

SAGITTARIUS

FUSÉE EXPÉRIMENTALE

RÉALISATION :

Maxime BRIERE

Lucas GRELAUD

Titouan LEPAROUX

Valentin MICHEL

Charles PILON

2018

2019

planète
sciences

une aventure pour les jeunes

cnes

Résumé

Ce projet avait pour **objectif principal de relancer les activités du club** en termes de lancement de fusées (*pas de fusée lancée depuis 2017*). Pour cela, nous avons formé une équipe essentiellement formée de **nouveaux élèves** dans l'école. Cette fusée avait pour objectif de **tester une peau porteuse en fibre de verre** faite à l'école ainsi que d'effectuer une **trajectographie 3D du vol** à l'aide d'accéléromètres.

La fusée a effectué un **vol nominal**, la peau en **fibre de verre s'est avérée fonctionnelle** (*quoiqu'un peu lourde*) et nous avons été en mesure de **récupérer toutes les données du vol sur carte SD** comme prévu.



© Pierre Champion - CNES

Introduction

Ce projet a été fait dans un contexte de relance du club d'aérospatial de notre école : Air ESIEA. L'an dernier, des étudiants ont récupéré et relancé l'association, délaissée depuis près de deux ans. Ils ont réussi à amener une fusée au C'Space, mais cette dernière, faute de système de récupération stable, n'avait pas pu être lancée. L'objectif était donc cette année de relancer définitivement les activités du club en menant un projet à bout et lançant une fusée !

L'équipe :



Charles Pilon – Chef de projet, chargé de la communication avec l'école et planète sciences ainsi que du système de récupération.



Valentin Michel – Chargé de la mécanique et de l'intégration.



Maxime Brière – Chargé des expériences embarquées.



Titouan Leparoux – Chargé des expériences embarquées.



Lucas Grelaud – Chargé de la modélisation avant-projet.

Excepté Charles et Valentin, aucun des membres n'avait jamais entrepris de tel projet, cela nous a amené à choisir une expérience simple afin de pouvoir se concentrer sur le reste de la fusée.

Gestion de la documentation et travail

Tous les documents en rapport avec le projet sont **hébergés sur la plateforme de stockage du serveur d'AIR ESIEA** mis en place par des **étudiants d'InTech** dans le cadre de leur **projet informatique**.

En plus d'être stockés sur le serveur de l'association, les plans 3D de la fusée sont **stockés sur le service de cloud d'Autodesk Fusion 360** afin de permettre à tout les membres d'y avoir accès depuis un ordinateur disposant du logiciel.

Une **copie physique** de tous les documents mis à jour est également disponible au local de l'association.

Les **versions antérieures** des documents sont **conservées** afin de pouvoir les réutiliser en cas de besoin.

Le serveur de l'association nous permet également d'organiser les tâches à faire durant les horaires de travail, ayant généralement lieu les mercredis soir et jeudi après-midi.

