



Rapport de Projet

Projet Fuzeenn



ENSTA Bretagne
2 Rue François Verny 29200

Club : Spacieta

Année : 2022-2023

Johan Gantin (Partie Mécanique)
johan.gantin@ensta-bretagne.org

Simon Martineau (Partie Électronique)
simon.martineau@ensta-bretagne.org

Sommaire

- Sommaire..... 2
- Introduction..... 3
- Partie Mécanique..... 4
 - a) La structure globale..... 4
 - b) L'ogive..... 5
 - c) Le bloc électronique..... 5
 - c.1) L'intérieur..... 5
 - c.2) L'extérieur..... 6
 - d) Le bloc parachute..... 7
 - e) Le bloc moteur..... 9
 - f) Détection du décollage..... 10
- Partie Electronique..... 11
 - a) Le séquenceur..... 11
 - b) Le circuit expérience..... 12
- Expériences..... 13
 - a) Trajectographie..... 13
 - b) Déploiement calculé du parachute..... 13
- Cspace 2023..... 14
 - a) Les contrôles techniques..... 14
 - b) Le vol..... 16
- Résultat Expérience..... 18
 - a) Les données brutes..... 18
 - b) Les données traités..... 21
 - c) Trajectoire..... 23
- Conclusion..... 24

Introduction

Le club Spacieta participe depuis 2005 à la campagne de lancement du C'space organisé par Planète Science durant l'été. La fusée marque la 12ème fusée lancée par ce club. Cette année, l'équipe de la fusée *Fuzeenn* composée de nouveaux membres du club a décidé de se lancer dans un nouveau projet de Mini-fusée. L'objectif est de réaliser, en un an, un engin fiable qui embarque une expérience de trajectographie.



Figure 1 : Logo de la fusée Fuzeenn

Dans la suite du rapport, nous allons détailler la structure de la fusée, son système électronique, les résultats de notre expérience ainsi que les leçons que nous avons apprises au cours de l'année.

Partie Mécanique

a) La structure globale

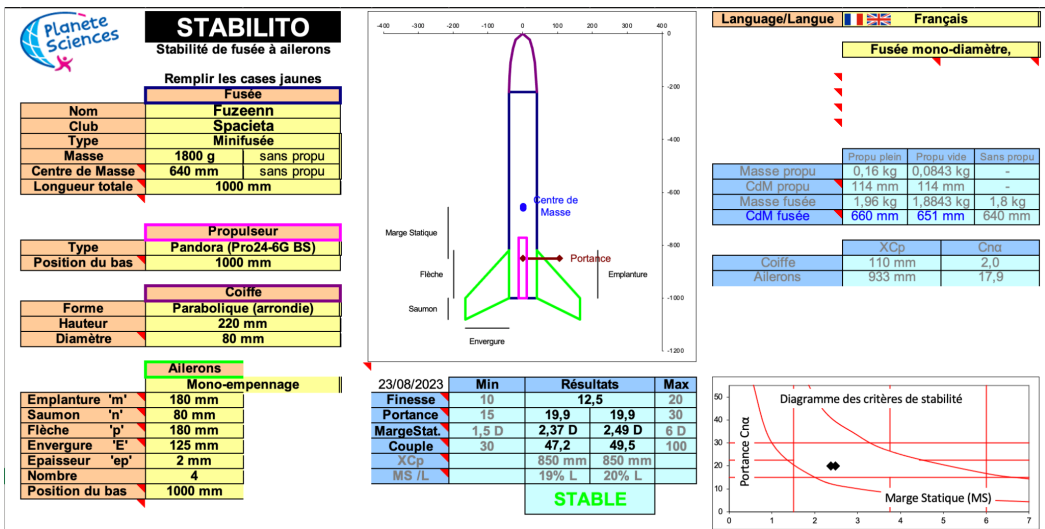


Figure 2 : Stabtraj de Fuzeenn

Nous sommes partis sur un squelette intérieur constitué de 2 tiges filetées qui fait le support des différentes parties. La peau extérieure sera un tube PVC.

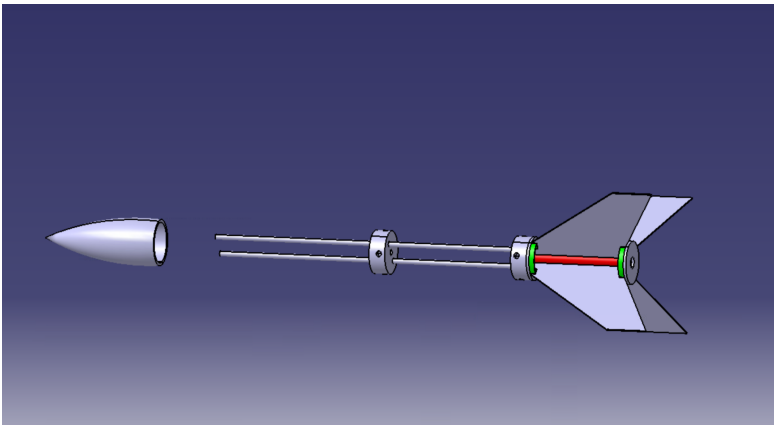


Figure 3 : CAO de l'intérieur de Fuzeenn

Cette structure possède l'avantage d'être solide et nous permet de fixer tous les différents éléments au squelette intérieur ou à la peau extérieure. Il est facile à l'aide d'écrou d'étager et de fixer la structure globale. Cependant, l'inconvénient principal est le manque de place. En effet, les tiges filetées prennent rapidement un espace conséquent dans notre tube de petit diamètre (80mm). Ce type de montage présente aussi la difficulté de devoir visser les écrous sur toute la longueur.

