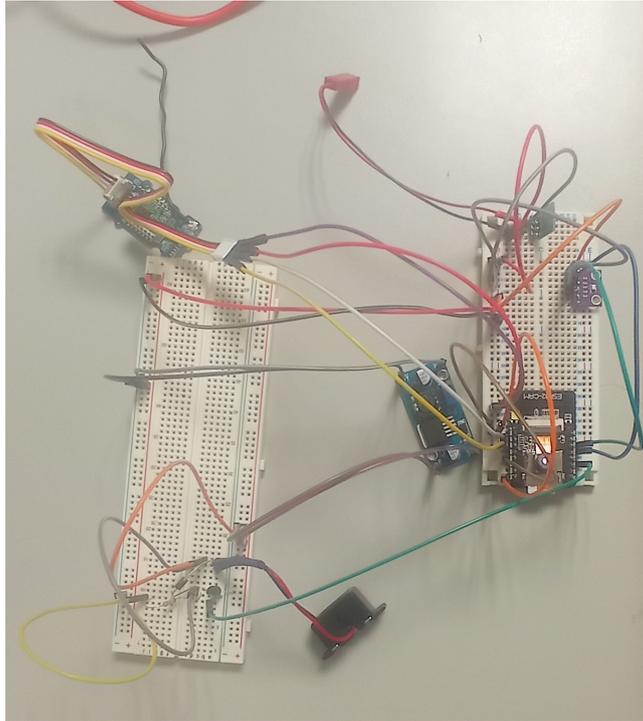


FIGURE 93 – Montage final sur platine

#### 6.4.2 Subtilités (*Hacks*)

- Le chargeur de la batterie possède un connecteur avec une polarité inversée par rapport à la batterie. On a donc utilisé deux câbles Dupont pour y connecter la batterie.
- Les régulateurs de tension sont commandés par des potentiomètres à ajuster pour obtenir la tension désirée.
- Le BMP280 prends plus de 100 millisecondes à s'initialiser et est sur une adresse I<sup>2</sup>C particulière (0x76, trouvable par scan des adresses)
- La carte  $\mu$ SD est accédée en mode 1-bit, permettant de libérer les pins 12 et 13 de l'ESP32-CAM.

### 6.5 Logiciel

Dans un but pédagogique, la programmation du microcontrôleur a été faite dans un système par blocs (similaire à *Scratch*). Nous avons eu recours au *BIPES Project* [1], permettant d'utiliser des blocs pour programmer l'ESP32, en utilisant du MicroPython pour l'interprétation. Pour utiliser la caméra de l'ESP32-CAM avec MicroPython, il est nécessaire de compiler et installer sur la carte un nouveau firmware, possédant le module Python pour la caméra. Pour que ce firmware soit compatible avec BIPES, nous avons utilisé le travail de Sharil Tumin [5]. Enfin, le module BMP280 et le module LoRa WAN peuvent être utilisés directement par BIPES, à travers des bibliothèques Python s'installant à travers l'interface web.



L'utilisation d'autant de fonctionnalités atteint cependant ses limites avec MicroPython et nous avons donc dû recourir à un code en langage *C++* pour éviter des instabilités.

Le code utilisé pour faire fonctionner le dispositif doit permettre de détecter la phase de décollage de la fusée ainsi que le largage du cansat. Cela est fait en utilisant le capteur de pression, qui permet de détecter l'altitude. Ainsi, une forte baisse de pression indique une montée, et inversement. Lors de la phase de descente, la pression, la température, et une image prise par la caméra sont enregistrées périodiquement sur la carte SD, et les mesures de pression et de température transmises au sol par le module LoRa.

Le code de vol doit composer avec une limitation notable de la plateforme ESP32-CAM : la saturation des bus du microcontrôleur. En effet, entre la caméra et la carte SD, les entrées/sorties de l'ESP32 possèdent peu de disponibilités. Il a donc été choisi de tour à tour activer puis désactiver chaque composant, à chaque ,en sauvegardant d'abord en mémoire vive leur sortie, afin de réaliser les mesures et la captation d'images.

Le code est disponible sur le dépôt *GitHub* suivant : Ardan-Cansat.

L'organisation du code est la suivante :

- Import des bibliothèques
- Définition des variables globales
- Définition des fonctions d'initialisation et de déinitialisation de chaque composant
- Définition des fonctions utilitaires (écriture en carte SD et transmission par LoRa des mesures, détection de chute et d'atterrissage)
- Définition des fonctions de captation des données et de mise en veille de l'ESP32
- "void setup"
- "void loop"

Le code de la boucle suit la temporalité de la mission :

- Une première phase (pré-éjection) va périodiquement faire une estimation de l'altitude et de la vitesse du cansat. Si l'altitude commence à baisser assez rapidement (selon un seuil défini à partir des vitesses de chute attendues), le code passe à la boucle suivante.
- Tant que le cansat n'est pas au sol des mesures de pression et de températures ainsi qu'une estimation de l'altitude vont périodiquement être réalisées, sauvegardées dans un fichier *csv* stocké sur la carte  $\mu$ SD et émises en LoRaWAN. Une photo à l'instant de la mesure est aussi faite, elle est aussi stockée sur la carte SD.
- Une fois le cansat au sol (détection par altitude constante pendant quelques secondes), le pin contrôlant le transistor est mis en *HIGH* et l'ESP32 est mis en sommeil profond.

## 6.6 Télémétrie

Le module LoRaWAN à bord du cansat transmettra les données jusqu'à un second module LoRaWAN au niveau de la station sol, connecté à un Arduino Uno connecté à un ordinateur, où nous pourrions suivre l'évolution en direct via la sortie série.

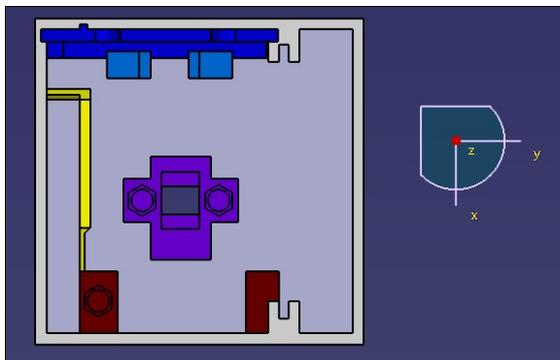
Les deux modules sont identiques, émettent et reçoivent à 868MHz, fréquence libre en Union Européenne. Ils ont un gain de 20dBm pour une consommation maximale de 20mW en émission.