Description mécanique

Description générale

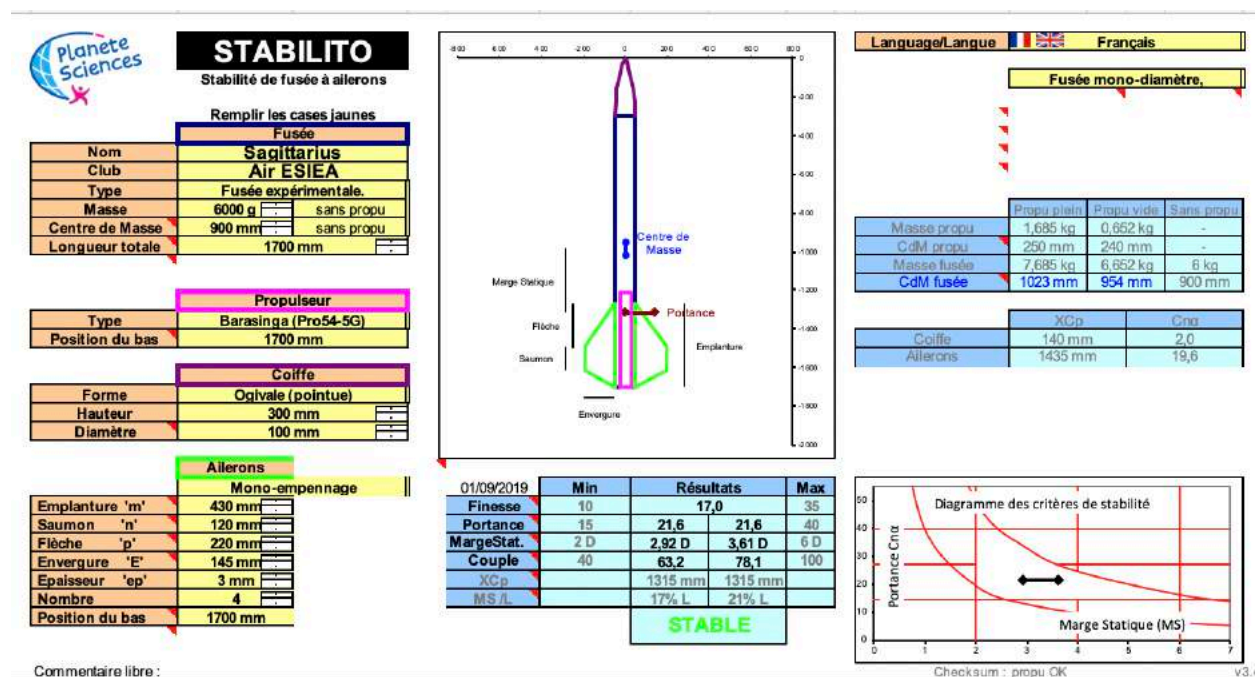


Figure 1 : Stabilité du projet

L'intégration globale de la fusée s'effectue comme suit :

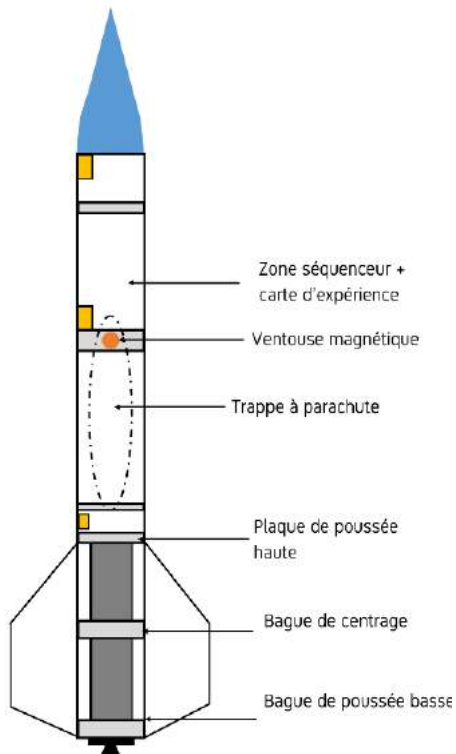


Figure 2 : Plan d'intégration global de la fusée

Les blocs en jaune représentent ici la position des différents capteurs d'accélération.

Il est à noter que pour des raisons techniques d'adressages que nous n'avons pas réussi à résoudre, seul le capteur d'accélération contenu sous la coiffe était actif durant le vol.

Ailerons et fixations

Les ailerons sont faits en aluminium 4G et ont une épaisseur de 3mm, leur forme est la suivante :

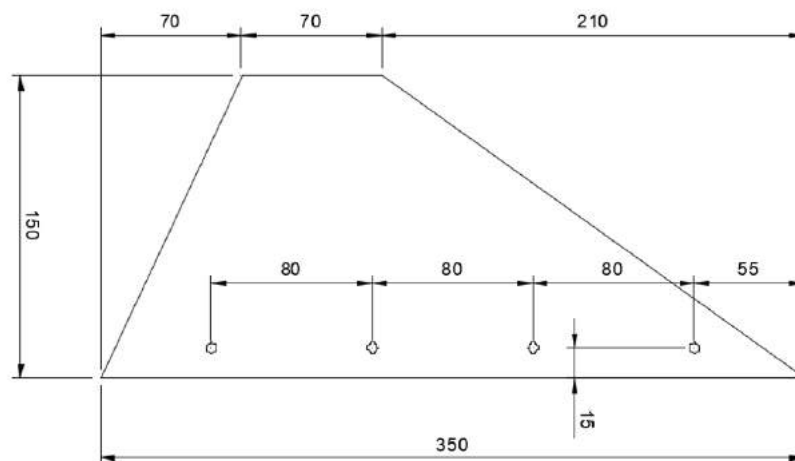


Figure 3 : Ailerons

Ces ailerons sont attachés en trois points chacun trouvant son point d'ancrage dans une des bagues du système de récupération de la poussée du propulseur.