b) L'ogive

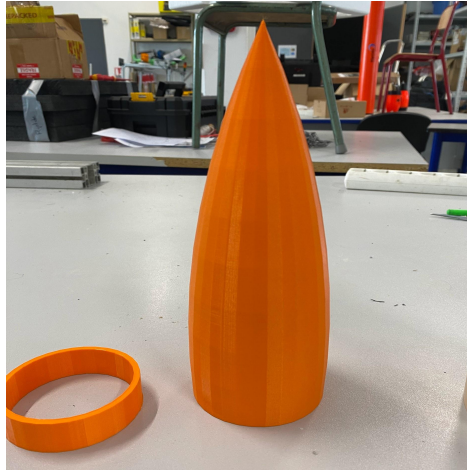


Figure 4 : Ogive imprimé de Fuzeenn

L'ogive a été imprimée en PLA. L'ABS aurait pu être un autre choix pour avoir une meilleure résistance thermique dans le cas d'une température élevée durant l'évènement.

c) Le bloc électronique

c.1) L'intérieur

Le haut de la fusée a été réservé pour la partie électronique. Nous avons fabriqué un support qui devait être amovible. L'idée était de faire comme un " tiroir " par le haut du tube.



Figure 5 : Support imprimé de l'électronique

Le concept était de pouvoir montrer et réparer facilement tous les composants. Cependant, le résultat n'a pas été concluant car l'électronique embarquée nécessitait beaucoup de fils et des composants ont dû être fixés sur la peau intérieure du tube. Ainsi le tiroir est difficilement amovible car il y a un grand risque d'endommager ou arracher les soudures.

Pour améliorer le concept, il faudrait qu'aucun élément ne soit sur la peau et qu'ils soient uniquement fixés sur ce support. Un peu comme une boîte noire qu'on sortirait de la fusée avec des sorties électriques clairement définies.

c.2) L'extérieur

Un système de LED et d'interrupteurs a été fixé sur la partie extérieure pour visualiser/enclencher la trappe et notre expérience.



Figure 6 : LEDs et interrupters

Le principal avantage est que tout est facilement accessible néanmoins cette version est à abandonner pour un lancement en cage. Le risque est trop important d'avoir un choc qui désactive les interrupteurs présents. Il serait plus habile de les mettre à l'intérieur avec un petit trou pour les activer à la main ou faire une trappe.

d) Le bloc parachute

Nous avons essayé de faire une structure la plus simple possible pour la trappe du parachute. Pour commencer le parachute est fixé à un anneau et se range dans un petite poche qui empêche la voile de s'enrouler autour des tiges filetées.

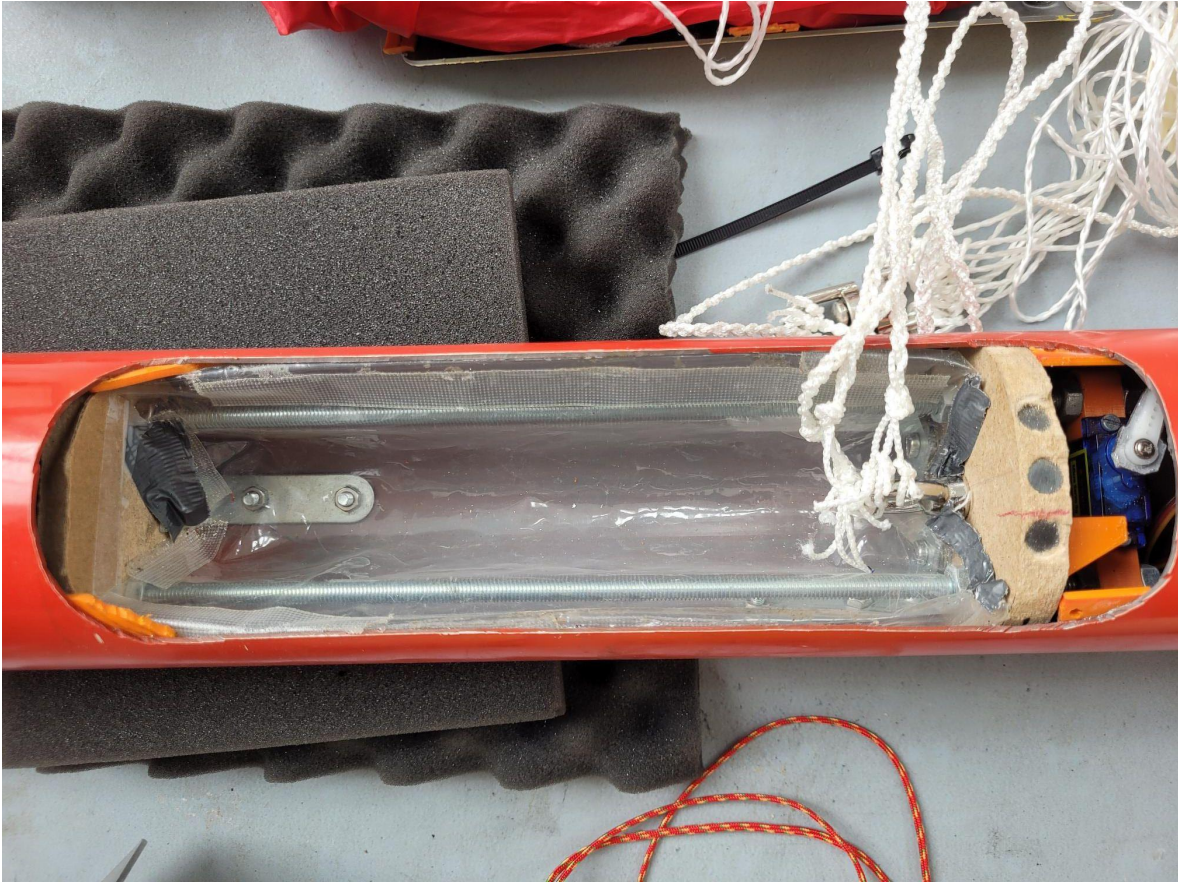


Figure 7 : Trappe parachute vide

La serrure a été faite en forme de crochet pour fonctionner avec un servo moteur qui la maintient en position.

