



C'SPACE 2023

ASTRE'LAUNCH

Rapport de projet Fusée expérimentale PULSAR



© Charles Pilon



Table des matières

1	Introduction	3
2	Calendrier et gestion du projet	3
3	Structure	4
3.1	Dimensions et StabTraj	4
3.2	Support moteur et ailerons	5
3.3	Accroche parachute	6
4	Récupération	7
4.1	Parachute	7
4.2	Système d'éjection	7
4.3	Séquenceur	9
5	Expérience / Télémessure	11
5.1	Capteurs embarqués	11
5.2	Liaison radio	12
5.3	Logiciel de vol	13
5.4	Traitement sol et interface graphique	13
6	Campagne de lancement et résultats	15
6.1	Déroulement des qualifications	15
6.2	Déroulement du vol	15
6.3	Résultats	17
7	Axes d'amélioration	19
8	Conclusion	20

Table des figures

1	Vue d'ensemble de la fusée	4
2	Dimensions principales de la fusée	4
3	Résultat de stabilité	5
4	Résultat de trajectoire	5
5	Système de fixation du moteur et des ailerons	6
6	Bague et anneau d'accroche du parachute	6
7	Parachute Rocketman Standard	7
8	Système d'éjection de la coiffe et du parachute	8
9	Mécanisme de libération du ressort	8
10	Coiffe	9
11	Schéma électronique et PCB du shield séquenceur	10
12	Machine d'état du séquenceur	10
13	Schéma électronique du branchement des capteurs sur l'Arduino Mega	11
14	Schéma électronique et PCB du module radio	12
15	Interface Homme Machine	14
16	Fusée PULSAR en rampe de lancement	16
17	Décollage de la fusée PULSAR	16
18	Descente sous parachute de la fusée PULSAR	17
19	Fusée PULSAR récupérée	17

1 Introduction

Le projet PULSAR est le premier projet de fusée expérimentale d'ASTRE, une association permettant à des étudiants d'écoles d'ingénieurs de Toulouse de travailler sur des projets en lien avec le spatial. Le projet PULSAR a débuté en 2020 et s'est étendu sur 3 ans, avec un lancement au C'Space 2023. Une quinzaine d'étudiants ont travaillé chaque année sur le projet. L'équipe était organisée en trois pôles :

- un pôle **structure**, chargé de la conception et de la fabrication du corps de la fusée ainsi que du StabTraj ;
- un pôle **récupération**, chargé de l'achat du parachute et de la conception et de la fabrication de son système d'éjection ;
- un pôle **expérience**, chargé de la conception et de la mise en oeuvre des systèmes embarqués des expériences.

L'expérience mise en oeuvre consiste en une télémesure temps réel avec affichage des données de vol sur une interface homme machine au sol .

2 Calendrier et gestion du projet

Bien que le lancement était originalement prévu en 2020, le projet a finalement duré trois ans. Cela est en grande partie dû au fait qu'il a été difficile de lancer ce projet en pleine période Covid et qu'il a fallu apprendre à faire travailler une équipe avec des gens venant d'écoles différentes, et qui ont donc des habitudes et contraintes différentes. De plus, ce projet était le premier projet de l'association au C'Space, catégories mini-fusées et fusées expérimentale confondues.

Ces trois ans nous ont permis d'atteindre un niveau de maturité technique et d'organisation satisfaisant, afin de mettre en oeuvre notre première fusée expérimentale dans les meilleurs conditions. L'équipe a été organisée en trois pôles, comme indiqué précédemment, supervisés par un chef de projet avec les rôles suivants :

- organiser le travail et s'assurer de la bonne avancée des pôles ;
- anticiper les problèmes d'intégration entre pôles ;
- s'occuper du lien avec Planète Science et planifier les rencontres avec les suiveurs et la participation au C'Space ;
- gérer la trésorerie, en lien avec le trésorier de l'association ASTRE.

Durant ces trois ans, des réunions régulières entre pôles, appelées "Iteration Reviews" ont été mises en place afin de préparer les RCE et de s'assurer de la bonne avancée du projet.

La fusée a un corps porteur en fibre de verre. A son sommet, un système d'jection permet d'jecter la coiffe vers le haut pour libérer le parachute. En bas, la fusée possède trois bagues permettant de tenir le moteur Pro254. Les deux bagues inférieurs servent également à fixer les quatre ailerons trapézoïdaux. Enfin, le centre de la fusée contient un support modulable qui recevra les composants du système embarqué et des expériences.