Un test de portée du système doit être effectué avec le système complet assemblé. La portée mesurée devrait être de l'ordre du kilomètre

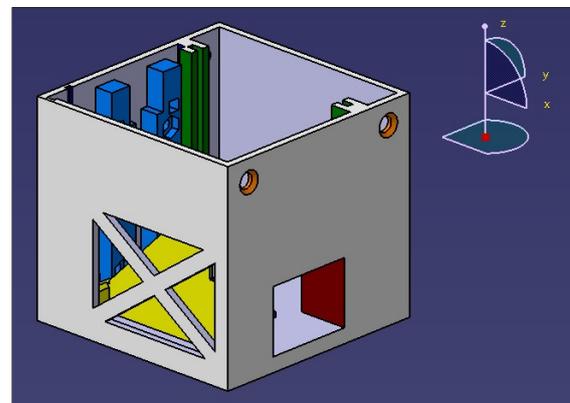
## 6.7 CAO Cansat

### 6.7.1 Pièce inférieure

La structure du Cansat est composée de 4 pièces conçues par CAO sur Catia V5, puis imprimée en 3D en PLA, permettant à la structure totale du Cansat de former un cube de 6cm de côté. Le poids de la structure du cansat étant faible (60g d'impression au total) et le temps d'impression étant faible, la conception en CAO a suivi une méthode itérative.



(a) Côté Buzzer



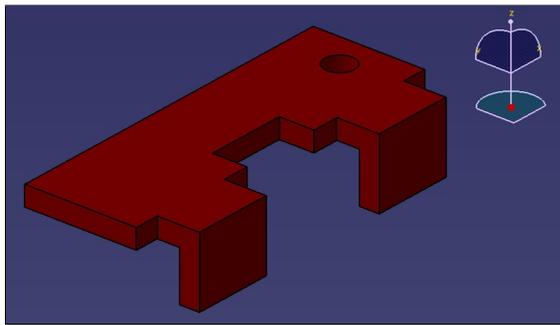
(b) Côté Batterie

FIGURE 94 – Différentes faces de la partie inférieure du Cansat

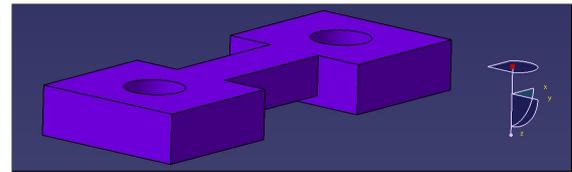
Voici une vue de haut (Gauche) de l'intérieur du CANSAT ainsi qu'une vue isométrique de l'extérieur de celui-ci. Nous pouvons y voir le logement batterie, le logement pour la LoraWan, le support de l'amplificateur de tension, le logement pour l'interrupteur, les supports du buzzer, ainsi que le compartiment abritant la carte de prototypage.

### 6.7.2 Pièces de fixation

Le Buzzer est fixé via d'une part un blocage par le logement interrupteur et la pièce en L de fixation du buzzer, venant se visser (M2,5) par le haut.



(a) Fixation Buzzer

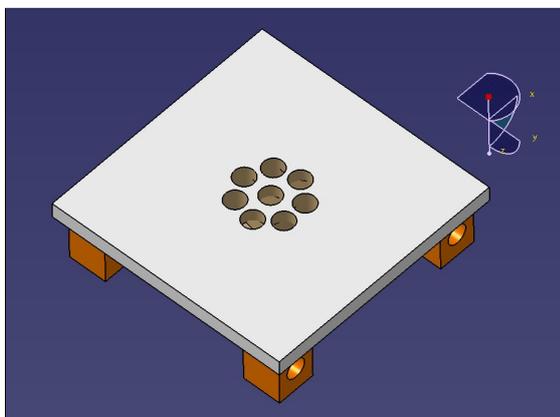


(b) Fixation Interrupteur

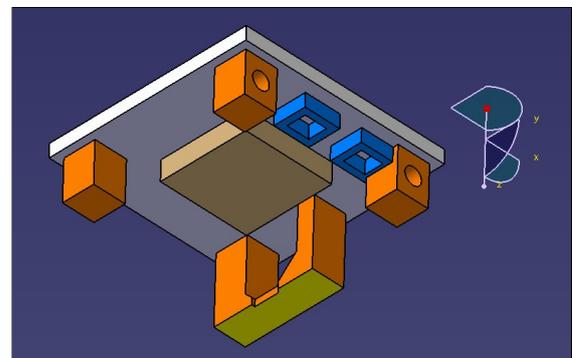
FIGURE 95 – Pièces de fixation

### 6.7.3 Pièce supérieure

Le Cansat possède évidemment une partie supérieure, permettant d'isoler l'intérieur de l'extérieur. Sur la face supérieure, il y a 8 trous permettant de fixer solidement la paracorde au Cansat. Sur la face inférieure, nous avons : une extrusion permettant de refermer le compartiment batterie, 4 extrusions où des inserts (M4) placés, permettant de visser la partie inférieure du cansat à la partie supérieure. 2 autres petites extrusions permettent de maintenir droit les supports de l'amplificateur de tension.



(a) côté buzzer



(b) côté batterie

FIGURE 96 – Différentes faces de la partie inférieure du Cansat

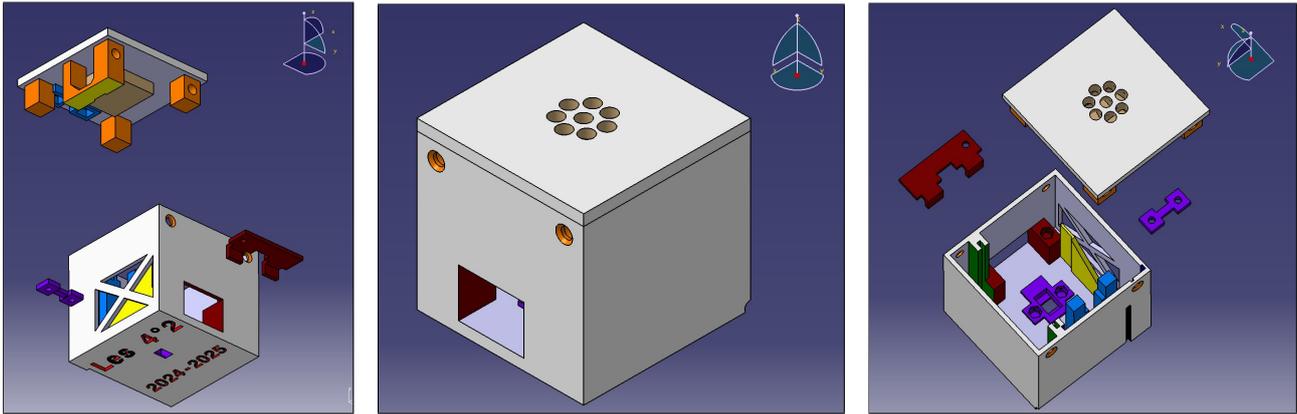
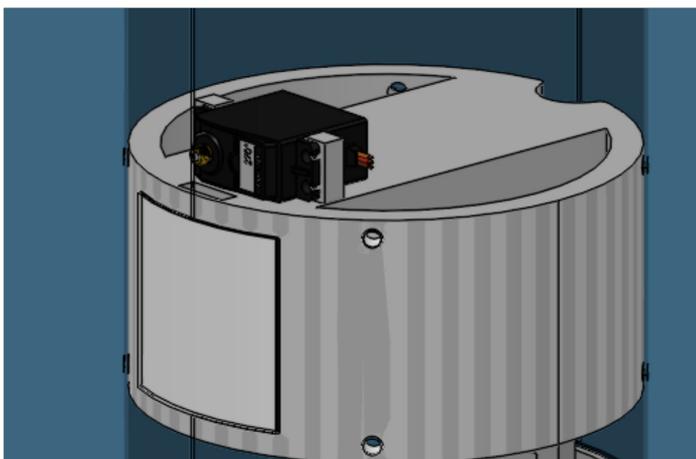


