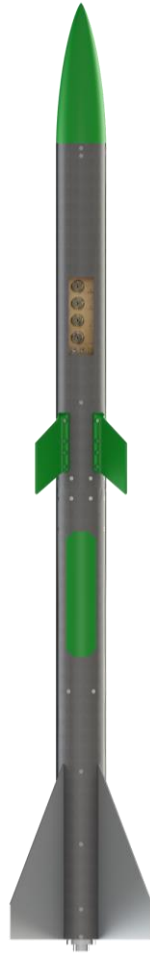


Fusée Expérimentale Déméter

Description des Expériences



Objet

Ce document fournit une description des expériences emportées par la fusée expérimentale Déméter conçue par le club EirSpace, qui a effectué un vol nominal lors de l'édition 2017 du C'Space.

Table des Matières

	1
1. Introduction	1
2. Données trajectographiques	1
2.1. Présentation	1
2.2. Capteurs	1
2.3. Traitement des Données	2
2.3.1. Traitement en Vol	2
2.3.2. Traitement au Sol	3
3. Prise de Vue	3
4. Télémessure	4
4.1. Architecture	4
4.2. Simulations	4
4.2.1. Objectifs	4
4.2.2. Antennes	5
4.3. Fabrication et mesure	6
4.3.1. Fabrication	6
4.3.2. Mesures	6
4.3. Bilan de liaison	7
5. Résultats	8
5.1. Télémessure	8
5.2. Trajectométrie	8
5.3. Prise de Vue	9

1. Introduction

L'expérience principale embarquée par la fusée est une expérience de trajectographie dont le but est de valider le vol nominal de la fusée et de déterminer les coordonnées de son point de chute pour en faciliter la récupération. Une expérience secondaire de prise de vue aérienne est également réalisée dans le but d'obtenir davantage d'informations sur le vol. Enfin, l'innovation majeure apportée sur la fusée est un empennage supérieur dont le rôle est l'émission radio des données trajectographiques et vidéo sur deux bandes de fréquences (870 MHz et 2,45 GHz).

2. Données trajectographiques

2.1. Présentation

L'expérience de trajectographie consiste à mesurer la position de la fusée pendant sa retombée à l'aide d'un capteur GPS et d'un baromètre. Le capteur GPS permet d'obtenir la longitude et la latitude de la fusée, tandis que le baromètre permet d'obtenir indirectement l'altitude de la fusée à travers une mesure de la pression et de la température atmosphérique. Un accéléromètre est également embarqué afin de mesurer l'accélération subie par la fusée lors du décollage.

Après acquisition, les données sont mises en forme, stockées à bord de la fusée puis transmises à l'émetteur 870 MHz afin d'être émises vers le sol.

2.2. Capteurs

Les capteurs utilisés ont été sélectionnés en accord avec la mission. Cette section donne leur plage de fonctionnement et leur précision.

Le baromètre embarqué est un MS5637-02BA03 de Measurement Specialties. Sa plage de fonctionnement va de 300 mbar à 1200 mbar, avec une précision absolue de 2 mbar à 25°C. Cette plage de fonctionnement permet en théorie des mesures correctes jusqu'à 9000 m d'altitude. Le thermomètre associé au capteur a quant à lui une plage de fonctionnement de -20°C à 85°C avec une précision absolue de 1°C. La résolution est configurable et la résolution maximale de 0,016 mbar et 0,002°C est obtenue pour un temps de conversion de 17 ms. La précision relative du baromètre est de 0,1 mbar et la précision relative du thermomètre est de 0,3°C. Ceci permet de calculer l'altitude avec une précision relative de l'ordre du mètre. La précision absolue est en revanche d'environ 5 m. L'étalonnage de capteur a été réalisé à partir de l'altitude fournie par le GPS en plusieurs points.