Figure 4 : fixation des ailerons

Reprise de la poussée

La reprise de la poussée du propulseur (*pro-54 5G Barasinga*) se fait **par le bas** de ce dernier, **deux bagues de centrages** sont situées plus haut afin de s'assurer que le vecteur de poussée soit bien dirigé vers le haut.

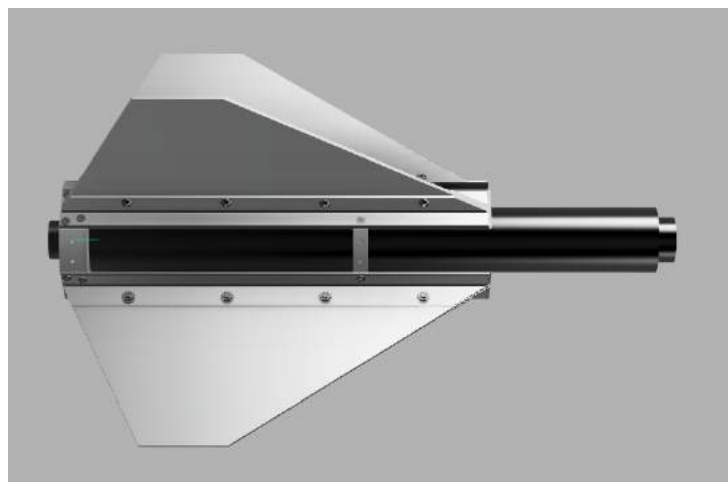


Figure 5 : Propulseur dans son logement

La bague de centrage haute n'apparaît pas sur l'image précédente, mais elle est la même que la bague de centrage centrale.

La bague de **reprise de poussée** (en bas) est une **bague de delrain** de **15mm d'épaisseur** pourvue d'un trou de **54mm** en son centre. Les bagues de **centrage** sont du même type mais leur épaisseur n'est que de **10mm**.

Peau porteuse

L'élément principal de la fusée est sa **peau porteuse** (*c'est-à-dire la peau qui va reprendre les efforts de la poussée du propulseur*). Au départ, nous voulions faire cette dernière en fibre de carbone, cependant, ce matériau s'avérait être **onéreux et difficile à travailler**, nous nous sommes donc rabattus sur la **fibre de verre** ; un matériau **léger et résistant** ayant l'avantage de **ne pas coûter cher**.

Nous procédons comme suit : Dans un premier temps, nous **découpons la fibre** achetée en rouleaux. Nous **appliquons successivement des couches de fibre et de résine epoxy** sur un moule jusqu'à obtenir l'épaisseur souhaitée (*15 dabs notre cas car nous voulons que la peau soit porteuse*). Cette étape est suivie par une étape de démoulage puis de ponçage.