FIGURE 97 – Voici 2 vues explosés de la structure du Cansat, ainsi qu’une vue isométrique assemblé

## 6.8 Parachute

### 6.8.1 Intérêt

Le parachute est un élément clé du Cansat, lui permettant de retomber au sol ni trop rapidement (ce qui l’endommagerait), ni trop lentement (ce qui le ferait dériver au vent et l’emporterait loin du pas de tir, rendant impossible sa récupération physique). Le Cansat est initialement situé dans le haut de la fusée, juste sous la coiffe, dans le compartiment d’éjection Cansat. Il y est continuellement poussé par un ressort contre une trappe, qui s’ouvre par l’action d’un servomoteur quand la fusée a atteint son apogée. Le parachute est relié à la structure du Cansat par 8 ficelles attachées à un émerillon, lui-même relié à de la paracorde solidement attachée à la partie supérieure du Cansat via un système de trous permettant de nouer la corde.



(a) Compartiment d’éjection Cansat



(b) Accroche parachute

FIGURE 98 – Systèmes relatifs au parachute

### 6.8.2 Conception

Pour concevoir le parachute du Cansat de SCALAR 6, nous avons utilisé la même méthode que le parachute des fusées SPARROW (projet d'initiation de la Supaéro Space Section consistant à envoyer des micro-fusées lancées depuis l'aérodrome de Bourg-Saint-Bernard en janvier). Nous avons tout d'abord coupé en rectangle deux morceaux de tissus de dimensions égales (16cm x 48cm), dans le but d'avoir un parachute en forme de croix. La surface totale du parachute est donc  $S = 5 \cdot 16 \cdot 16 \text{ cm}^2 = 1280 \text{ cm}^2$ . Sur chaque côté, nous avons cousu les bords du tissu, en utilisant une machine à coudre, afin d'y renforcer ces endroits. Par la suite, nous avons placé et cousu les rectangles entre eux pour former une croix. Ensuite, sur chaque coin extérieur de la croix, nous les avons renforcés avec des bouts de tissu, afin de pouvoir mettre une corde sur chacun d'eux. Enfin, nous avons utilisé un émerillon et de la paracorde pour attacher le parachute au Cansat.



(a) Conception du parachute



(b) Parachute en croix

FIGURE 99 – Conception du parachute en croix à l'Innovspace

A l'origine du projet, nous avons estimé la masse du cansat à 300g, c'est sur ce critère que nous avons dimensionné le parachute, en visant une vitesse de chute  $V=7\text{m/s}$ , et en prenant comme coefficient de traînée  $C_d = 0,8$ . Cependant, le poids du Cansat sera au final de 150g, à quelques grammes près. Au vu du changement de poids du Cansat, nous avons réalisé un second parachute afin de toujours correspondre aux attentes de vitesse de chute du Cansat. Pour ce faire, nous avons découpé deux bandes rectangulaires de tissus de  $10.5 \text{ cm} \times 31.5 \text{ cm} = 330.75 \text{ cm}^2$ . Puis, nous avons suivi la même méthode que décrite pour le premier parachute du Cansat. La surface totale de ce second parachute est de  $551.25 \text{ cm}^2$ .

## 6.9 Organisation

L'objectif était de permettre aux collégiens de comprendre la conception d'un cansat tout en les faisant participer. Nous avons donc choisi, afin de simplifier sa conception, un capteur simple : un BMP280 qui mesure la pression et la température (grandeur compréhensible pour les collégiens). Nous avons pour cela deux séances, chacune de 2h. L'objectif n'était donc pas de

concevoir de A à Z le Cansat avec eux, mais plutôt de leur expliquer et de leur faire commencer à réaliser chaque étape qu'il pouvait faire.

### 6.9.1 1ère séance : 9 Janvier 2025

Durant cette première séance, nous avons pu diviser la classe de collégiens (classe de 30 élèves, principalement des 4ième, mais également quelques 3ième) en deux groupes équitables. Un groupe a pu apprendre la conception et le dimensionnement du parachute, découpe de celui-ci, couture, programmation sous Scratch de la plupart du code, directement traduits via un logiciel en Micro-Python.

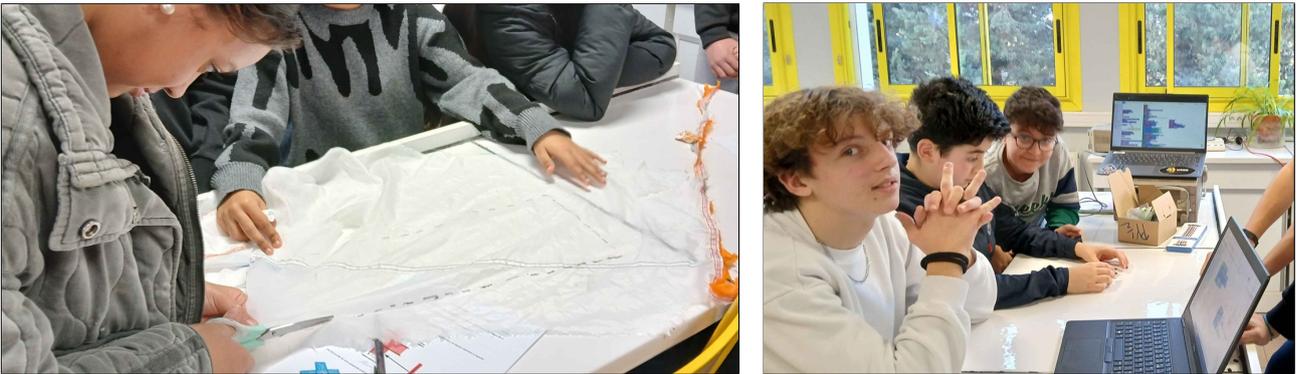


FIGURE 100 – A gauche : Activité Parachute, A droite : Activité Code

Pour les guider dans la réalisation de leurs tâches, nous leur avons fourni une feuille recto-verso récapitulative avec les notions importantes ainsi que les différentes étapes clés qu'ils doivent suivre afin de pouvoir réaliser les tâches de leur groupe respectif. Voici ci-dessous ces feuilles :