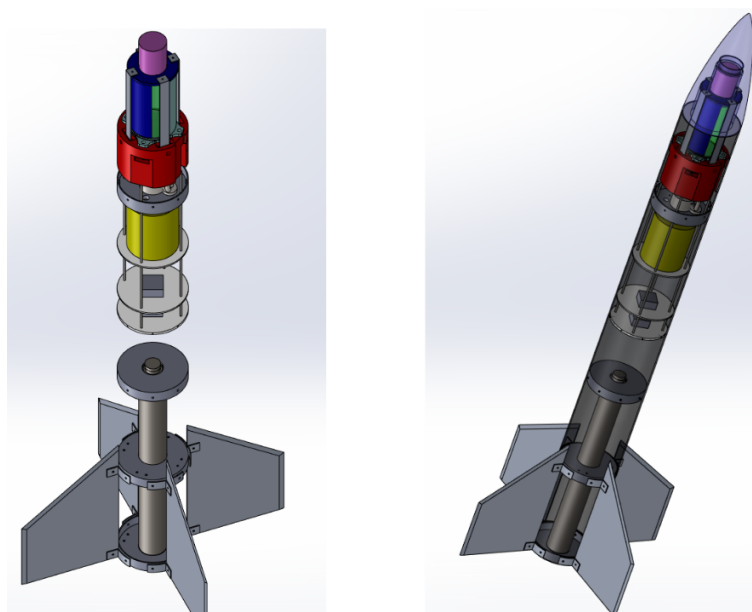


FIGURE 1 – Vue d'ensemble de la fusée

Les dimensions principales de la fusée sont données Figure 2. Elle fait 1520 mm de long pour 141 mm de diamètre et 541 mm d'envergure au niveau des ailerons. Une fois tout intégré, elle pèse 7,97 kg à vide et son centre de masse est à 755 mm du haut.

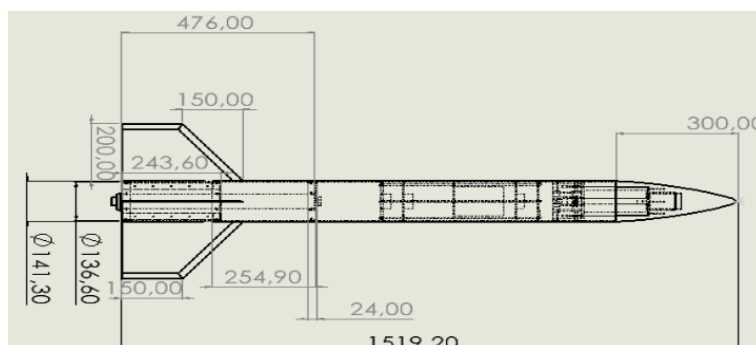


FIGURE 2 – Dimensions principales de la fusée

En rentrant ces valeurs dans la feuille de calcul fournie par Planète Science, nous avons vérifié la stabilité (voir Figure 3) et la trajectoire (voir Figure 4) de la fusée. L'apogée prévue est à 1126 m, atteinte 15 secondes après le décollage.

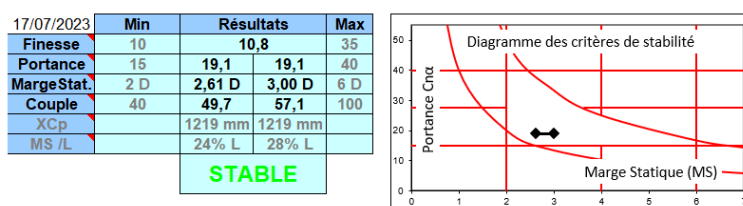


FIGURE 3 – Résultat de stabilité

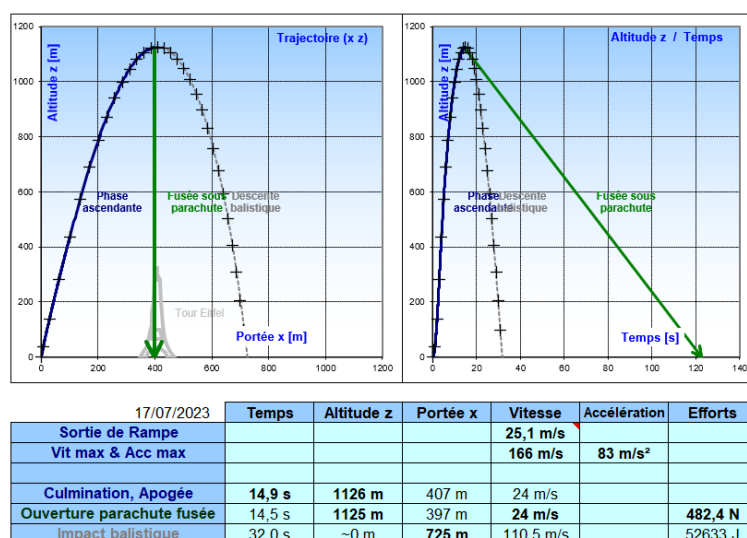


FIGURE 4 – Résultat de trajectoire

3.2 Support moteur et ailerons

Le moteur est tenu par trois bagues usinées en aluminium et vissées au corps de la fusée. La bague du haut est appelée bague de poussée car c'est contre elle que le moteur va venir exercer sa force pour propulser la fusée. Les deux autres bagues permettent de guider le moteur et de le maintenir bien dans l'axe. La bague du bas possède également un système permettant de retenir le moteur avant l'allumage à l'aide d'une petite plaque vissée.

Les ailerons viennent se visser sur les deux bagues du bas, à l'aide de petites pièces pliées. Ce système est très solide et permet de fixer facilement les ailerons tout en garantissant de satisfaire les exigences de contraintes mécaniques.