L'accélération est mesurée sur les trois axes de la fusée grâce à un accéléromètre ADXL343BCCZ d'Analog Devices. Sa plage de fonctionnement est de ± 16 g, avec une résolution de 3,9 mg. Le capteur a été mesuré en trois points (0 g et ± 1 g) afin d'obtenir sa courbe de calibration.

Enfin, le capteur GPS utilisé est un u-blox NEO-6M. Sa précision horizontale est de 2,5 m et sa fréquence d'acquisition maximale est de 5 Hz.

2.3. Traitement des Données

2.3.1. Traitement en Vol

Le traitement des données en vol s'effectue sur une unique carte regroupant un microcontrôleur Atmel AT1284P, le baromètre et l'accéléromètre. Seul le capteur GPS est déporté dans l'ogive afin d'avoir le moins d'obstacles possible entre le capteur et les satellites.

Les périodes d'acquisition des différents capteurs sont présentées dans le tableau ci-dessous.

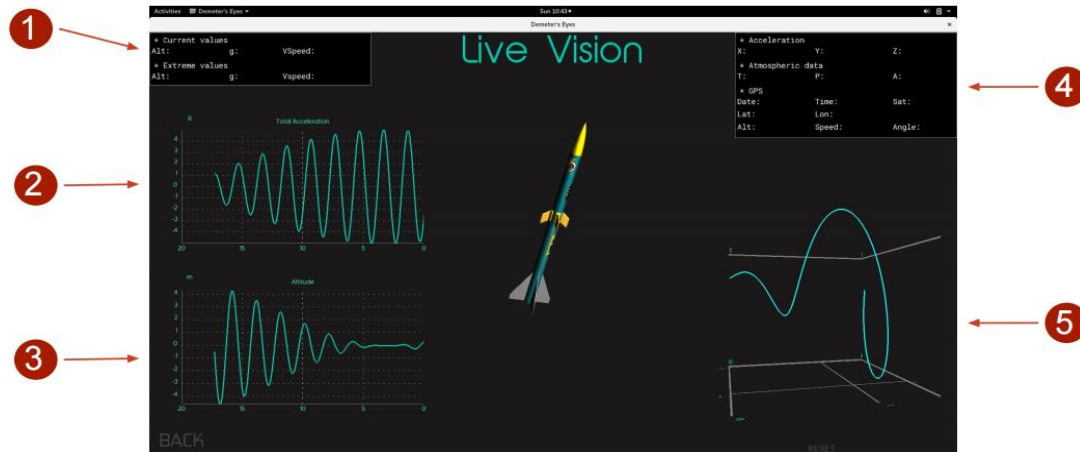
Capteur	Période d'acquisition
Accéléromètre	10 ms
Baromètre	100 ms
GPS	200 ms

Les données sont mises en forme par le microcontrôleur dès leur acquisition. Ainsi, la sortie de l'accéléromètre, codée en virgule fixe sur 16 bits, est recodée au format flottant sur les 3 axes de mesure. La température et la pression mesurée par le baromètre sont reçues en virgule fixe sur 24 bits, et converties au format flottant. Le calcul de l'altitude est également effectué à bord. Enfin, les trames GPS reçues sont des chaînes de caractères qui sont analysées par le microcontrôleur afin d'extraire chacune des données et de les recoder dans un format plus compact. La longitude et la latitude sont codées en virgule fixe sur 32 bits. Quelques autres données secondaires sont également conservées. Il s'agit de l'altitude et de la vitesse, codées au format flottant, de la date et l'heure chacune codées sur 3 octets, et du nombre de satellites ayant servi au calcul de la position, codé sur un octet.