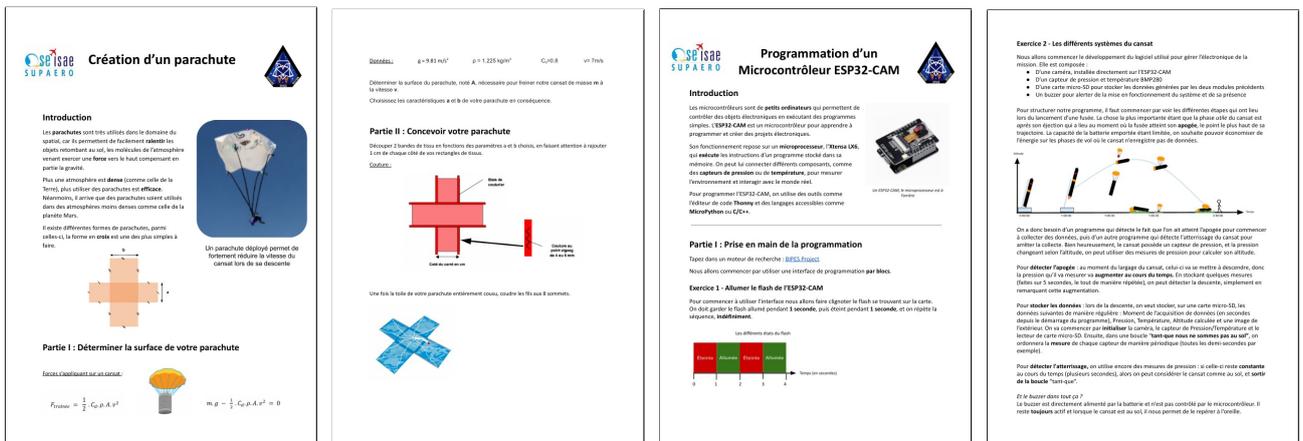


FIGURE 101 – Fiches guides pour l'activité parachute et code

### 6.9.2 Entre les 2 séances

Entre la première et la seconde séance, nous nous sommes chargés de reprendre le parachute, finir le code sous MicroPython, souder les composants, réaliser les premières versions du modèle CAO du cansat.

### 6.9.3 2ième séance : 13 Mars 2025

La seconde séance du projet a eu lieu le Jeudi 13 Mars 2025. Cette séance a été articulée autour du projet SCALAR 6 et de son CANSAT. Nous avons fait un rappel du projet SCALAR 6 pour que les élèves ne soient pas perdus et puissent connaître son avancement. Ensuite, un rappel a été fait sur le CANSAT de la fusée SCALAR 6, avant de nous pencher sur les composants électroniques de celui-ci. Enfin, les élèves ont dû se répartir en petit groupe afin de réfléchir à plusieurs sur des activités.

Lors de la première activité, les élèves ont eu la possibilité d'observer, de reconnaître, et de comprendre l'utilité de chacun des composants du CANSAT. Pour cela, ils avaient à disposition les composants électroniques du CANSAT.

Lors de la seconde activité, les élèves ont essayé de trouver l'emplacement de chaque composant afin de pouvoir assembler entièrement le CANSAT. Pour les aider, chaque groupe disposait d'un boîtier imprimé en PLA qui sera la structure du CANSAT, et contenant l'ensemble des composants, ainsi que la possibilité de tester plusieurs combinaisons pour trouver l'emplacement de chaque composant électronique.

Lors de la dernière activité, les élèves ont dû réfléchir à l'ordre d'assemblage des composants. En effet, certains composants ont besoin d'être placés en premier pour pouvoir en placer d'autres.

### 6.9.4 Après la 2ième séance



Après cette seconde séance, nous avons amélioré le code en passant le langage de programmation de MicroPython à C. Le C étant un langage compilé et non interprété comme Python, nous y gagnons en temps d'exécution. Nous avons réaliser les premiers test sur le cansat (cf. section **Test Cansat**). La CAO est terminée.

Les tests électroniques sont terminées. Nous avons assemblé une version préliminaire du Cansat pour vérifier une dernière fois qu'aucune modification sur la CAO n'était nécessaire.

## 6.10 Structure assemblée

Nous avons décidés peu avant le C'Space d'abandonner l'idée d'une électronique "fait maison" sur plaque à pastilles, cette dernière impliquant une densité de câbles Dupont importante,

rendant l'assemblage compliqué. Nous avons donc optés pour une option plus "propre" et professionnelle, en utilisant une PCB.

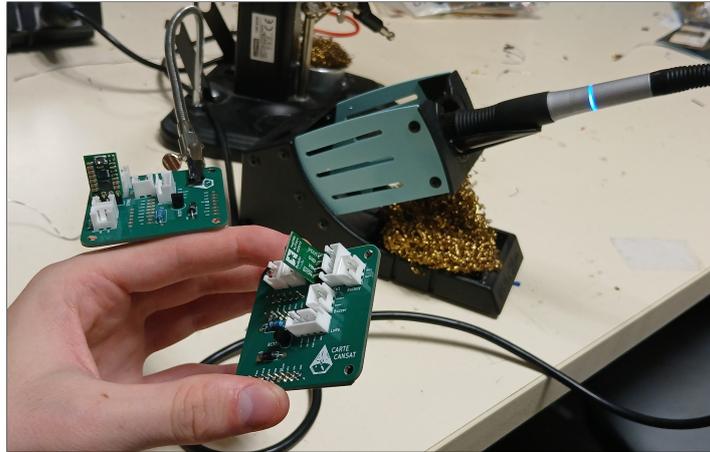


FIGURE 102 – Composants soudés sur la PCB

Ce choix a fortement réduit le nombre de câbles Dupont à utiliser, et a permis de satisfaire notre exigence de compacité, mais nous a forcé à procéder à l'assemblage final la veille du départ au C'Space, à cause des délais de réception de la PCB.

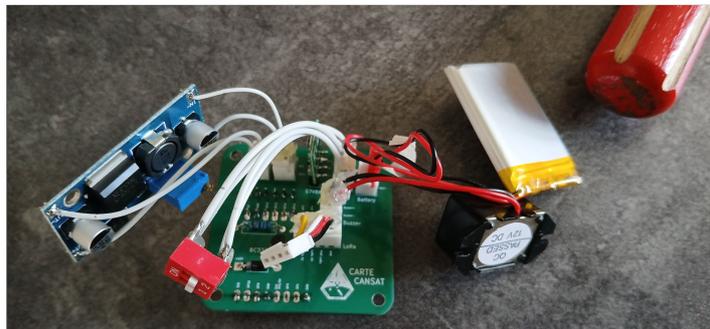


FIGURE 103 – Assemblage de tous les composants sur la PCB

Le club visant un potentiel vol en bi-étagée actif, et ne possédant pas de module GPS pour retrouver le CANSAT, nous disposions d'une spare (double du Cansat) en cas de perte lors du vol en bi-étagée passif. La veille du C'Space, la spare ne répondait pas bien, mais l'électronique prévue pour le 1er vol ainsi que la télémétrie fonctionnaient parfaitement que ce soit la caméra ou encore le capteur de pression et température).