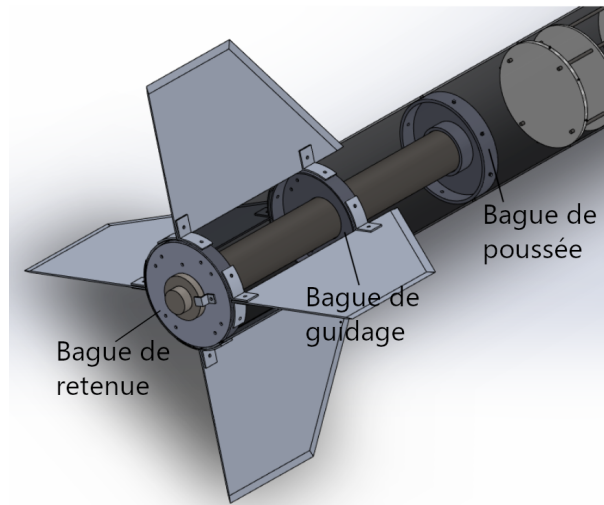


FIGURE 5 – Système de fixation du moteur et des ailerons

3.3 Accroche parachute

Une quatrième bague usinée en aluminium, vissée au corps de la fusée et située juste en dessous du système de récupération, permet de fixer le parachute. Elle possède un gros trou dans lequel vient se visser un anneau de levage maintenu par un écrou. La sangle est alors cousue à l'anneau et pars vers le parachute en passant dans un logement située entre la pièce du système de récupération et le corps de la fusée. Un émerillon est accroché à l'autre bout de la sangle et fait la jonction avec les suspentes du parachute. Cela permet d'éviter que les suspentes s'emmêlent ou que la fusée fasse tourner le parachute.

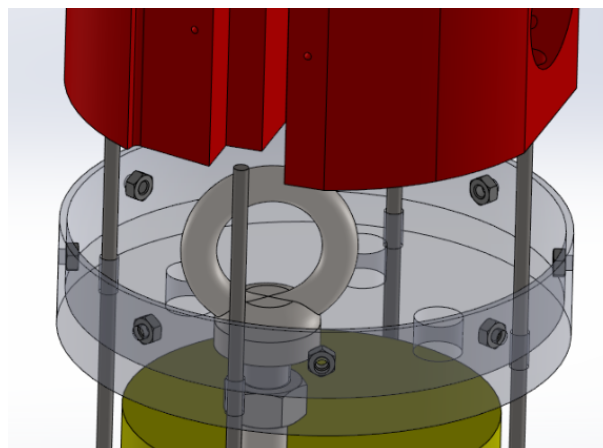


FIGURE 6 – Bague et anneau d'accroche du parachute

4 Récupération

4.1 Parachute

Le parachute de la fusée a été acheté à un fabricant spécialisé. La référence choisie est le modèle 7ft Standard de Rocketman. De part sa forme particulière, il n'a pas de cheminée et seulement 4 suspentes. La taille 7ft a été choisie car, d'après la datasheet du fabricant (voir tableau ci-dessous), elle permettra d'avoir une vitesse de descente d'environ 7.5 m/s, effectivement comprise entre 5 m/s et 15 m/s, pour notre fusée de 9.68 kg.

Vitesse		Masse	
ft/s	m/s	lbs	kg
15	4,6	9,0	4,08
17	5.2	11	4,99
20	6,1	15	6,81
25	7,6	23	10,4



FIGURE 7 – Parachute Rocketman Standard

4.2 Système d'éjection

Le système d'éjection utilise un ressort qui doit éjecter la coiffe et le parachute placé dans une coque juste en dessous. Le ressort est placé dans la coiffe et appui sur la coque du parachute en dessous. La coque en deux parties (en bleu sur la Figure 8), enferme le parachute et est fixée à la pièce serrure (en rouge sur la Figure 8). Quatre tiges, fixées à la coiffe, viennent se loger dans la serrure et sont retenues par des goupilles (voir Figure 9). Le ressort est alors sous contrainte et éjecte la coiffe et le parachute lorsqu'il est libéré. Toutes ces pièces ont été imprimées en 3D avec un fort taux de remplissage.

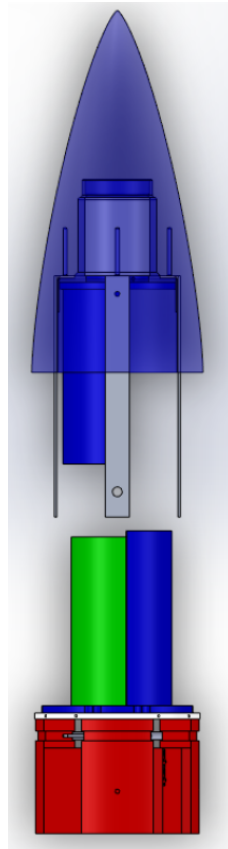


FIGURE 8 – Système d'éjection de la coiffe et du parachute

Le mécanisme de libération utilise un servomoteur à fort couple avec engrenages en aluminium. Sur ce servomoteur est fixé un palonnier à quatre bras qui va pouvoir faire entrer ou sortir les goupilles à l'aide d'un système bielle-manivelle. Le palonnier, les bielles et les goupilles sont tous en aluminium.