C'est également le microcontrôleur qui se charge de stocker les données à bord sur carte SD, et de transmettre les données à l'émetteur 870 MHz. Ceci a lieu toutes les 20 ms. Puisque les données ne sont pas toutes acquises au même rythme, celles-ci sont concaténées dans une trame dont le premier champ est un octet indiquant la nature des données se trouvant dans la trame. Un second champ servant de timestamp, codé en flottant, est greffé sur la trame. Enfin, deux octets de synchronisation sont ajoutés en fin de trame. La taille d'une trame peut donc varier de 7 à 54 octets. Le débit maximal est de 2,7 kB/s, et le débit moyen est de 1,2 kB/s. Le débit maximal de l'émetteur à 870MHz est de 6 kB/s. Celui-ci est donc respecté. De plus, il n'y a pas de risque de dépasser la capacité de 2 GB de la carte SD utilisée à bord puisqu'une heure d'acquisition n'occupe que 5 MB.

2.3.2. Traitement au Sol

La station de réception au sol est constituée de deux récepteurs à 870 MHz et 2,45 GHz, contrôlés par une Raspberry Pi. Cette Raspberry Pi s'occupe d'enregistrer les trames sur son système de fichier avant de les transférer à un PC sous Linux via Ethernet par protocole TCP/IP. C'est ce PC qui s'occupe d'analyser les trames reçues et de mettre à jour une interface graphique développée sous OpenGL. Cette interface graphique, présentée ci-dessous, affiche les principaux paramètres du vol sous différentes formes.



- | | |
|---|--|
| <p>1 Valeurs courantes et maximales d'accélération, d'altitude et de vitesse.</p> <p>2 Accélération de la fusée au cours des 20 dernières secondes.</p> <p>3 Altitude de la fusée au cours des 20 dernières secondes.</p> | <p>4 Valeurs les plus récentes fournies par les différents capteurs.</p> <p>5 Représentation 3D de la trajectoire de la fusée.</p> |
|---|--|

3. Prise de Vue

La prise de vue est réalisée au moyen d'une Raspberry Pi et de son module Pi Camera. Celui-ci est basé sur un capteur IMX219 de Sony avec 8 megapixels. Il s'agit d'un capteur développé pour le marché des téléphones portables, tablettes et laptops. L'API dédiée au module permet de récupérer le flux vidéo brut, compressé avec le standard H264. Ce flux est d'abord stocké sur le système de fichier, puis l'outil avconv est ensuite utilisé pour recompresser le flux vidéo en abaissant la résolution et le bitrate de façon à respecter le débit maximal de l'émetteur à 2,4GHz. Avconv est un équivalent de l'outil ffmpeg, disponible sur la distribution Raspbian. Le débit maximal de l'émetteur est configurable et peut varier de 250 kb/s à 2000 kb/s, en fonction du rapport signal sur bruit désiré.

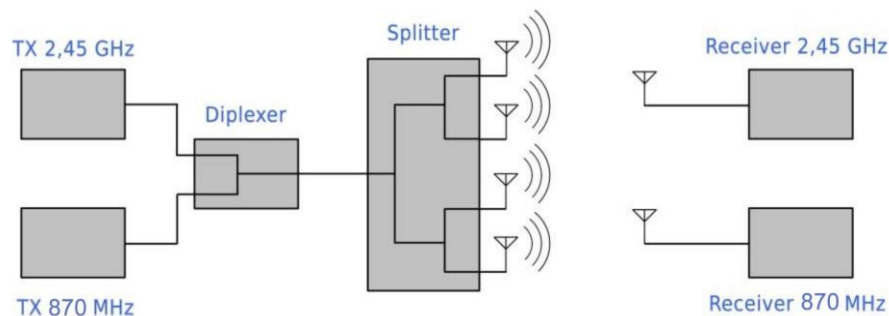
Au sol, un PC s'occupe de décompresser le flux vidéo et de l'afficher sur un écran.

4. Télémésure

4.1. Architecture

La transmission de Déméter reprend le même principe que celle de la fusée expérimentale Artémis, à savoir une émission sur deux bandes de fréquences différentes : 870 MHz et 2,45GHz. Des données trajectographiques sont envoyées sur la première bande, tandis que la prise de vue d'une caméra embarquée est envoyée sur la deuxième. L'utilisation des deux bandes de fréquence permet d'envoyer ces données simultanément sans qu'elles n'interagissent entre elles, et ainsi d'augmenter le débit d'informations transmises.