Néanmoins, dès le 1er jour du C'Space, la spare nous a lâchée (0V aux bornes de tous les composants) et la carte principale avait des tensions d'entrées insuffisantes au niveau de la BMP et de l'ESP-32 CAM, ne permettant pas au code interne de s'exécuter. Après de nombreuses tentatives pour récupérer une carte viable lors des premiers jours du C'Space, et voyant que certains autres composants commençaient à lâcher (dont la télémétrie, qui ne fonctionnait plus), dans un contexte de manque de moteurs lors du C'Space, avec une politique du "1er qualifié,

1er servi", Damien a décidé que le Cansat volerait inactif. Ce choix permettant de ne pas perdre de temps à essayer de sauver le Cansat, tout en facilitant la qualification de la fusée, qui aurait pu ne pas recevoir de moteur si qualifiée trop tard.

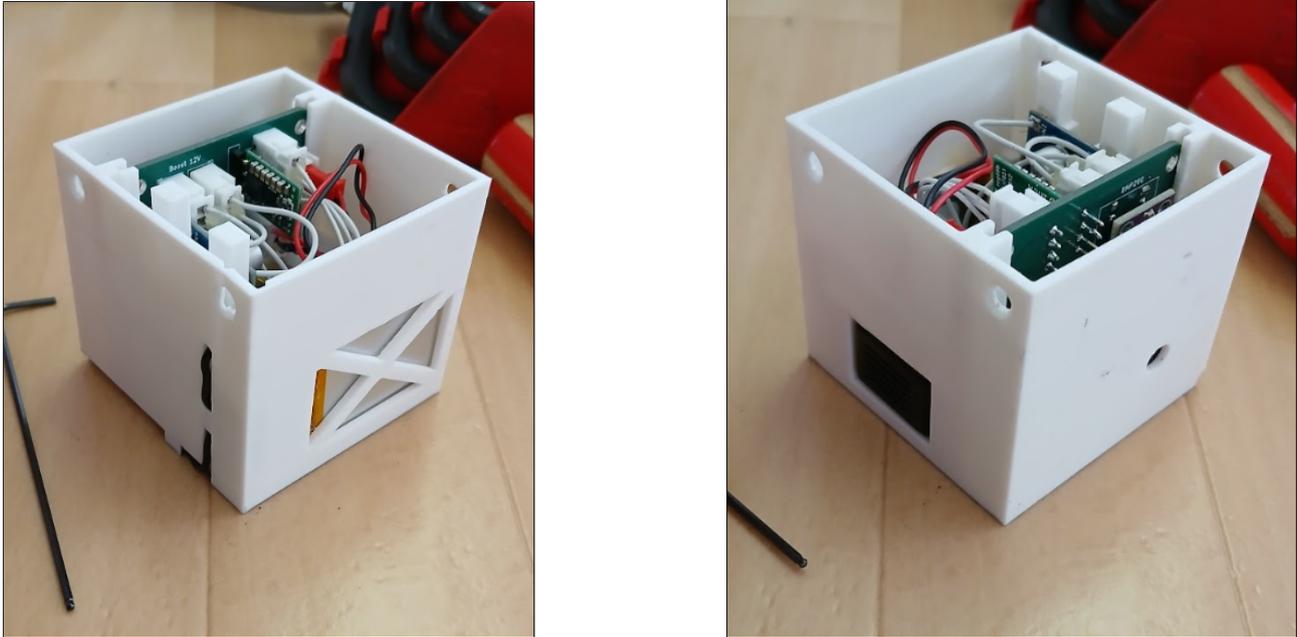


FIGURE 104 – Cansat assemblé

Ce choix, bien qu'impliquant que le travail accompli ne porterait pas ses fruits, n'est pas regrettable pour autant, puisque Scalar-6 a pu recevoir le dernier moteur Pro-54 du C'Space. Même si le Cansat avait pu être "sauvé", sans télémétrie active, nous n'aurions de toute manière pas pu récupérer de données, l'étage supérieur n'ayant pas éjecté le Cansat, avant d'effectuer un rendez-vous balistique avec le sol.

## 6.11 Test Cansat

### 6.11.1 Test du comportement du Cansat et mesure du coefficient de traînée $C_d$

Nous avons décidé, bien en amont de la RCE3, de tester notre Cansat (sans composants électroniques à l'intérieur) afin de vérifier le bon comportement lorsque celui-ci sera largué de la fusée.

Pour simuler le poids avec composants du Cansat, nous l'avons rempli de petits cailloux, et avons fait 2 séries de test : une pour une masse totale de 150g (très proche du poids final de notre Cansat), et une pour une masse de 200g (on ne pouvait pas faire plus, le Cansat étant alors rempli de cailloux). Puisque le parachute utilisé avait une surface surestimée (conçu originellement pour un Cansat de masse  $m=300g$ ) l'objectif n'était pas en premier lieu de



vérifier la résistance du Cansat au choc à 7m/s (vitesse de chute et donc d'impact souhaité) mais surtout de s'assurer du bon déploiement du parachute ainsi que de déterminer plus précisément le coefficient de traînée (d'abord estimé à 0.8 d'après un document de Planètes Sciences).

Pour déterminer la hauteur de chute de notre Cansat, l'ayant fait depuis le haut d'un escalier à côté d'une des résidences de Supaéro, une des méthodes les plus précises a été de mesurer la hauteur d'une marche (celles-ci ayant chacune la même hauteur, par standardisation et réglementation), et de multiplier par le nombre de marches, puis de rajouter la hauteur à laquelle nous lâchions le Cansat depuis le dernier étage. La hauteur trouvée est de 12,35m.

Voici les résultats de nos différentes expériences, en utilisant des incertitudes de type A :

Résultats chutes cansat		
n° lancer	m=150g	m=200g
1	$t_f = 3,07s$	$t_f = 2,64s$
2	$t_f = 3,01s$	$t_f = 2,64s$
3	$t_f = 3,05s$	$t_f = 2,77s$
4	$t_f = 2,95s$	$t_f = 2,79s$
5	////////////////////	$t_f = 2,83s$
Résultats	$t_f = 3,02 \pm 0,03s$	$t_f = 2,73 \pm 0,04s$

L'équation du mouvement nous donne cette équation non linéaire du premier ordre :

$$\frac{dv}{dt} = -g + \frac{C_d \rho S}{2m} v^2$$

Pour résoudre cette équation non linéaire et déterminer le temps de chute, nous pouvons écrire un script python et appliquer une résolution itérative via la méthode de Newton-Raphson :

```
1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 # --- Constantes physiques ---
5 g = 9.81 # gravite (m/s**2)
6 Cd = 0.9 # coefficient de trainee (a ajuster selon le
   parachute)
7 rho = 1.225 # densite de l'air (kg/m**3)
8 A = 0.128 # aire du parachute (m**2)
9 m = 0.15 # masse de l'objet (kg)
10 z0 = 12.35 # hauteur initiale (m)
11
12 # --- Parametres de la simulation ---
13 dt = 0.01 # pas de temps (s)
```