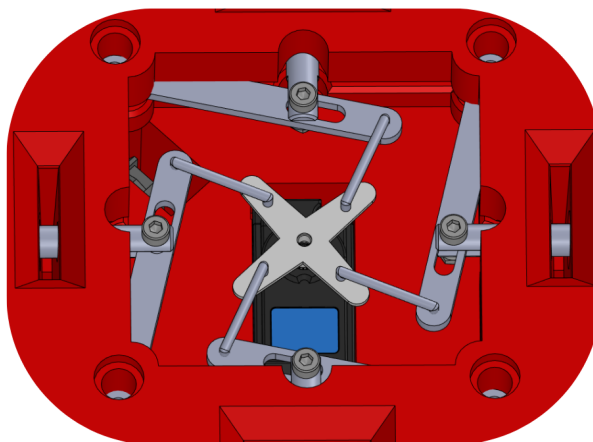


FIGURE 9 – Mécanisme de libération du ressort

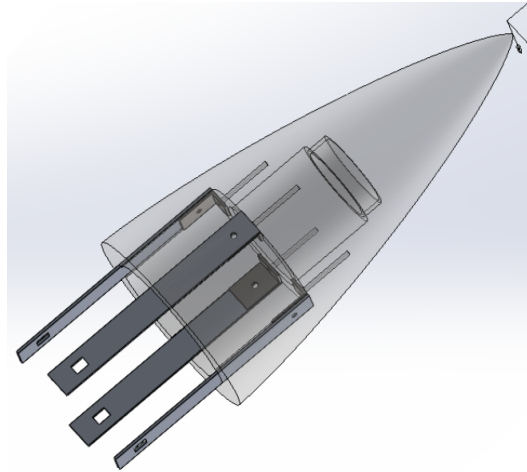


FIGURE 10 – Coiffe

4.3 Séquenceur

Le servomoteur est piloté par un séquenceur, constitué d'une carte Arduino UNO sur laquelle est fixée un shield conçu par notre équipe. Notre séquenceur utilise une temporisation pour ouvrir le parachute un certain temps après le décollage. Le décollage est détecté à l'aide d'un câble jack attaché à la rampe de lancement et branché sur la fusée. Lors du décollage le câble est débranché (ou cassé), provoquant une ouverture de circuit que le micro-contrôleur détectera. La mise en oeuvre du séquenceur requiert trois autres boutons, accessibles depuis l'extérieur de la fusée sur le pas de tir :

- un bouton ON/OFF pour mettre sous tension l'Arduino UNO ;
- un bouton CTRL pour ouvrir/fermer les goupilles lors de l'installation de la coiffe ;
- un bouton ARM pour armer le système et permettre la détection du décollage.

Le shield a été conçu pour permettre de facilement fixer les trois interrupteurs et le jack à l'aide de connecteurs JST, ainsi que le servomoteur. Il possède également un buzzer qui indique l'état du système à l'aide de différentes tonalités. Le schéma électronique du shield est donné Figure 11.

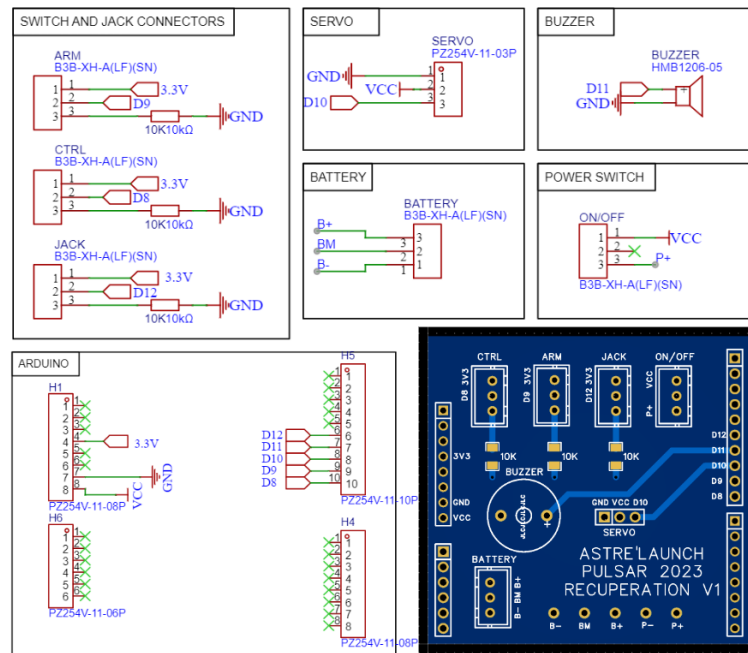


FIGURE 11 – Schéma électronique et PCB du shield séquenceur

Le séquenceur est implémenté sous forme de machine d'état (voir Figure 12) dans le programme de l'Arduino UNO. Elle possède cinq états, permettant de :

- verrouiller et déverrouiller la serrure pour la mise en place de la coiffe (UNARMED) ;
- détecter le décollage à l'aide du décollage (ARMED) ;
- attendre un temps fixé par l'utilisateur (ASCENT) ;
- ouvrir le parachute en déverrouillant la serrure (CHUTE RELEASE) ;
- attendre la fin de la descente et la récupération de la fusée (DESCENT).