L'architecture de la chaîne de transmission est présentée ci-dessous. On trouve tout d'abord un émetteur dédié à chacune des bandes de fréquence utilisées, puis un diplexeur qui permet de combiner les deux signaux en provenance de ces émetteurs en un seul signal, et enfin un splitter dont le but est de répartir l'énergie de ce signal entre quatre antennes disposées sur le fuselage de la fusée. Le signal est récupéré par une station au sol à l'aide de deux récepteurs.



L'objectif était de concevoir tous les éléments de la chaîne de transmission, des cartes électroniques accueillant les émetteurs et récepteurs jusqu'aux antennes. Ce travail a d'ailleurs été récompensé par une bourse décernée par l'organisme IEEE MTT-S félicitant les projets radiofréquences menés par des groupes d'étudiants.

4.2. Simulations

4.2.1. Objectifs

La conception des éléments radiofréquences nécessitait de réaliser des simulations préalables pour vérifier leur fonctionnement. Ces simulations électromagnétiques ont occupé une grande partie du travail réalisé sur la chaîne de transmission.

Grâce aux licences disponibles à l'ENSEIRB-MATMECA, nous avons pu simuler le comportement de l'antenne et du splitter sur CST Microwave Studio, et celui du diplexeur sur ADS. Une partie des simulations a également été réalisée sur Ansys HFSS au laboratoire Poly-Grames.

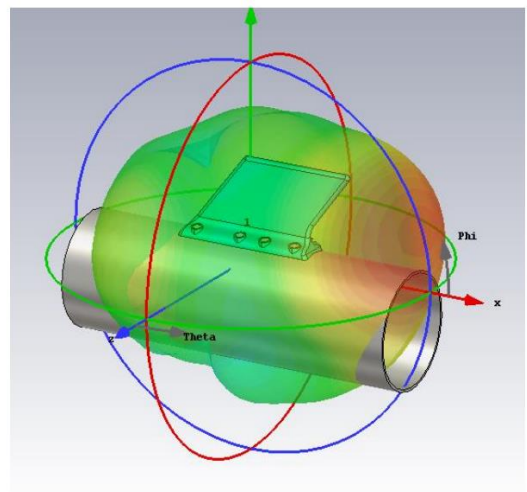
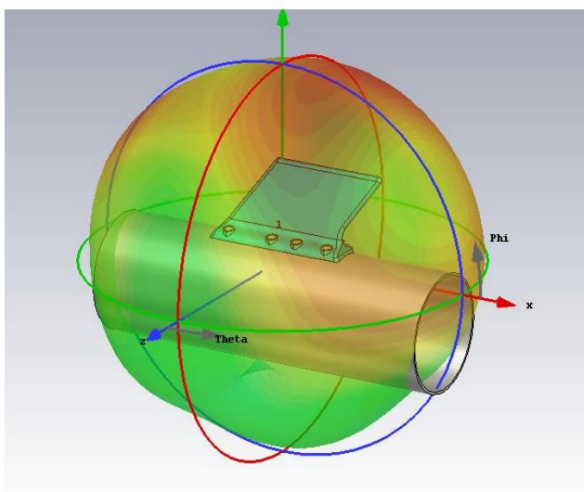
4.2.2. Antennes

La majeure partie du travail effectué concernait la conception des antennes car celles-ci présentaient plusieurs contraintes. En effet, ces antennes devaient pouvoir émettre aux deux fréquences considérées (antennes bi-bandes), mais aussi avoir un impact aérodynamique relativement faible car elles devaient être placées à l'extérieur du fuselage de la fusée pour pouvoir fonctionner.

Il a donc été choisi de concevoir des antennes en forme d'ailerons qui agiraient comme un empennage supérieur. La répartition autour du fuselage assure également la transmission quelle que soit l'orientation de la fusée.