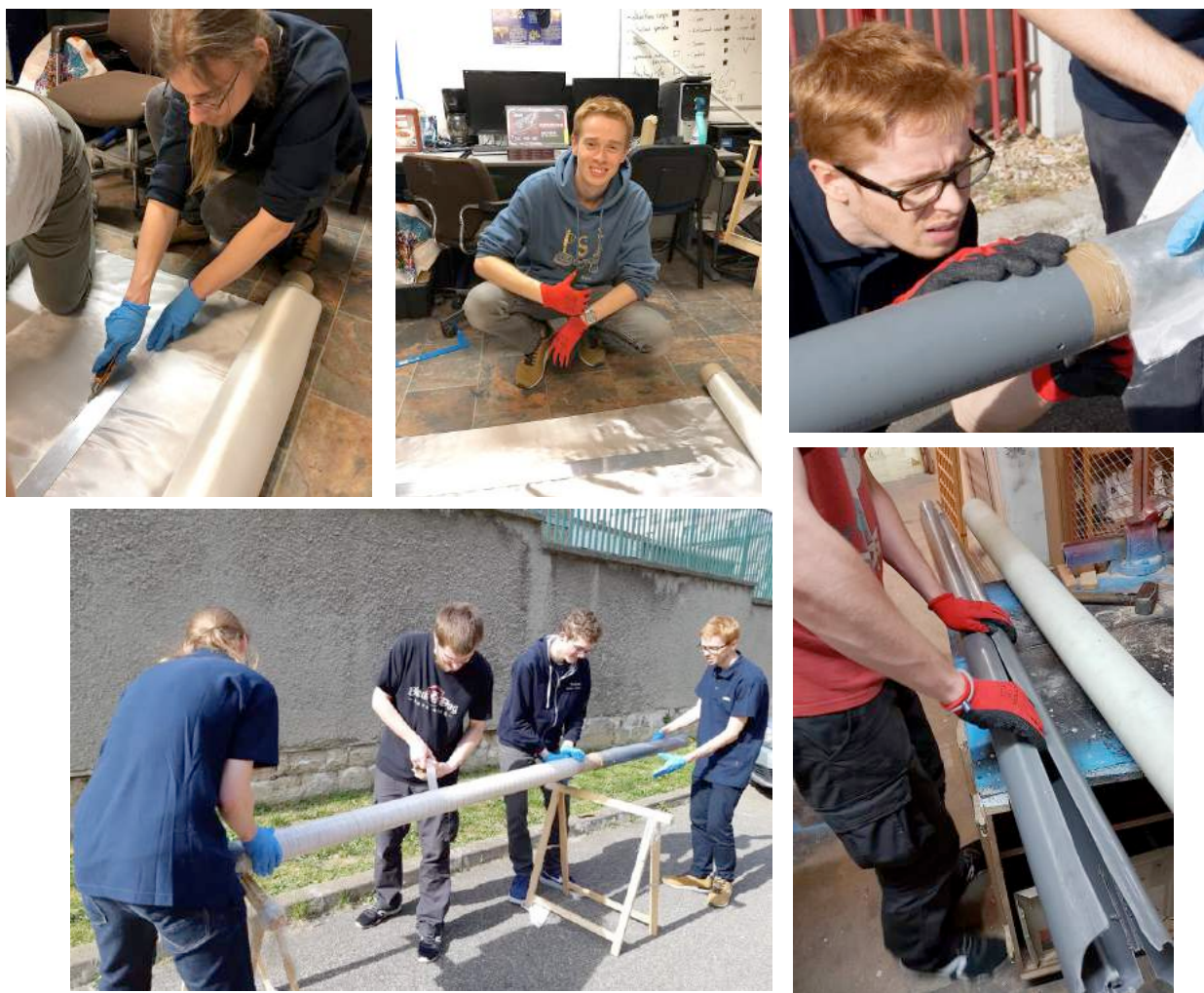


Figure 6 : Fabrication du tube de la fusée

Système de récupération

Pour ce projet, notre système de récupération consiste en une porte latérale s'ouvrant à l'apogée et libérant un parachute.

Il a dans un premier temps fallut **découper une trappe dans le tube** ; cette opération fut complexe car nous voulions **récupérer la pièce découpée** afin de l'utiliser comme porte sans avoir à en fabriquer une nouvelle.



Figure 7 : Photos de la découpe de la trappe à parachute

Le parachute est de **type rond** et a été **plié suivant la méthode préconisée par les militaires sur le camp**. Il est à noter qu'il avait **énormément de place** dans son logement et qu'il **sortait de la trappe sans aucune difficulté** une fois plié.

La trappe était **attachée sur le haut du parachute** (sur la couture bordant la cheminée). Nous n'avons malheureusement pas réussi à récupérer cette dernière, qui s'est détachée à une centaine de mètres avant d'arriver au sol.

Un système d'**amortisseur** fait avec un **ressort** nous a servi à absorber le choc causé par l'ouverture du parachute.



Figure 8 : Parachute dans son logement

Système de fixation des cartes électroniques

Nous n'avions pas beaucoup de cartes électroniques, nous avons donc décidé de les **fixer au recto et au verso d'une plaque de delrain rectangulaire** que nous avons fixée à deux plaques de delrain rondes. La plaque de delrain ronde basse est la **seule à être fixée au corps** de la fusée à l'aide de 3 vis. Une **ventouse magnétique** et un **ressort** servant à l'éjection de la trappe sont **intégrés à cette plaque**.