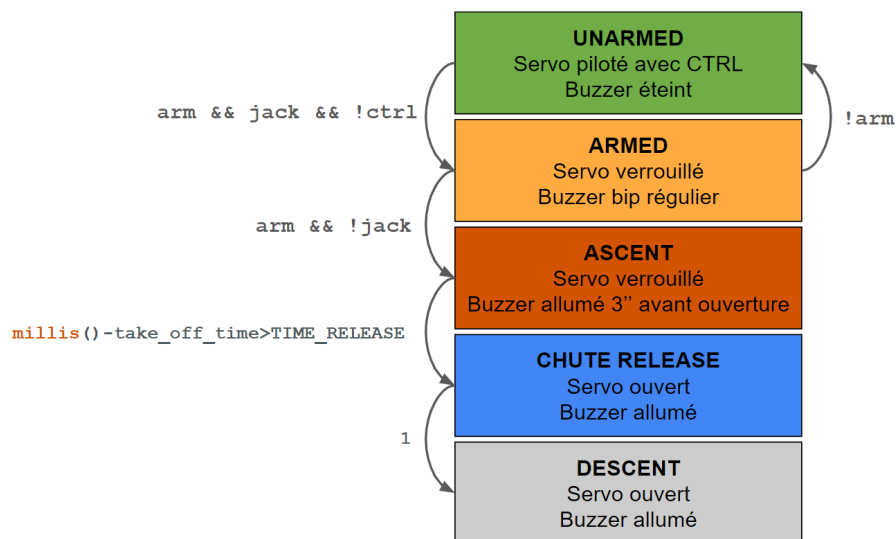


FIGURE 12 – Machine d'état du séquenceur

5 Expérience / Télémétrie

L'objectif de l'expérience était d'enregistrer et envoyer par liaison radio les données issues de capteurs monitorant le vol de la fusée. Les capteurs embarqués sont détaillés ci-dessous. Les données reçues ont été affichées sur une Interface Homme Machine (IHM) au sol, pour permettre un suivi du vol en temps réel.

Une carte Arduino Mega 2560 a été utilisée comme pièce centrale du système de télémétrie. Ce système est complètement indépendant de l'électronique du séquenceur décrite dans le chapitre 4 de ce rapport.

5.1 Capteurs embarqués

Les caractéristiques des capteurs sont données dans le tableau ci-dessous.

Capteur	Modèle	Valeur mesurée	Plage	Précision
Baromètre	BMP280	Pression atmosphérique	300 à 1100 hPa	± 1 hPa
Accéléromètre	ICM20948	Accélération linéaire	± 16 g	16 bits
Gyromètre	ICM20948	Vitesse de rotation	± 2000 °/s	16 bits
Magnétomètre	ICM20948	Champ mag. terrestre	$\pm 4900 \mu T$	16 bits
GPS	UBLOX NEO7M	Position	-	3 mètres

Ces capteurs étant issus du commerce, nous n'avons pas pu faire de procédure de calibration à proprement parler, mais nous les avons choisi en fonction de leur plage et de leur précision, et avons vérifié leur bon fonctionnement.

Le schéma électronique pour brancher ces capteurs sur l'Arduino Mega est donné ci-dessous. Un module carte SD (pour enregistrer les données à bord) et un module radio (pour transmettre les données) sont également présents. Pour le vol, tous ces composants ont été soudés sur un shield à trous du commerce.

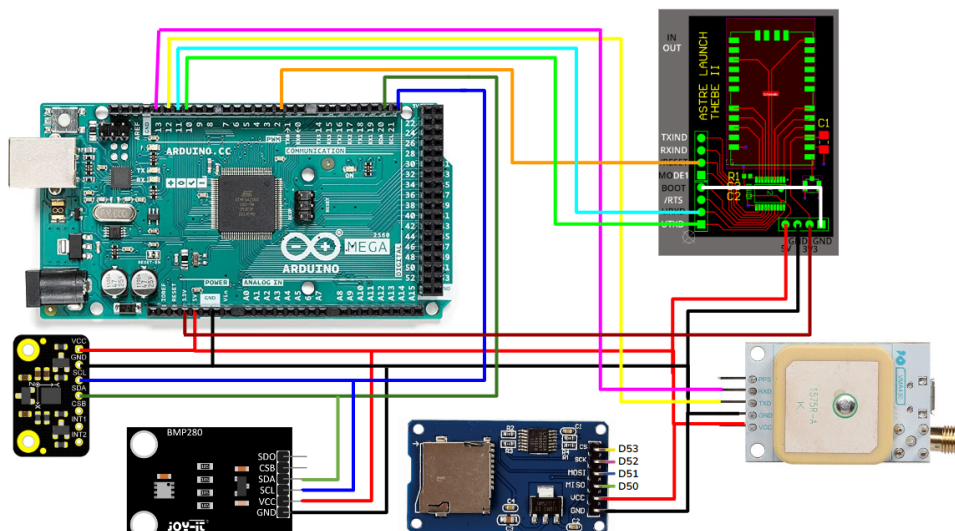


FIGURE 13 – Schéma électronique du branchement des capteurs sur l'Arduino Mega

5.2 Liaison radio

La liaison radio air-sol est maintenue via un module radio WURTH Thebe-II opérant à 869.5 MHz pour une puissance d'émission de 27 dBm (compatible avec le cahier des charges). L'antenne choisie est omnidirectionnelle et a un gain de 1.6 dBi. La même antenne est utilisée en émission dans la fusée et en réception au sol. Nous pouvons réaliser le bilan de liaison suivant pour nous assurer du bon fonctionnement de la chaîne de transmission.

D'après la formule de Friis, la puissance reçue en dBm s'exprime :

$$P_r = P_0 + G_e + G_r - 20 \log(f) - 20 \log(d) + 147.5$$

avec :

- $P_0 = 27dBm$ la puissance émise ;
- $G_e = 1.6dBi$ le gain d'émission ;
- $G_r = 1.6dBi$ le gain de réception ;
- $f = 869.5 \times 10^6$ Hz la fréquence radio ;
- $d = 3000$ m la portée de la communication.