Une première version fonctionnelle de l'antenne a été conçue, mais celle-ci n'était pas assez solide pour résister aux fortes contraintes mécaniques subies par la fusée. Un support imprimé en 3D a donc été rajouté pour solidifier l'ensemble. Une deuxième phase de simulation a donc été nécessaire pour corriger les modifications apportées par le support en plastique et les vis pour le fixer, ainsi que pour diminuer la surface de l'antenne.

Il est intéressant d'observer le rayonnement simulé des antennes pour savoir où placer la station de réception au sol. Sur la bande 870 MHz, le rayonnement est presque isotrope : c'est-à-dire que les données sont envoyées tout autour du tube de la fusée de manière uniforme (gain de 2dBi). En revanche, sur la bande 2,45 GHz, le rayonnement est directif : les données sont envoyées vers le bas de la fusée avec un gain plus élevé (5 dBi).

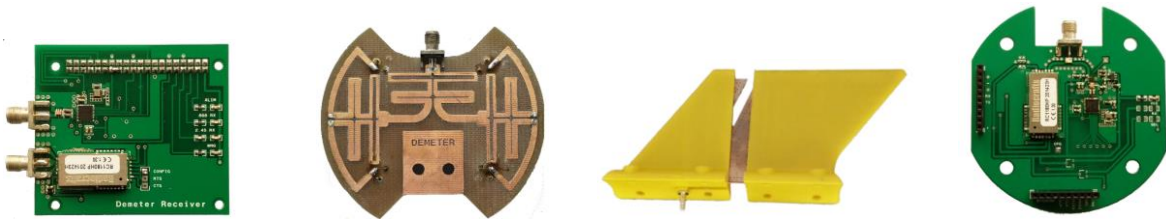


4.3. Fabrication et mesure

4.3.1. Fabrication

Les prototypes de cartes électroniques ainsi que les antennes ont été fabriqués à l'ENSEIRB-MATMECA par gravure chimique ainsi qu'à l'aide d'une fraiseuse LPKF. La dernière version des cartes d'émission et de réception ont été envoyées chez un fabricant spécialisées afin d'avoir un résultat plus convaincant.

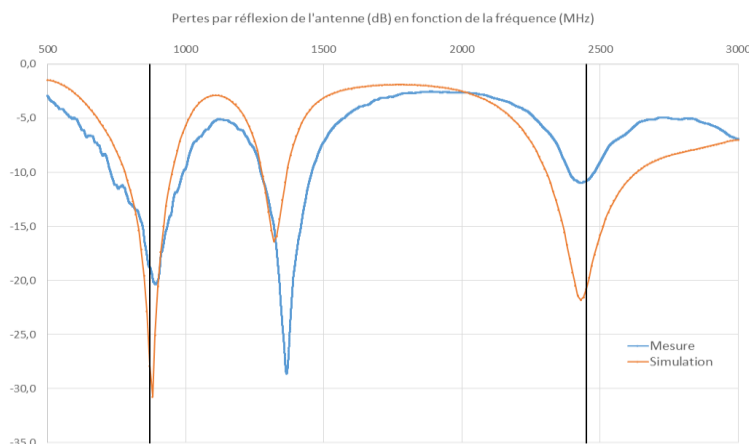
Les supports d'antenne en plastique ont été imprimés à EirLab, le nouveau FabLab de l'ENSEIRB-MATMECA.