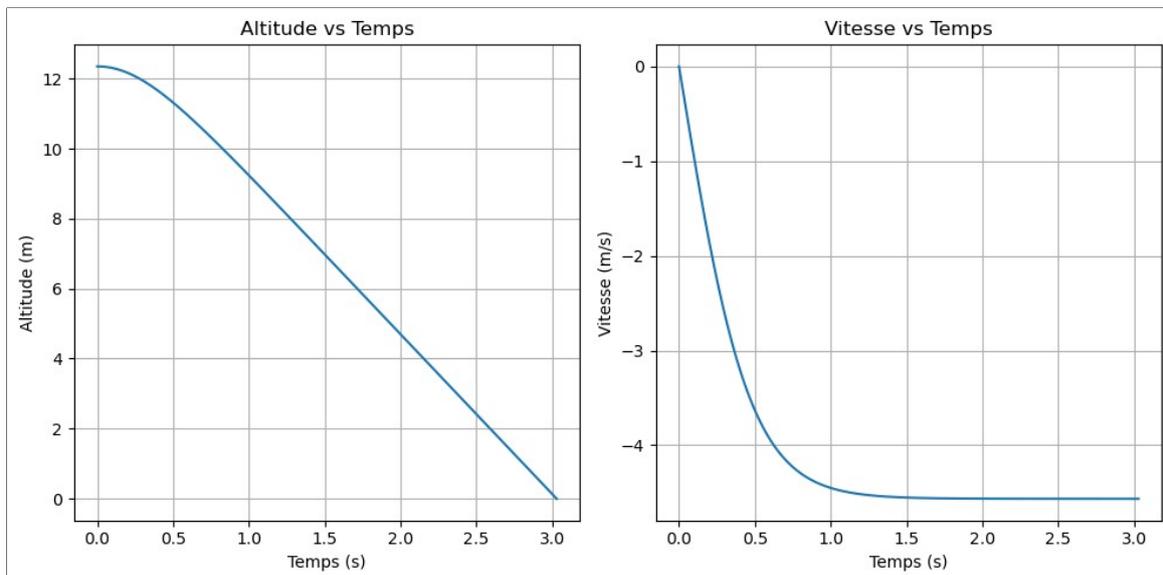
```
14 t_max = 30 # duree maximale de simulation (s)
15
16 # --- Initialisation ---
17 t = [0] # liste des temps
18 z = [z0] # liste des positions
19 v = [0] # liste des vitesses
20
21 # --- Simulation (Methode d'Euler explicite) ---
22 while z[-1] > 0 and t[-1] < t_max:
23     v_current = v[-1]
24     z_current = z[-1]
25
26     # Calcul de l'acceleration instantanee
27     F_drag = 0.5 * Cd * rho * A * v_current**2
28     a = -g + (F_drag / m)
29
30     # Mise a jour vitesse et position
31     v_new = v_current + a * dt
32     z_new = z_current + v_current * dt
33
34     # Sauvegarde
35     v.append(v_new)
36     z.append(z_new)
37     t.append(t[-1] + dt)
38
39 # --- Resultats ---
40 print(f"Temps de chute : {t[-1]:.2f} secondes")
41 print(f"Vitesse d'impact : {v[-1]:.2f} m/s")
42
43 # --- Affichage ---
44 plt.figure(figsize=(10,5))
45
46 plt.subplot(1,2,1)
47 plt.plot(t, z)
48 plt.xlabel("Temps (s)")
49 plt.ylabel("Altitude (m)")
50 plt.title("Altitude vs Temps")
51 plt.grid()
52
53 plt.subplot(1,2,2)
54 plt.plot(t, v)
55 plt.xlabel("Temps (s)")
56 plt.ylabel("Vitesse (m/s)")
57 plt.title("Vitesse vs Temps")
58 plt.grid()
59
```

```

60 plt.tight_layout()
61 plt.show()
    
```

Listing 1 – Python example

En utilisant le script python avec  $C_d = 0,8$ , nous trouvons des valeurs de temps de chute  $t_f$  inférieures dans les 2 cas à ce que nous avons trouvé expérimentalement. Évidemment, cela peut venir de notre façon de chronométrer, mais nous avons décidé de considérer que cette différence était due à une mauvaise estimation du coefficient de traînée. En effet, nous retrouvons un temps de chute similaire en prenant  $C_d = 0,9$ . Voici par exemple les graphiques que notre script Python nous retourne pour un cansat de masse  $m=150g$  :


 FIGURE 105 – Evolution de l’altitude et de la vitesse du cansat en fonction du temps, pour  $C_d = 0.9$ 

Ainsi, afin de calculer la surface du parachute final (dimensionner pour une masse du cansat de 150g), nous avons utilisé ce nouveau coefficient de traînée, afin de nous rapprocher de nos observations expérimentales. Ainsi, on trouve un parachute en croix composés de 2 rectangles de tissus mesurant  $10,5 \times 31,5 \text{ cm}^2$  de surface utile.

### 6.11.2 Test de la résistance du Cansat

En parallèle du test de chute du cansat pour mesurer le coefficient  $C_d$ , nous avons évidemment évalué la résistance structurelle du Cansat. En cas de chute avec le parachute (donc avec une vitesse de chute de l’ordre de 4,5m/s, le parachute utilisé étant surdimensionné), le cansat arrive intact au sol.

Un second Cansat, issu d’une précédente itération mais présentant pratiquement la même structure à quelques détails mineurs près, a ensuite été utilisé. D’abord dans le cas d’une chute libre (vitesse finale de l’ordre de 15m/s), où le Cansat s’est légèrement abimé, sans dégâts

majeur. Puis, un dernier test a été effectué, en lançant le Cansat vers le sol (vitesse finale difficile à estimer, mais dans tous les cas  $>$  à 15m/s), et le Cansat s'est fracturé à l'impact.