Nous obtenons :

$$P_r = -70.6dBm$$

La puissance reçue est bien supérieure au seuil de réception ($-120dBm$) de notre module radio, donc une communication à 3km est possible. Cette distance a été confirmée par un test de portée, au sol, avant le vol. Le système devrait donc bien permettre de garder la liaison radio pendant tout le vol.

Avec la transmission de données allumée, le sous-système d'expérience enregistre une consommation de 180 mA, similaire aux valeurs estimées. La durée de vie du système sous batterie (sans alimentation externe) est d'environ 3 heures.

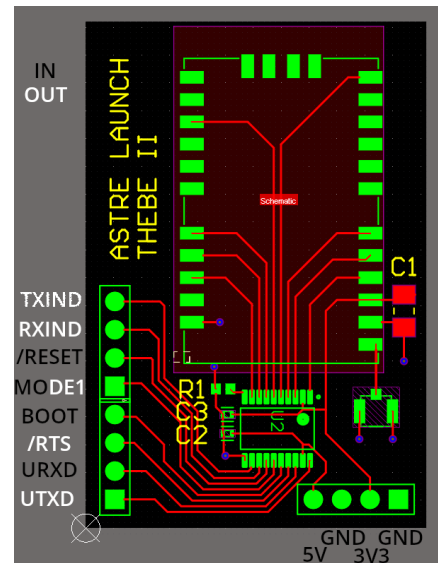
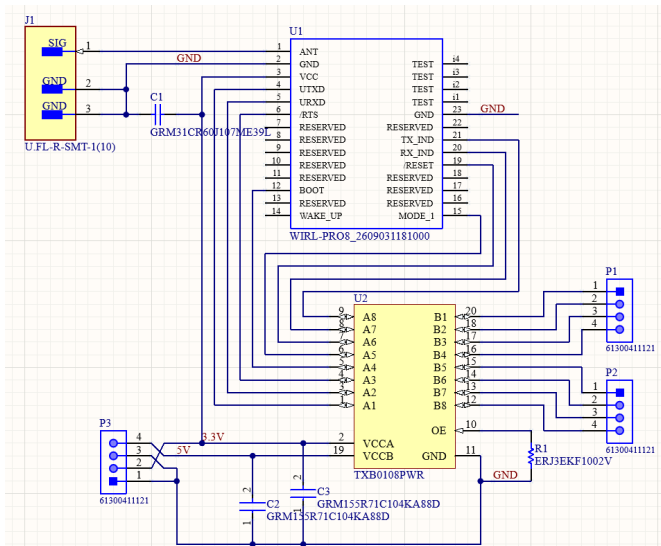


FIGURE 14 – Schéma électronique et PCB du module radio

Nous avons dû réaliser un PCB sur mesure pour ce module radio pour pouvoir l'utiliser avec l'Arduino Mega. En effet, sa tension de fonctionnement étant de 3V3, il n'est pas nativement compatible avec les 5V de l'Arduino. Il a donc fallu inclure un translateur de niveaux logiques, en plus du connecteur d'antenne et des capacités de découplage, sur le PCB.

5.3 Logiciel de vol

Le logiciel de vol, développé en C, est responsable de la gestion de l'acquisition des données des capteurs et de leur transmission via le module radio.

Ce logiciel a été développé pour signaler une erreur critique (mauvaise initialisation d'un capteur ou module) au moment de l'allumage via un buzzer. Cependant si un capteur arrête de fonctionner pendant le vol, le logiciel de vol continue d'acquérir et de transmettre les données en ignorant le capteur défectueux. Cette propriété a été vérifiée pendant des tests en laboratoire.

La fréquence d'acquisition n'étant pas contrainte artificiellement, elle est dépendante exclusivement des performances de la carte Arduino et du temps de réponse des capteurs. La fréquence d'acquisition obtenue est de 15 Hz.

Au cours du développement de ce logiciel, des techniques de compilation conditionnelle ont été utilisées pour permettre l'exclusion ou l'inclusion de capteurs et de modules au moment de la compilation. Cela permet d'utiliser ce même logiciel lors des tests également lorsque tous les modules ne sont pas disponibles, et pour l'identification rapide des composants défectueux, tout en réduisant au minimum l'utilisation des ressources du système à l'exécution.

5.4 Traitement sol et interface graphique

L'interface Homme Machine pour monitorer le vol a été développée principalement en Python en utilisant la librairie PyQt5. L'interface permet à l'opérateur sol de voir en temps réel les forces subies par la fusée, la vitesse de rotation mesurée à bord, l'altitude, et la vitesse verticale. Ces deux dernières mesures sont calculées à partir des données barométriques et sont disponibles comme données brutes (en rouge) et valeurs filtrées avec un filtre à moyenne mobile (en blanc).

L'interface affiche aussi une carte de la zone de lancement permettant à l'opérateur de localiser rapidement la fusée (en bleu) par rapport au terrain et à la zone publique d'observation des lancements (en rose). Les coordonnées wgs84 correspondantes sont aussi affichées en format numérique pour permettre de simplifier les opérations de recherche et récupération de la fusée. Cette carte est réalisée comme objet HTML en utilisant les librairies Leaflet et Folium.

Le logiciel de sol a aussi été conçu pour enregistrer les données brutes reçues pour permettre des analyses post-vol même au cas où la carte mémoire embarquée dans la fusée serait détruite.