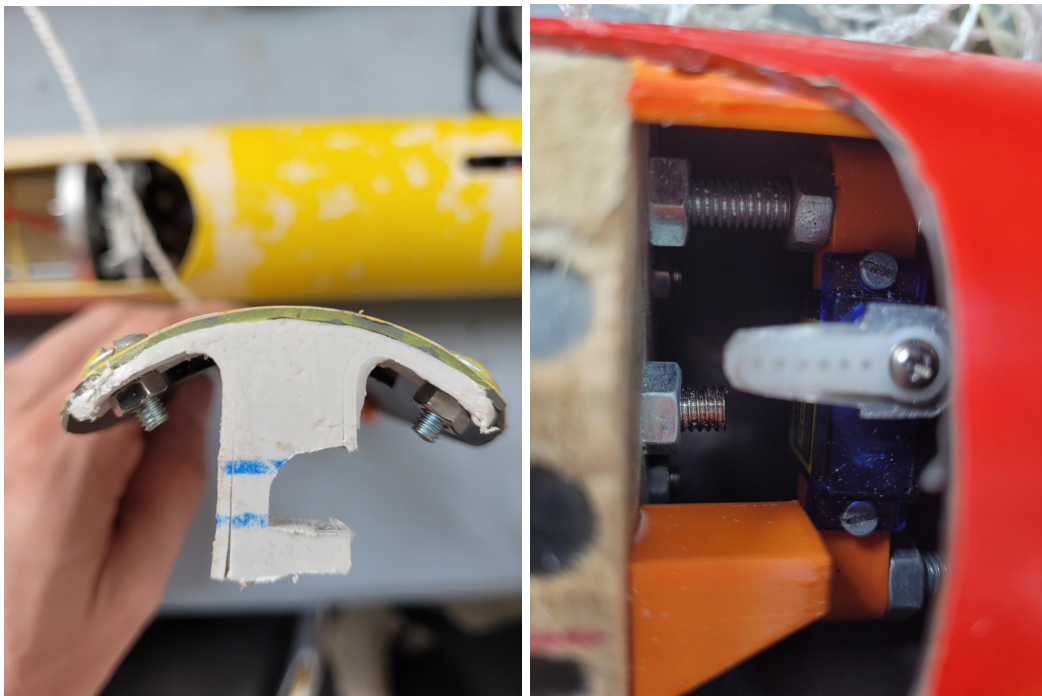


Figure 8 : Système serrure de la trappe

Nous avons installé des aimants sur la trappe et le corps de la fusée, ces aimants se repoussent et participent à l'éjection de la trappe.

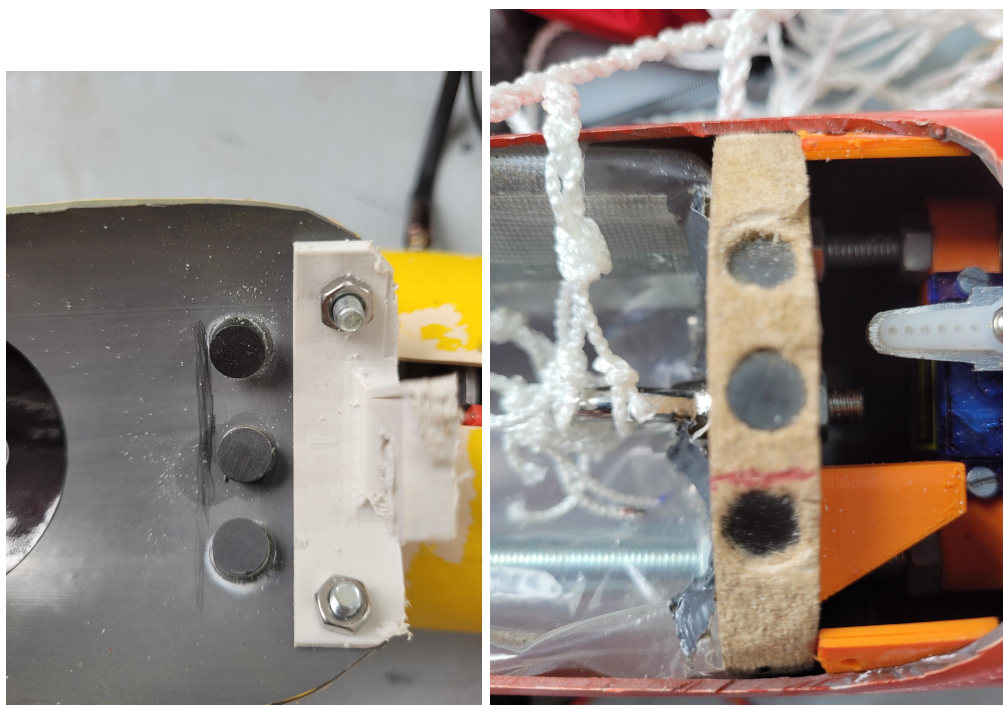


Figure 9 : Système ouverture à aimants de la trappe

Nous avons fait l'erreur de prendre un servo moteur bleu, c'est à éviter car ils ne sont pas assez puissants et de mauvaise qualité.

e) Le bloc moteur

Le bloc moteur a été construit pour 4 ailerons en les reliant par des équerres. Il s'ajuste au tube pvc avec des rainures sur lequel on vient le visser.



Figure 10 : Bloc moteur de Fuzeenn

Le moteur pandora est retenu par un élément mécanique qui se déplace en rotation.



Figure 11 : Système retenu du moteur

f) Détection du décollage

Nous utilisons une prise jack pour détecter le décollage. Nous avons fixé sur la peau extérieur une sortie :



Figure 12 : Prise jack de Fuzeenn

Lorsque la prise jack est arrachée, la sortie détecte que la fusée a décollé.