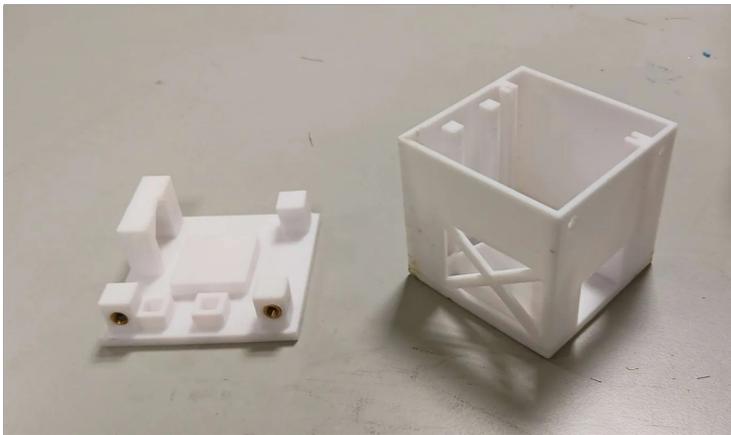


FIGURE 106 – Test de résistance avec parachute

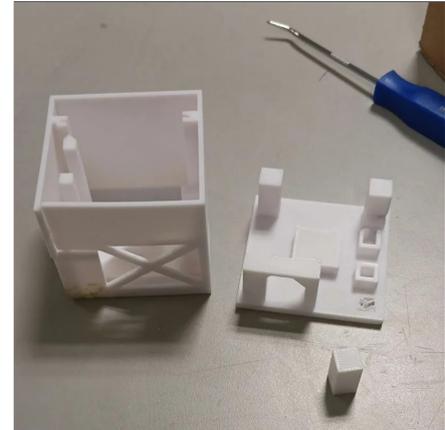


FIGURE 107 – Test de résistance sans parachute

FIGURE 108 – État structurel des cansats testés avec/sans parachute

### 6.11.3 Test de l'autonomie réelle de la batterie

Afin de vérifier que la batterie nous offre une autonomie d'au moins 2h comme prévue théoriquement (le courant maximal étant de 245mA, et la capacité de la batterie de 550mA), nous avons fait un test d'autonomie en chargeant la batterie au maximum et en faisant fonctionner le module jusqu'à ce que celle-ci soit entièrement vidée. Nous avons obtenu une autonomie supérieure à 2h, néanmoins, le jour J, il est possible (et même très probable) que l'autonomie réelle soit plus courte, car Scalar-6 sera exposée au Soleil pendant plusieurs dizaines de minutes avant de décoller. Nous n'avons pas réalisé de tests d'autonomie en prenant en compte cette surchauffe.

### 6.11.4 Test de la détection de chute du Cansat

Afin de s'assurer de manière presque certaine de la bonne détection de la chute du Cansat (i.e le moment à partir duquel les données sont enregistrées et transmises à la station sol), nous avons réalisé un test de la détection de chute du Cansat. N'ayant malheureusement pas le privilège de lâcher notre cansat depuis le sommet du Burj Khalifa pour simuler l'apogée de Scalar-6 en mono-étage, nous nous sommes contentés de simplifier la condition de détection de manière à ce que le test reste possible. Cette modification inclue une diminution de la vitesse seuil de détection de chute, donc un critère plus facilement atteignable, mais qui donc peu induire plus de faux-positif potentiel. L'objectif de ce test était donc de tester si tout d'abord, la chute était bien détectée (si cela n'est pas le cas, la chute étant plus facilement détectable qu'en condition réelle, alors cela indiquerait qu'il faille procéder à des modifications).



## 7 Compte rendu de vol

### 7.1 Campagne de lancement

Le C'Space 2025 s'est déroulé du 5 au 11 juillet. Cette édition a été marquée par une difficulté particulière : la pénurie de moteurs PRO75. Sur dix équipes présentes, seules cinq ont pu s'en procurer un. Les qualifications se sont donc déroulées dans un climat de tension, accentué par la compétition entre équipes.

Notre objectif initial était de **lancer SCALAR-6 en bi-étagé actif**. Toutefois, face aux contraintes matérielles et au temps limité, nous avons dû revoir nos ambitions. En particulier, l'absence d'événements sur la peau carbone rendait impossible un vol actif. Nous avons rapidement décidé de concentrer nos efforts sur un **vol passif**, plus réaliste dans le contexte de la campagne. En parallèle, nous avons décidé d'abandonner plusieurs expériences secondaires (mesure GPS, télémétrie, fonctionnement du Cansat), car leur mise en place et leur validation auraient considérablement ralenti la qualification de la fusée.

Aussi, les qualifications n'ont pas été sans difficultés. Tout d'abord, nous avons rencontré des problèmes avec le Stabtraj : n'ayant jamais réalisé de test avec la fusée entièrement assemblée, nous avons eu plusieurs mauvaises surprises dès les premiers essais. Sur l'étage supérieur, deux points critiques sont apparus. L'absence d'événements dans la peau carbone représentait un risque majeur, car en cas de défaillance moteur, une surpression aurait pu provoquer une explosion. De plus, le moteur était extrêmement difficile à extraire, ce qui posait un problème de sécurité important : en cas de non-allumage, le pyrotechnicien doit pouvoir le retirer rapidement et sans danger. L'étage inférieur n'était pas exempt de défauts non plus : un jeu a été constaté au niveau de la virole moteur, que nous avons dû corriger en urgence à l'aide d'une pièce métallique improvisée pour caler correctement le propulseur. Enfin, lors des vols simulés, d'autres difficultés sont apparues, en particulier sur le seuil de détection du décollage et sur les fenêtres temporelles programmées pour l'ouverture des parachutes.

De ces expériences, nous retenons une leçon essentielle : **réaliser en amont tous les tests critiques** afin d'éviter les imprévus lors des contrôles officiels.

### 7.2 Déroulé du vol

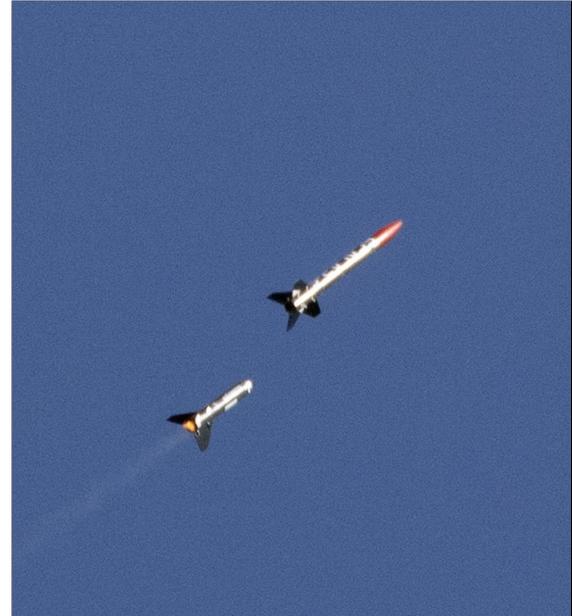
SCALAR-6 a finalement décollé le mercredi 9 juillet à 17h50. Le vol a été **semi-nominal** :

- l'étage inférieur a fonctionné conformément aux prévisions,
- mais le système de récupération de l'étage supérieur a échoué, probablement en raison d'une défaillance électronique ou d'un problème de câblage.

Un point particulièrement positif est le **succès du système de séparation inter-étages**. La séparation a été franche et parfaitement réalisée, ce qui constitue un critère essentiel pour un futur vol actif. Ce retour d'expérience confirme la fiabilité du système de séparation, mais met en évidence la nécessité de simplifier drastiquement l'électronique de l'étage supérieur, notamment en réduisant le nombre de câbles.



(a) avant séparation



(b) après séparation

FIGURE 109 – SSIE en vol

## 7.3 Analyse des données

### 7.3.1 Étage du bas

#### LOG

```
0.00 : logs init done
0.00 : init finished
0.00 : waiting TO
0.00 : TO detected
0.00 : waiting SEP
4.70 : T1_SEPARATION reached
4.70 : separating stages
5.30 : SEP OK
12.20 : T1_PARACHUTE reached
12.20 : opening para
12.40 : THE END
0.00 : logs init done
///// End of logs /////
```

Un système de log avait été mis en place afin d'enregistrer en mémoire l'ensemble des événements du vol. Ce dispositif a parfaitement rempli son rôle : tous les timings des différents actionneurs correspondent exactement aux prévisions issues de StabTraj, ce qui confirme la fiabilité de la séquence embarquée.