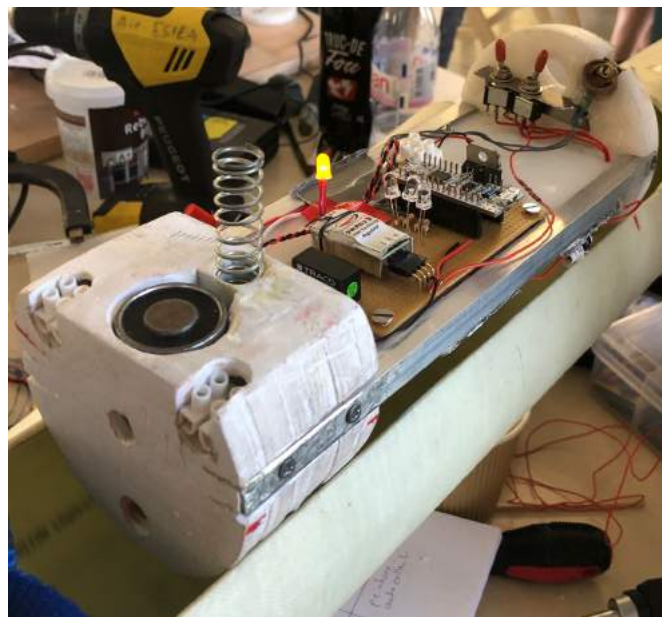


Figure 9 : Système de fixation des cartes électroniques

Une fenêtre en PVC transparent permet de voir l'état des LEDs depuis l'extérieur de la fusée.

Description électronique

L'électronique de la fusée est composée de **deux cartes** : une carte de **minuterie** (*STM32 F042K6*) et une carte d'**expériences** (*Arduino Uno*).

La minuterie est alimentée avec **deux piles LR06** de 9V mises en **parallèle**, ces piles alimentent également la **ventouse magnétique** faisant également partie du système de récupération. L'**expérience** est quant à elle alimentée via une **unique pile LR06** et est **indépendante de la carte de minuterie**.

Minuteur de déclenchement du parachute

Afin de libérer le parachute au moment de l'apogée (*environ 17s*), nous avons conçu un séquenceur capable d'effectuer les fonctionnalités suivantes :

- **Détection du décollage** (*par arrachement d'une fiche jack*)
- **Décompte d'un temps prédéfini** (*ici environ 11 secondes*)
- **Ouverture de trappe parachute** (*par démagnétisation d'une ventouse magnétique*)
- Présence de **voyants de contrôle** :
 - LED de mise en tension
 - LED clignotante indiquant que le décompte est en cours
 - LED indication d'ouverture de trappe
- Possibilité d'**annuler le décompte** en cours en cas de fausse manipulation

L'électronique du système, bâti autour d'une carte STM32 Nucleo32 F042K6 se découpe en deux parties : la **partie information** et la **partie puissance**.

En effet, le **système de libération de la porte de la trappe parachute** s'effectuant par **démagnétisation d'une ventouse magnétique**, il fallait pouvoir apporter **24V en 0,3A** à cette dernière : chose dont la **carte était incapable**. Nous avons donc **conçu un circuit de puissance** contrôlé par la carte **capable de remplir ce rôle**.

La partie information permet quant à elle de faire clignoter les différents indicateurs d'état (*ici des LEDs*).