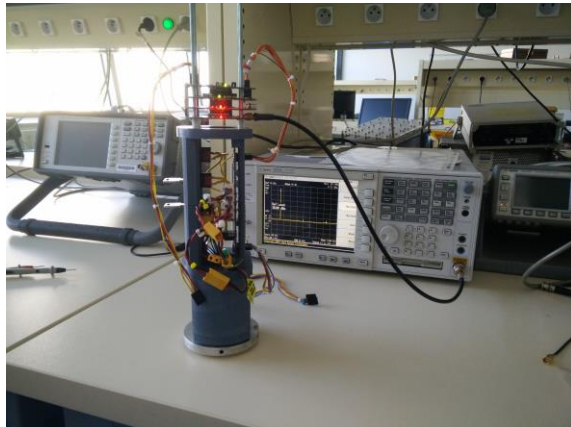
4.3.2. Mesures

Les mesures des éléments de la chaîne ont également été réalisées à l'ENSEIRB-MATMECA en utilisant principalement l'analyseur de réseaux et l'analyseur de spectres. Les mesures suivantes ont été réalisées :

- Adaptation de l'antenne
- Répartition de l'énergie par le splitter
- Filtrage et combinaison par le diplexer
- Pertes dues au câble coaxial reliant le diplexer au splitter
- Puissance en sortie de l'émetteur
-



Ces mesures ont été entreprises plusieurs fois car la conception de la chaîne a nécessité plusieurs prototypes de chaque élément. Les mesures des versions finales sont proches des résultats de simulation, excepté pour le diplexeur qui présentait trop de pertes, nous l'avons donc remplacé par un diplexeur du commerce. De plus, le rayonnement de l'antenne a été mesuré dans la chambre anéchoïque de Zodiac Data Systems sur leur site de La-Teste-de-Buch.



4.3. Bilan de liaison

En mesurant la puissance à la sortie du splitter, on peut estimer la portée en ligne de vue directe grâce à la formule de Friss. Cette formule comporte les puissances et les gains en émission et en réception ainsi qu'un facteur d'atténuation en espace libre dépendant de la distance. Pour calculer la portée, on remplace la puissance de réception par la sensibilité minimale du récepteur, à laquelle on ajoute 20 dB pour obtenir une valeur plus proche de la réalité.

$$P_{RX} = P_{TX} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \cdot (\lambda / (4\pi \cdot R))^2 \Rightarrow R = \sqrt{(P_{TX} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX}) / P_{RX}} \cdot \lambda / 4\pi$$

Fréquence	870 MHz	2,45 GHz
Puissance totale en sortie du splitter	25 dBm	15 dBm
Gain de l'antenne d'émission	2 dBi	5 dBi
PIRE	27 dBm	20 dBm
Gain de l'antenne de réception	2 dBi	2 dBi
Sensibilité minimale	-109 dBm	-102 dBm
Sensibilité pratique (-20 dB)	-89 dBm	-82 dBm
Portée estimée (LOS)	27,4 km	1,9 km

La portée réelle de la transmission a ensuite été mesurée en pratique dans une ligne droite une fois la fusée terminée. La distance maximale de la communication sur 870 MHz était d'environ 1,3 km et celle sur 2,45 GHz ne dépassait pas la centaine de mètres. L'origine de cette grande différence entre calculs et mesures est sans doute la présence du sol. En effet, la recombinaison des différents trajets dûs aux rebonds sur le sol réduit fortement la portée mais ceci n'est pas pris en compte dans la formule de Friss. Nous avons retrouvé ces ordres de grandeur en utilisant un modèle plus précis sur un récepteur équivalent.

Pour remédier à cela, nous avons choisi d'utiliser une antenne de réception plus directive que la précédente (antenne Yagi au lieu d'une antenne dipôle) qui permet d'atteindre une plus grande distance pour la bande 870 MHz, en contrepartie d'un lobe plus étroit (angle d'ouverture à mi-puissance de 60°)

En revanche, à cause de la faible portée de la bande 2,45 GHz combinée à de nombreuses interférences dues aux appareils voisins (Wifi, Bluetooth) et à des problèmes rencontrés lorsque les deux émetteurs fonctionnaient en simultanément, nous avons décidé de ne pas utiliser cet émetteur lors du lancement et de nous focaliser sur la première bande.