### Baromètre

Le baromètre du module HAT 10DOF a permis d'enregistrer la pression ambiante (fig. 110), ce qui constitue une méthode fiable pour déduire l'altitude de la fusée par rapport au niveau de la mer (fig. 111). Les mesures indiquent que l'étage inférieur a atteint environ 535 m, une valeur inférieure de 50 m aux estimations de StabTraj (fig. 112). On estimera que cet écart rentre dans la marge d'erreur en plus des frottements sur rampe.

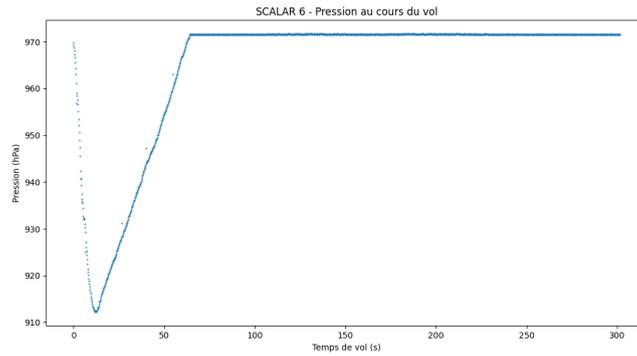
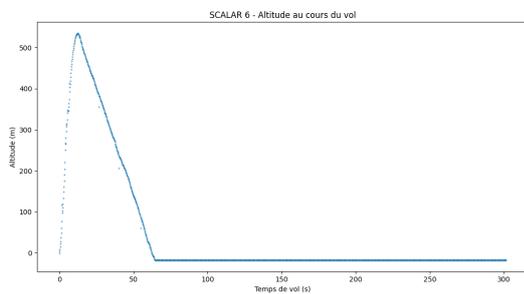
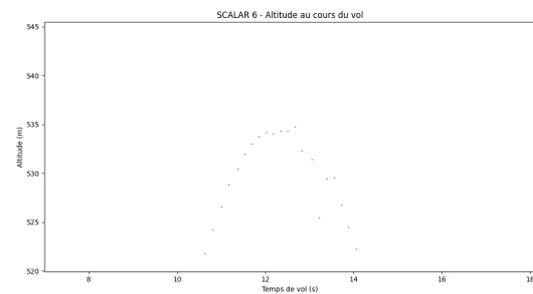


FIGURE 110 – Pression au cours du vol



(a) Vue globale



(b) Zoom

FIGURE 111 – Altitude au cours du vol

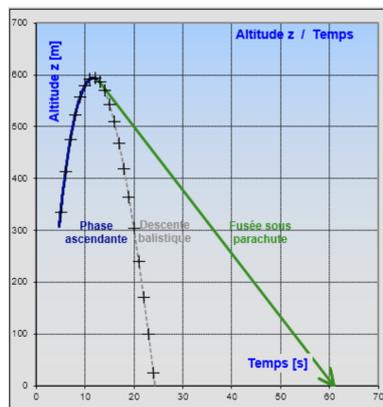


FIGURE 112 – Prévion du StabTraj

## IMU

Les données de l'IMU indiquent une accélération maximale de  $34,8 \text{ m.s}^{-2}$ . En retirant la gravité, cela correspond à une poussée moteur produisant environ  $24,8 \text{ m.s}^{-2}$ . Le parachute s'est ouvert à  $T+12 \text{ s}$ , entraînant une décélération d'environ  $10 \text{ g}$ , avant une descente nominale sous parachute.

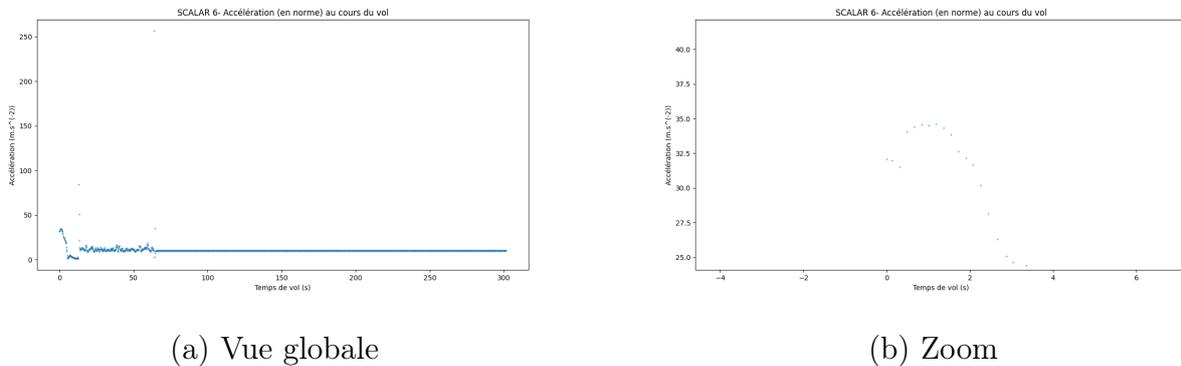


FIGURE 113 – Accélération au cours du vol

### 7.3.2 Étage du haut

Aucune donnée exploitable n'a été récupérée suite au vol balistique de l'étage. Ni le Cansat n'a été éjecté, ni le système de récupération n'a fonctionné.

Nous avons d'abord suspecté une absence de détection du décollage, le code utilisant un seuil de  $25 \text{ m.s}^{-2}$ . Or, en tenant compte de la gravité, la WitMotion mesurait bien une accélération totale d'environ  $34,8 \text{ m.s}^{-2}$ , largement au-dessus du seuil. Cette hypothèse a donc pu être écartée.

La cause la plus probable reste un faux contact dû au nombre important de câbles dans l'étage supérieur, pouvant avoir coupé l'alimentation de la WitMotion et empêché le déclenchement des actionneurs.

\*\*\* Fin du Document \*\*\*



## Références

- [1] Rafael Aroca et AL. *BIPES : Block based Integrated Platform for Embedded Systems*. URL : <https://bipes.net.br/ide/>.
- [2] *Batterie*. URL : <https://www.gotronic.fr/art-accu-lipo-3-7-vcc-550-mah-1503040-31712.htm>.
- [3] *Buzzer*. URL : <https://www.gotronic.fr/art-buzzer-svm12-3845.htm>.
- [4] *Capteur de pression et température*. URL : <https://www.gotronic.fr/art-capteur-de-t-et-de-pression-bmp280-23891.htm>.
- [5] *esp32-cam-micropython-2022*. URL : <https://github.com/shariltumin/esp32-cam-micropython-2022>.
- [6] *Interrupteur DIP*. URL : <https://www.gotronic.fr/art-dip-switch-ds02-4344.htm>.
- [7] *Module LoRa WAN*. URL : <https://www.gotronic.fr/art-module-grove-lora-113060006-25948.htm>.
- [8] *Régulateur de tension*. URL : <https://www.gotronic.fr/art-convertisseur-de-tension-2-a-buckboost01-28669.htm>.