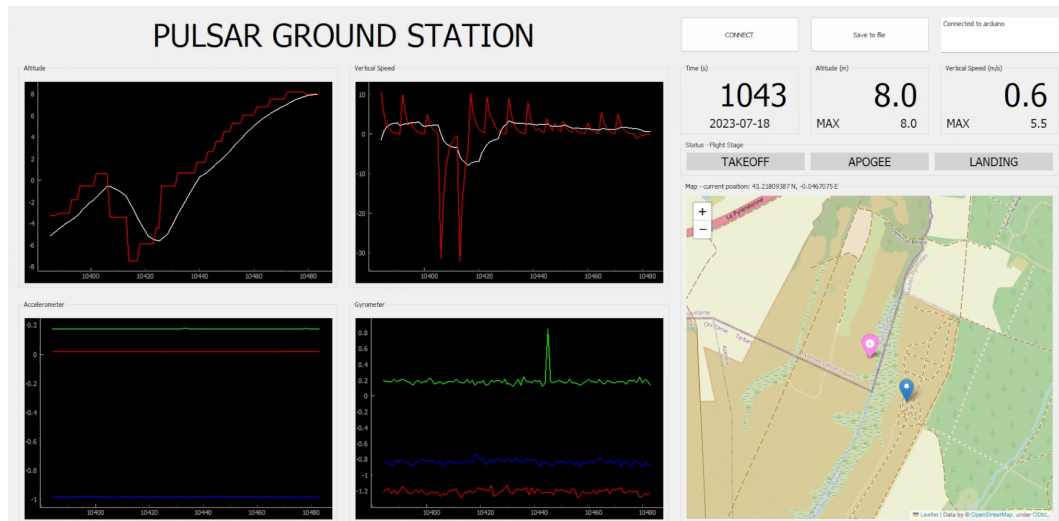


FIGURE 15 – Interface Homme Machine

6 Campagne de lancement et résultats

6.1 Déroutement des qualifications

Les premières phases de qualification de PULSAR se sont passées sans incident. Les tests mécaniques, électriques et de stabilité ont été validés directement. Le deuxième test d'éjection a échoué à cause d'une pile trop faible. Après l'avoir changé pour une pile neuve, les trois tests d'éjection successifs se sont bien déroulés. Il ne restait que le vol simulé à valider avant d'être certifié pour le lancement. Le premier vol simulé a échoué et a révélé deux failles dans le système d'éjection qui n'étaient jamais apparues dans nos tests précédents et lors des trois tests successifs.

Premièrement, en cas de rupture du jack, les deux morceaux pouvaient revenir en contact ce qui empêchait de détecter le décollage. Cela a été résolu en faisant en sorte que le câble électrique du jack aille jusqu'à la structure, et qu'il soit isolé par une gaine sur toute sa longueur.

Deuxièmement, le parachute pouvait rester coincé dans son logement s'il ne sortait pas de lui même lors de l'éjection. Cela a été résolu en rallongeant la longueur de la sangle pour qu'elle soit plus longue que les suspentes, obligeant le parachute à sortir sous l'action de la coiffe.

Ces problèmes ayant été facilement résolus, nous avons pu valider le vol simulé et nous qualifier sereinement pour le lancement.

6.2 Déroutement du vol

Le décollage de PULSAR a eu lieu le mardi 18 juillet 2023 à 11h36. La météo était bonne : ensoleillé et vent faible. PULSAR a réalisé un vol nominal, avec une apogée à 914m d'après le baromètre embarqué. La trajectoire de la fusée était stable et le parachute s'est bien ouvert.



FIGURE 16 – Fusée PULSAR en rampe de lancement



FIGURE 17 – Décollage de la fusée PULSAR

Le seul bémol à mentionner est l'ouverture tardive du parachute, certainement due au fait que l'apogée atteinte est plus faible que celle prévue (1126m). De plus (et il y a sûrement un lien de causalité), une suspente s'est emmêlée autour d'un aileron lors de l'ouverture. Cela a fait qu'un des coins du parachute s'est moins ouvert, provoquant une vitesse de descente plus rapide qu'attendue et la rotation du parachute sur lui même, malgré l'émerillon, ce qui a accentué l'emmêlement des suspentes. Néanmoins, la fusée a été suffisamment freinée pour effectuer une descente sans danger pour elle ni son environnement. Nous avons retrouvé le tube intact.