Une meilleure idée serait de faire passer le courant dans la prise jack tel un circuit fermé. L'avantage est que si le fil se sectionne, alors le séquenceur détecte quand même le décollage.

b) Le circuit expérience

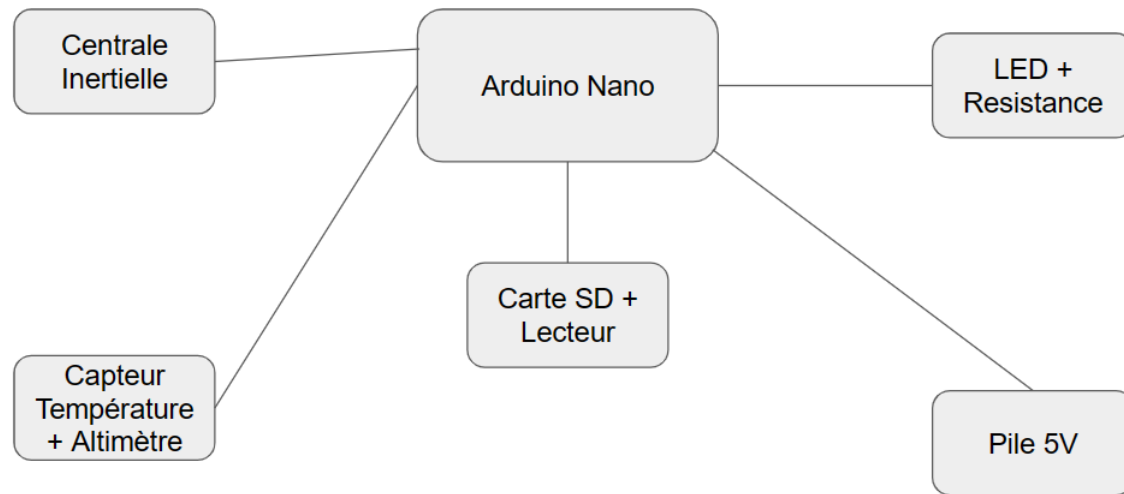


Figure 14 : Circuit expérience de Fuzeeenn

Liste des composants :

- Une arduino Nano Every
- Une carte SD (MSD 8GB)
- Un lecteur carte SD
- Une pile 5V
- Un interrupteur
- Une LED
- Une centrale inertielle (SEN-MPU6050)
- Des cables
- Capteur température
- Capteur température + altitude (Module BMP280)

Expériences

a) Trajectographie

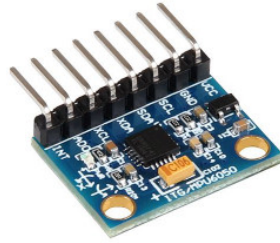


Figure 15 : Centrale Inertielle SEN-MPU6050

Voici le module SEN-MPU6050 que nous avons acheté sur le site Gotronic. Il est capable de mesurer des accélérations allant jusqu'à $\pm 16g$ et des accélérations angulaires allant jusqu'à $\pm 2000^\circ/s^2$. Cette capacité nous permet d'éviter toute saturation lors du décollage de la fusée.

Lors de l'installation du capteur, nous n'avons pas pris en compte l'importance de l'aligner avec l'axe de rotation de la fusée. Ceci pose un léger problème pour les mesures d'accélération angulaire. Idéalement, nous aurions dû calculer une matrice de correction pour ajuster les mesures, mais nous avons jugé que cet écart était négligeable.

b) Déploiement calculé du parachute

Dans notre deuxième expérience, nous avons cherché à utiliser les données fournies par l'accéléromètre afin de permettre à la fusée de déterminer avec précision le moment où elle atteignait son apogée, déclenchant ainsi le déploiement du parachute. Pour ce faire, nous avons dû établir une communication entre le circuit expérimental de la fusée et le séquenceur, tout en évitant une connexion électrique directe. Notre choix s'est porté sur l'utilisation d'un optocoupleur pour répondre à cette exigence.

Cependant, en l'absence de données antérieures sur le comportement de la centrale d'inertie durant un vol, nous étions inquiets qu'une erreur de calcul ou de filtrage puisse entraîner un déploiement trop tôt ou trop tard du parachute, même au sein d'une fenêtre de déploiement prédéfinie.

Par conséquent, nous avons pris la décision de ne pas mettre en œuvre cette approche et avons opté pour l'utilisation du chronomètre intégré à l'Arduino de la fusée.

Cspace 2023

a) Les contrôles techniques

Le C'space 2023 s'est déroulé du 15 juillet au 22 juillet 2023 au 1^{er} régiment de parachutistes à Tarbes et le club s'est présenté avec les deux membres du projet et une fusée complètement finie.

Nous avons pu rapidement passer la plupart des tests à 70%. Un défaut est survenu pendant l'évaluation de la fusée : la trappe pouvait s'ouvrir lorsqu'on effectuait des efforts manuels transverses.

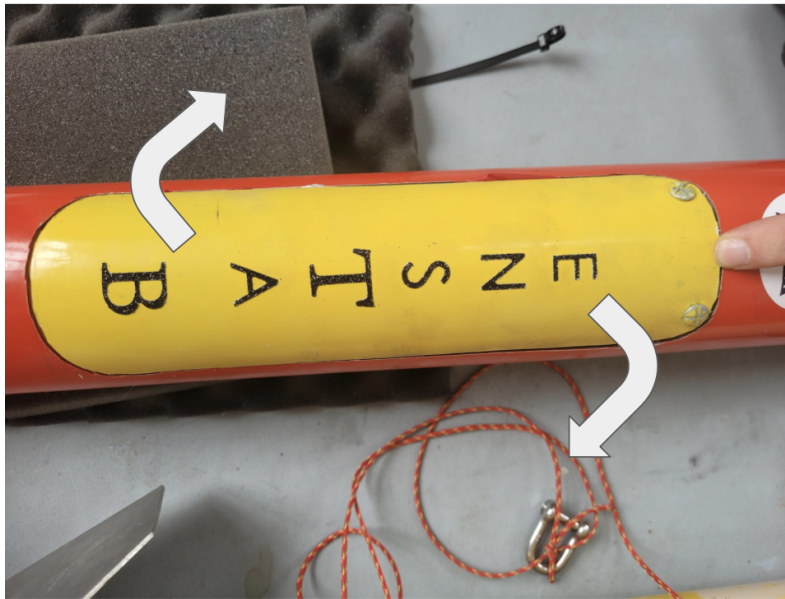


Figure 16 : Mouvement possible

Nous avons alors pris l'initiative de coller un élément directement à l'intérieur de la fusée qui empêchait alors ce mouvement. Le défaut a été ainsi rapidement résolu.