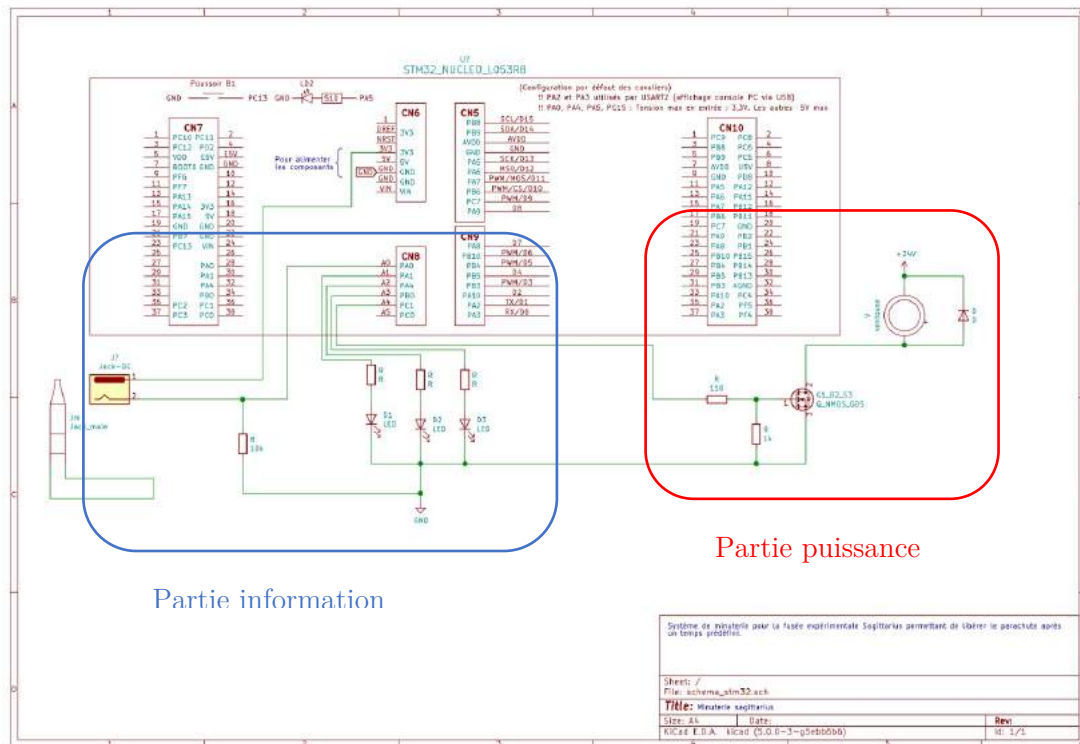


Figure 10 : Plan électronique de la carte de temporisation

La partie information est composée de **3 leds** branchées sur les pins A1, A2 et A3. La première est un **voyant d'allumage de la carte**, elle s'allume quand le programme s'exécute, la deuxième est un **avertisseur de décompte** qui clignote lorsque le **séquenceur a détecté un décollage** et a lancé la procédure de décompte. Enfin, la troisième s'allume lorsque le **décompte est terminé** et que la trappe est censée s'être ouverte.

On trouve également dans cette partie le système de **détection de décollage** : ce dernier est une **fiche jack court-circuitée** dont l'extrémité mâle est **attachée à la rampe de lancement**. Ce système est assimilable à un **bouton en pull-down** enfoncé lorsque la fusée est au sol.

La **partie puissance** est quant à elle composée d'un transistor de puissance **TIP142** :

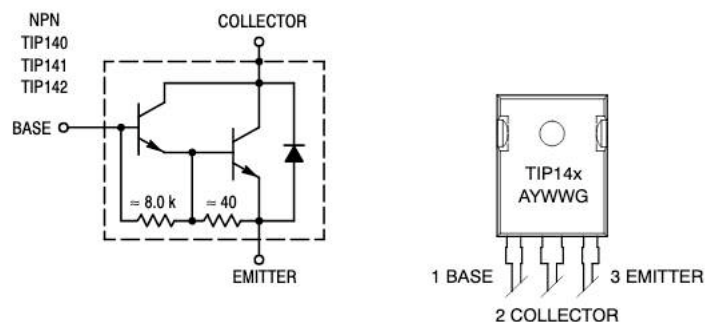


Figure 11 : Transistor de puissance TIP142

Lorsque l'on envoie un courant à la **base** de ce dernier, il **fait passer le courant entre le collecteur et l'émetteur**, ce qui permet de **relier la ventouse magnétique (préalablement connectée au +24V) à la masse** et ainsi la **démagnétiser**.

Le programme se présente de la manière suivante :

Nous commençons par **initialiser 4 LEDs** dont **3** servants de **retour visuel** et **une d'activateur du circuit de puissance** (broche Base du transistor) puis un **bouton** modélisant la fiche jack court-circuitée.

Lors de la mise sous tension de la carte une LED est allumée (*LED de mise en tension*)
Lorsque la prise jack est débranchée, le timer se déclenche (*activation du système de séquençage*).
Durant les 17 secondes du timer une LED clignote et un compteur s'incrémente si le bouton est toujours activé.

Lorsque le compteur atteint un certain nombre correspondant au 16,5 secondes, une LED est allumée et le trigger du TIP142 est activé. (*le temps de mise sous tension de la ventouse magnétique s'ajoutant au 16,5 secondes fait que nous obtenons environ les 17 secondes suggérées par le cahier des charges.*)

Si le bouton change d'état durant les 16,5 secondes (*re-branchement du jack*), après un délai de sécurité sur les rebonds (*20ms*), alors le compteur repasse à 0.

Le système du séquenceur a d'abord été testé sur une carte STM32 Nucléo 64 L053R8 puis nous avons basculé sur une carte **STM32 Nucléo 32 F042K6**, ce qui nous a forcé à **modifier une bonne partie des valeurs de registres utilisés**.