5. Résultats

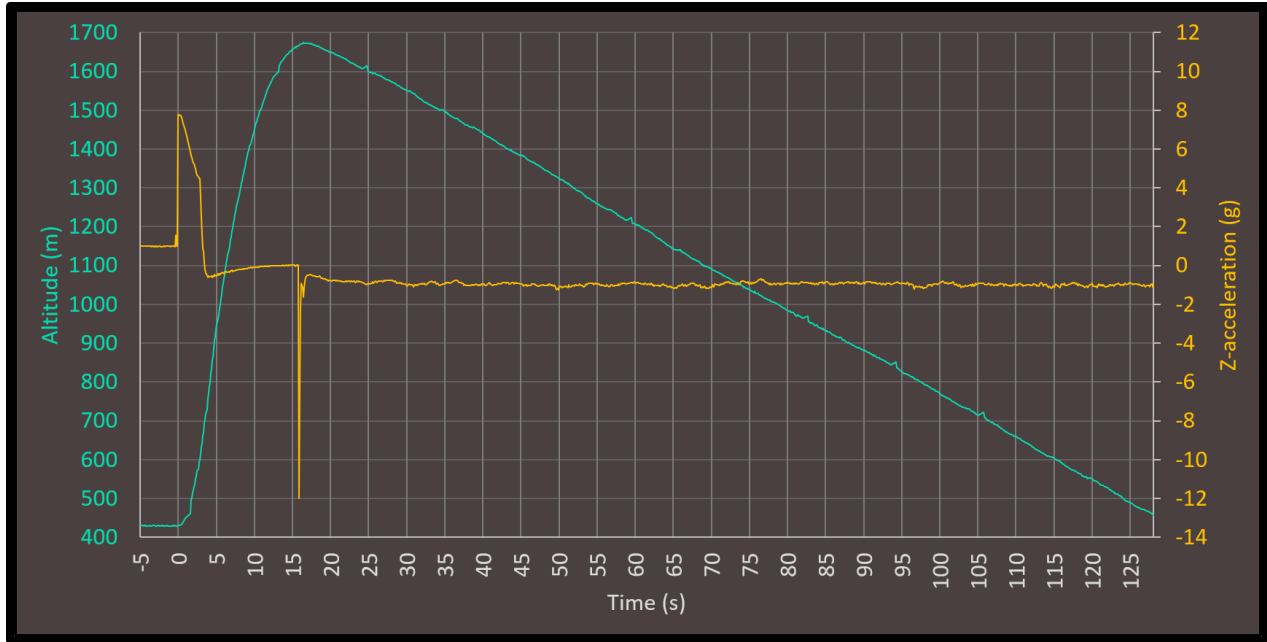
5.1. Télémétrie

Malgré les essais de télémétrie réalisés auparavant qui s'étaient avérés satisfaisants, la télémétrie semblait instable lors de nos essais au C'Space : la réception des trames sur le camp de Ger était très aléatoire et la portée maximale de réception réduite. Ceci peut être dû à des interférences en provenance d'autres clubs utilisant les mêmes fréquences pour leurs essais, ou bien à un défaut apparu sur l'un des éléments de la chaîne de transmission.

Plusieurs trames de données ont été reçues lorsque la fusée était mise en rampe, mais la réception s'est ensuite dégradée à cause d'interférences (réception de trames parasites). Nous avons finalement pris la décision de lancer la fusée même si la télémétrie était défectueuse.

5.2. Trajectométrie

Les données trajectométriques stockées à bord de la fusée ont pu être récupérées : l'altitude et l'accélération ont été correctement mesurées au cours du vol. La fusée est montée à 1250 mètres, tandis que les accélérations maximales sont de 8 g au décollage et de 12 g à l'ouverture du parachute. La vitesse moyenne de retombée est de 40 km/h.



5.3. Prise de Vue

Le flux vidéo stocké à bord de la fusée a également pu être récupéré. Bien que la nappe reliant le capteur vidéo à la Raspberry Pi se soit déconnectée à l'impact de l'atterrissage, le vol a été enregistré en intégralité.