Les contrôles ont aussi montré que la trappe dépassait au niveau du corps. Ce détail augmente le risque d'une ouverture précipitée et dangereuse lors du décollage.



Figure 17 : trappe qui dépasse

Nous avons alors réimprimé la pièce qui constitue notre serrure et nous avons pas à pas fait le réglage du niveau au millimètre près.



Figure 18 : trappe finale

Avec la correction de ces deux défauts et l'écriture de la chronologie de vol , la fusée était qualifiée et en attente de son décollage.

b) Le vol

Nous avons pu nous présenter sur le pas de tir dès le créneau de vol et être la première fusée issue d'un club à décoller.



Figure 19 : Photo de la préparation du décollage

Le décollage de la MF16 à 16h16 s'est bien déroulé, la fusée suit une trajectoire nominale.



Figure 20 : Photos du décollage de Fuzeenn

Le parachute s'est bien ouvert et la redescente est lente comme prévu (nous avons une grande voile de parachute). La fusée s'est posée délicatement et seulement une led a été arrachée suite au frottement avec la cage.



Figure 21 : Photos de l'atterrissage de Fuzeenn

Résultat Expérience

a) Les données brutes

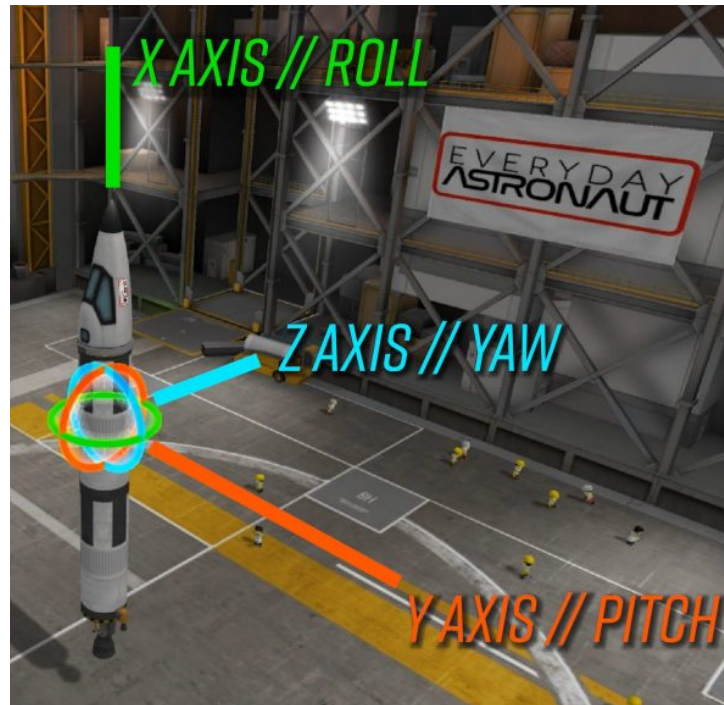


Figure 22 : Représentation des axes de la centrale inertielle de la fusée (image de Everyday Astronaut)