FIGURE 18 – Descente sous parachute de la fusée PULSAR

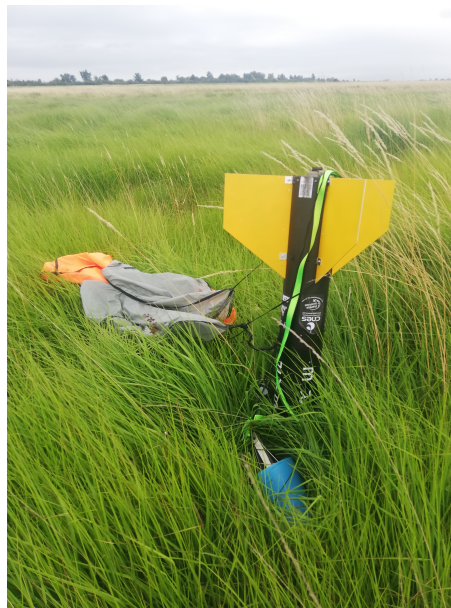


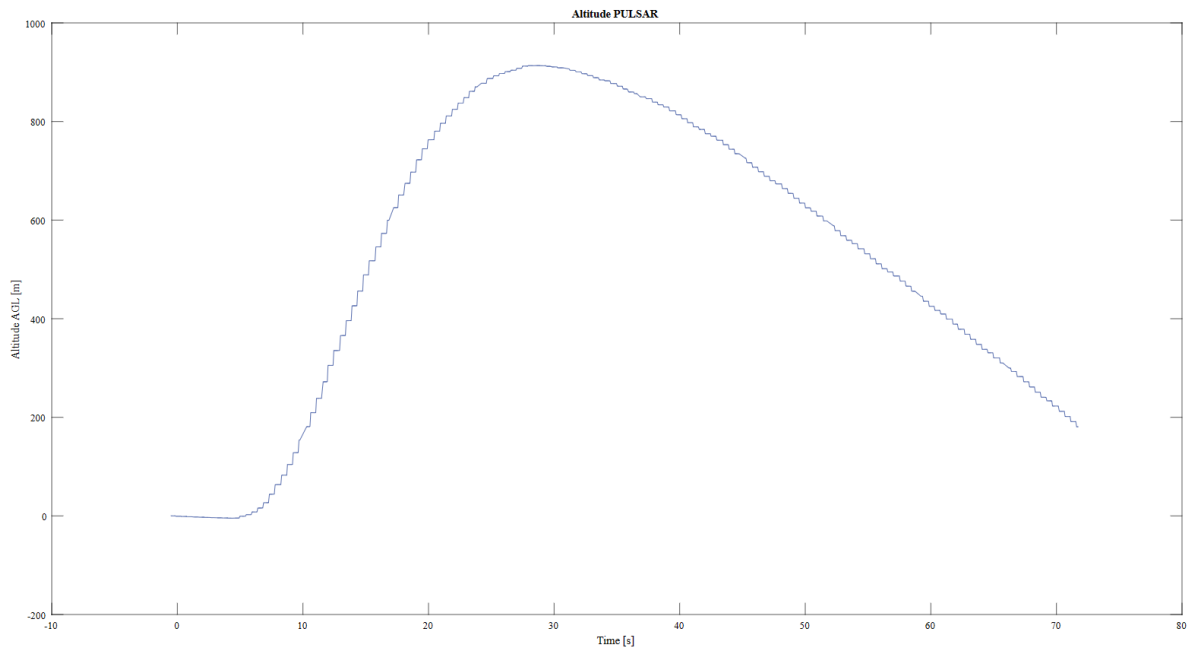
FIGURE 19 – Fusée PULSAR récupérée

6.3 Résultats

Durant le vol, le système de télémétrie a fonctionné correctement, tant du point de vue des valeurs des capteurs, de la liaison radio et de l'affichage sur l'interface. De plus la dernière position GPS reçue correspondait à quelques mètres près à l'endroit où nous avons retrouvé la fusée. Cela a permis de valider le bon fonctionnement et la robustesse

du système que nous avons développé.

D'autre part, nous avons pu récupérer les données enregistrées pour tracer la courbe de l'altitude mesurée. Le résultat est donné Figure 6.3.



L'apogée (à une hauteur de 913 m) est un peu plus faible que celle attendue, mais la différence n'est pas significative et peut être liée au moteur ou aux conditions de vol.

7 Axes d'amélioration

Voici les points sur lesquels nous souhaitons travailler en particulier pour l'année prochaine :

- Refaire le hardware du système embarqué
- Mettre toutes les puces (MCU, capteurs, etc) directement sur un même PCB
- Remplacer l'Arduino par un STM32 (ou SoC ou RPi)
- Mémoire flash à la place d'une carte SD
- Faire un contrôleur d'alimentation séparé du MCU (ex : 3V3 dédié au module radio)
- Ajouter un cône de guidage sur la bague de centrage
- Remplacer la caméra gadget par des caméras 1080p alimentées et contrôlées par l'OBC
- Pouvoir très facilement enlever et remettre le bloc récupération (système de verrouillage par rotation dans le tube)
- Pouvoir plugger la prise jack depuis l'extérieur, sans avoir à faire passer le fil à travers le trou
- Transmettre l'état du système de récupération par la télémétrie
- Faire des trappes pour flasher/debugger l'électronique sans la sortir du tube
- Faire une valise avec un ordi et un module radio intégré
- Fabriquer et étalonner le gyromètre optique initialement prévu
- Implémenter et valider le filtre de Kalman à bord



8 Conclusion

PULSAR, la première fusée expérimental construite par l'association ASTRE, a réussi son vol au C'Space 2023 après trois ans de travail sur le projet. L'expérience de télémesure a été une réussite et a permis d'avoir un retour en direct des données du vol, mesurées à bord par différents capteurs.

Ce projet nous a permis de gagner en compétences tant du point de vue technique que du travail d'équipe. L'expérience engrangée en matière de conduite de projet, construction de fusée expérimentale (structure, récupération) et électronique embarquée sera transmise aux futurs membres du club pour les projets des années à venir.

Dès l'année prochaine, ASTRE'Launch compte développer une nouvelle fusée en mettant l'accent sur l'expérience du gyromètre optique, initialement prévue pour cette année mais qui n'a pas pu voler. Nous sommes donc impatients et motivés à l'idée de travailler pour le C'Space 2024!