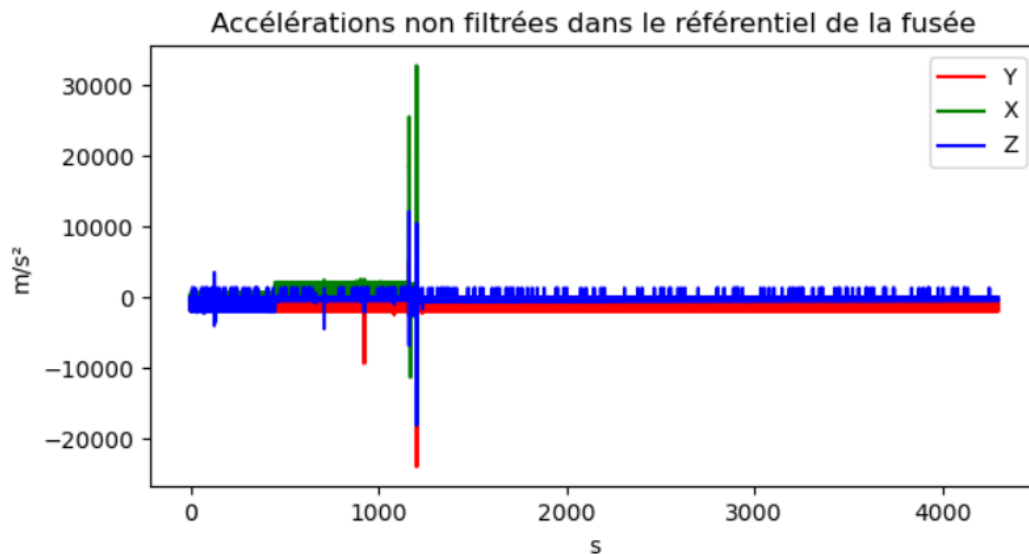


Figure 23: Graph des accélérations non filtrées dans le référentiel de la fusée

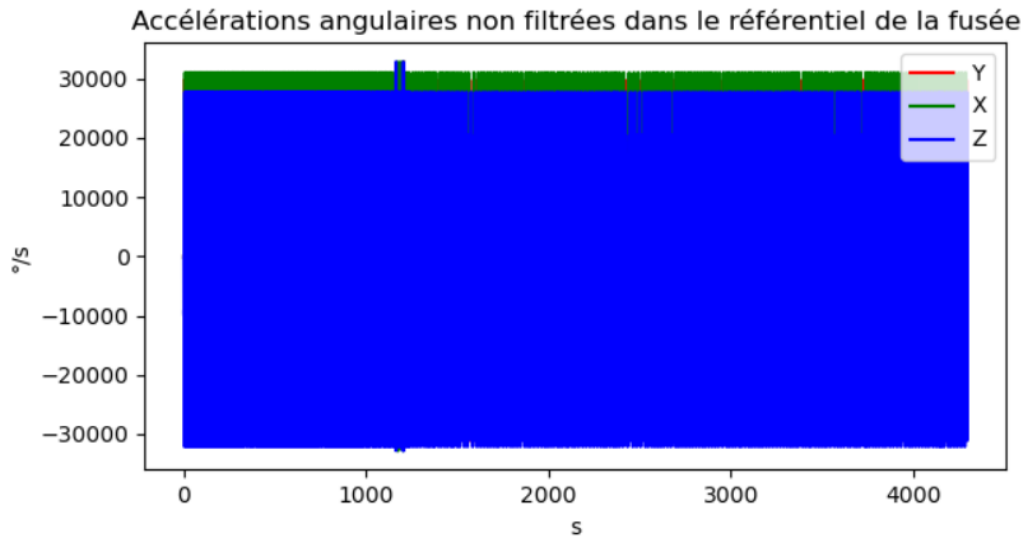


Figure 24: Graph des accélérations angulaires non filtrées dans le référentiel de la fusée

Sur le graphique des accélérations, trois pics distincts sont perceptibles. Ces pics se trouvent espacés d'environ 40s, ce qui nous amène à penser qu'ils correspondent respectivement au moment du décollage de la fusée et à son impact au sol après le vol. En revanche, le graphique des accélérations angulaires demeure peu intelligible sans une étape de filtrage préalable.

Il est important de noter que les accélérations sont référencées ici dans le système de la fusée comme le montre la figure ci-dessus. Nous passerons dans un référentiel terrestre au moment de faire la trajectoire.

Par ailleurs, nous avons observé que les valeurs enregistrées ne sont pas en adéquation avec la réalité : la centrale inertielle aurait dû saturer à 16g, équivalent à 160 m/s^2 et non à 30000 m/s^2 . En réponse à cette incohérence, nous avons pris la décision de normaliser les données de manière à les rendre cohérentes.

Bien que nous n'ayons pas prévu d'utiliser ces capteurs pour notre expérience, nous avons décidé de mettre un capteur de température et de d'altitude sur notre fusée. Nous avons enregistré les données, mais une erreur au niveau des 2 capteurs nous a donné des résultats non exploitables.

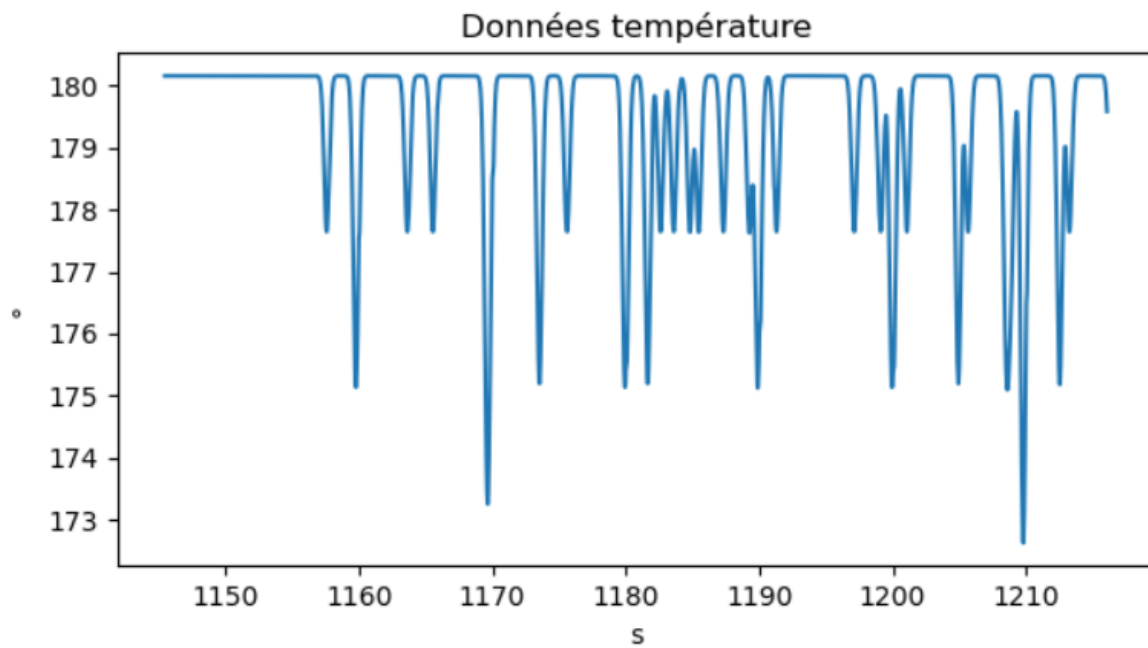


Figure 25 : Graph des données températures

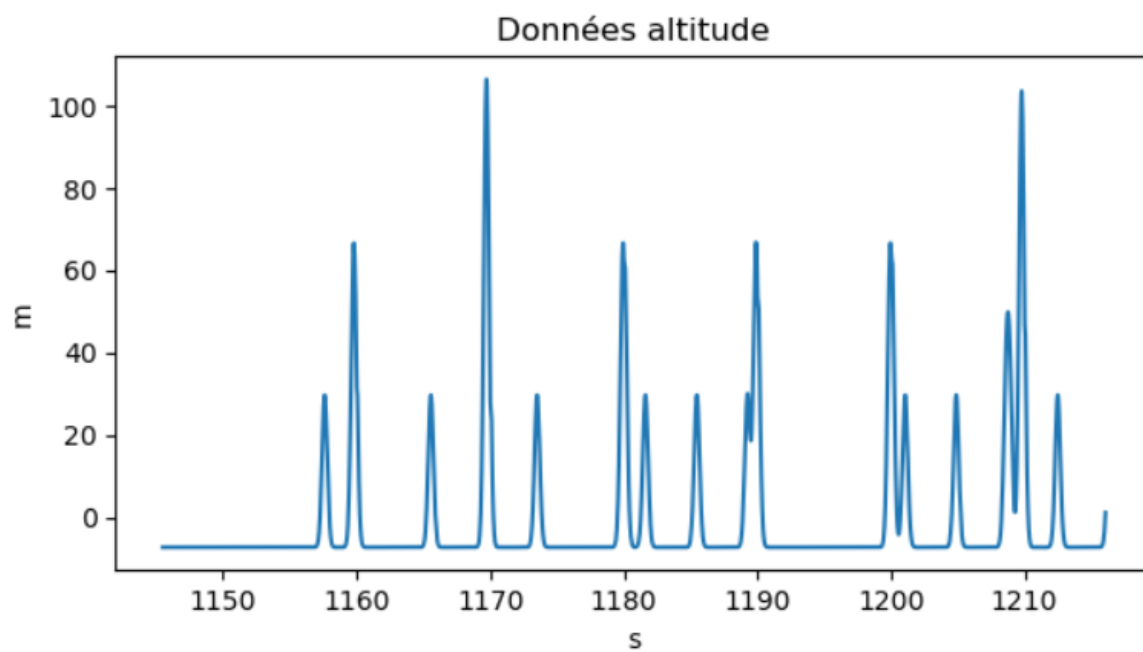


Figure 26 : Graph des données altitude de l'altimètre

b) Les données traitées

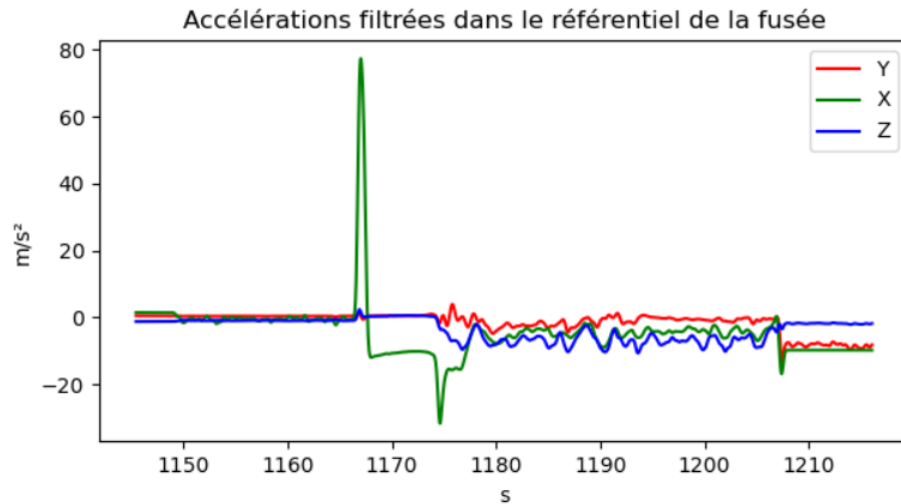


Figure 27: Graph des accélérations filtrées dans le référentiel de la fusée

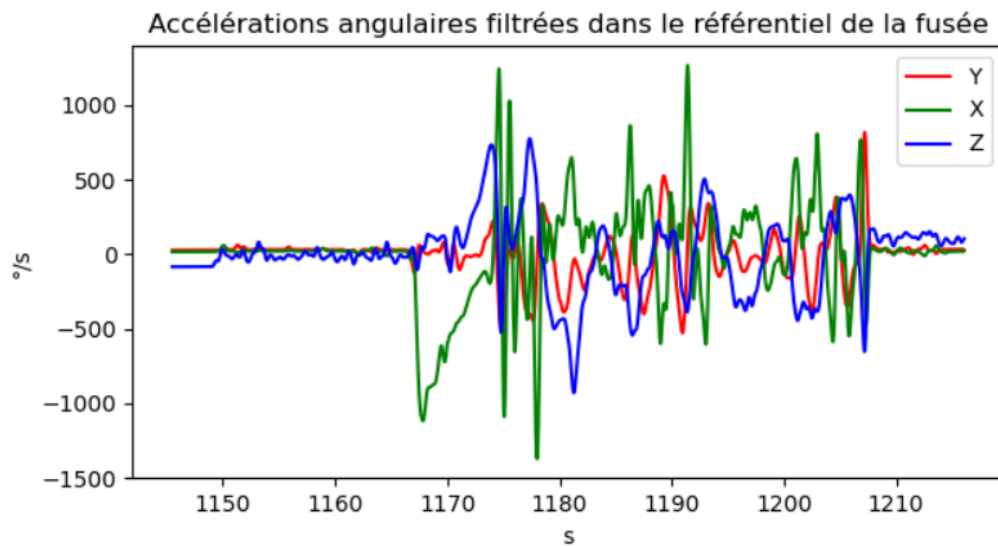


Figure 28: Graph des accélérations angulaires filtrées dans le référentiel de la fusée

En appliquant un filtre passe bas récurrent du premier ordre 1 avec un coefficient alpha de 0.2, nous avons pu obtenir un graphique des accélérations angulaires bien plus lisible. Nous avons aussi appliqué ce filtre sur les données de l'accélération, mais cette fois en ajustant le référentiel avec les données des accélérations angulaires.

On retrouve les différentes phases du vol dans ces 2 graphes.

Entre 1150s et 1166s :

Initialement, la fusée n'accélère pas. Les accélérations angulaires sont quasiment nulles aussi.

A 1166s :

On voit un pic sur l'axe Y, ce qui correspond au décollage de la fusée. Il y a un pic sur l'accélération angulaire autour de Y de la fusée. Ceci peut vouloir dire que la fusée a eu un mouvement de roulis durant sa phase de décollage.

Entre 1166s et 1175s :

Ensuite la fusée accélère vers le sol, on peut voir une décélération de Y sur le graph. Ceci implique que la fusée devait avoir la coiffe pointée vers le haut. L'accélération angulaire de la fusée autour de Y diminue.

A 1175s :

On a un pic sur Y vers 1175s qui correspond au déploiement du parachute. Le changement brutal de la fusée à cet instant peut se lire sur le graph des accélérations angulaires, les 3 axes ont des pics à cet instant.

Entre 1175s et 1208s:

Sur les 3 axes, on peut voir une phase bien moins stable, c'est la descente de la fusée qui dure environ 30s. On peut aussi voir sur le graph des accélérations angulaires que les valeurs sur les 3 axes sont aussi très élevées. On pense que ceci est dû au mouvement d'oscillations que fait la fusée durant sa phase de descente.

Après 1210s :

Le graph devrait présenter les mêmes données qu'avant le décollage, nous n'avons pas trouvé pourquoi il y a une décélération sur X et Y. Les 3 accélérations angulaires sont quasiment nulles aussi.

c) Trajectoire

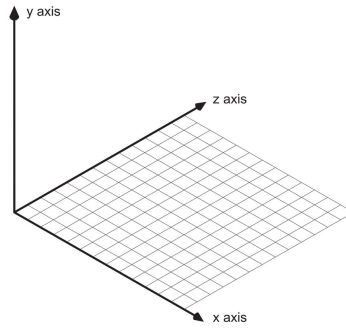


Figure 29 : Graph de l'orientation des axes dans le référentiel terrestre.

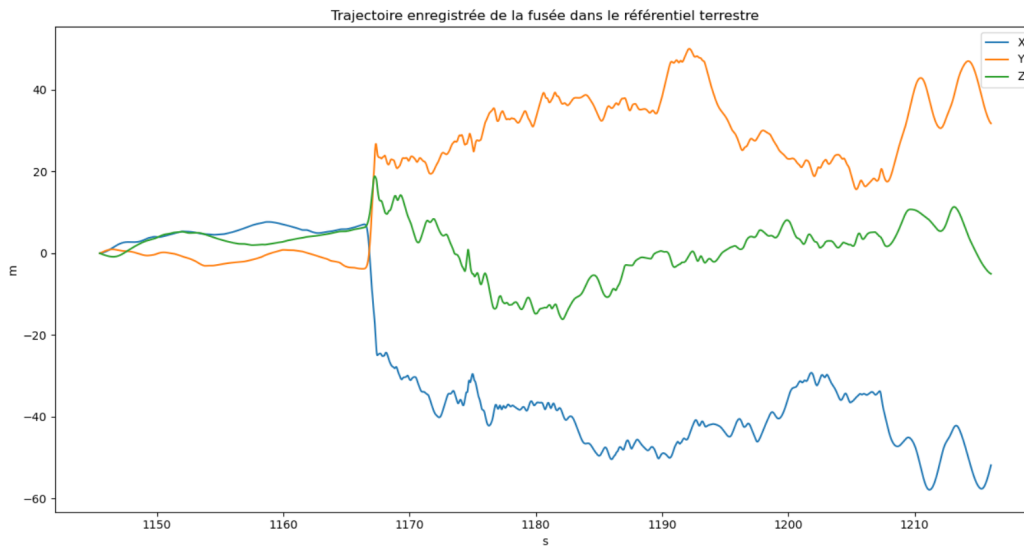


Figure 30 : Trajectoire simulé de la fusée

Nous pouvons constater assez facilement que cette trajectoire enregistrée de la fusée comporte quelques erreurs. Premièrement, la fusée semble se déplacer avant l'instant 1166s, le moment du décollage d'après les graphes d'accélération. La fusée semble aussi subir pendant son vol des variations de mouvement très rapides sur les 3 axes. Notamment, la trajectoire de la fusée sur Y ne ressemble pas à une parabole. De plus, sur stabtraj la fusée était prévu de voler environ 300m, cependant ici on trouve qu'elle n'a pas dépassé 50 m.

Nous pensons que ces écarts sont dus à quatre raisons principales. Premièrement, la centrale inertielle manque de précision qui provoque des erreurs démultipliées lors des 2 intégrations. Ensuite il y a la centrale inertielle qui n'est pas parfaitement sur l'axe de révolution de la fusée, bien qu'on suppose que c'est le cas dans nos calculs. Enfin, la méthode d'Euler est connue pour ne pas être très coûteuse en calculs, mais donne des erreurs plus importantes. Il y a aussi le fait que les conditions initiales de la fusée n'ont pas été mesurées sur le site de lancement. La position et la vitesse étaient connues, mais pas les angles ce qui impacte ensuite la trajectoire lors du changement de référence.

Conclusion

Nous avons réussi à mener à bien ce projet d'une mini-fusée durant un an. La structure globale imaginée a été fonctionnelle et nous avons pu tester certaines idées. Le C'space, les RCE et le travail accompli ont été riches en enseignements. Nous avons à présent beaucoup de nouvelles idées pour les prochains projets du club.

Nous remercions encore Planètes Science et tous les bénévoles qui rendent ces événements possibles. Nous espérons participer l'année prochaine avec un nouveau lancement.



Figure 33 : Photo après le lancement réussi de la fusée