Carte expérience

La carte expérience est une **Arduino Uno**, elle prend en entrée les données des **capteurs de pression/température et d'accélération** puis elle **enregistre ces données sur une carte SD** afin que l'on puisse les traiter au sol. Voici le schéma du système :

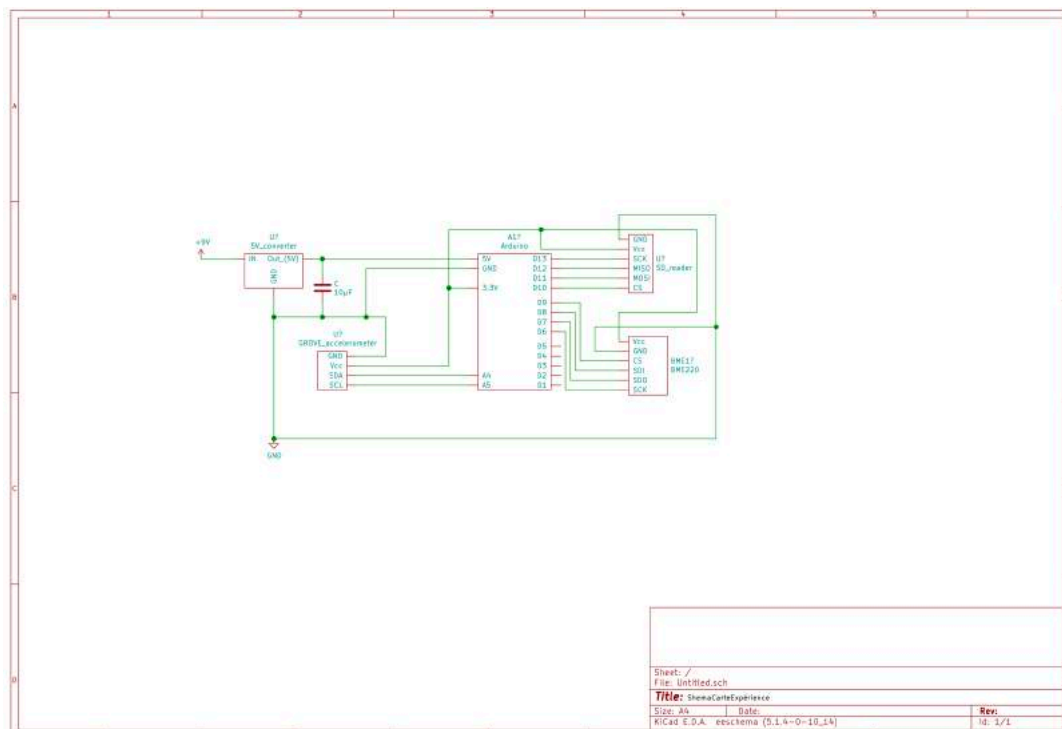


Figure 12 : Schéma de la carte électronique d'expérience

Déroulement du vol

La fusée a décollé le **Jeudi 18 Juillet 2019 vers 16h** et a effectué un **vol nominal** ! Le ciel était **plutôt dégagé** et le **vent faible**. La fusée a eu une **trajectoire balistique classique** puis a **déployé son parachute peu après l'apogée** et est descendue sous ce dernier à une vitesse raisonnable.

La fusée est tombée **près d'un chemin**, ce qui a rendu sa **localisation facile**. Elle a été **récupérée par le militaire conduisant le camion** pendant que nous étions avec un autre groupe en train d'aider à la localisation d'une fusée. La trappe s'étant détachée peu avant l'arrivée de la fusée au sol (*ce que l'on peut voir sur la vidéo du vol prise par Planète Sciences depuis la zone public*), nous n'avons pas pu la récupérer.



Figure 13 : Lancement de la fusée Sagittarius

Expérience et résultats

Les détails de l'expérience et les résultats sont contenus dans **l'annexe à la fin du dossier.**

Conclusions

En conclusion, nous considérons ce projet comme une **réussite** car elle a rempli son objectif principal, c'est-à-dire **relancer les activités du club** !

Nous avons pu **tester la viabilité d'une peau porteuse en fibre de verre** « faite maison », cette dernière s'est avérée **très résistante** et il serait même possible de la faire **moins épaisse pour un prochain projet** afin de **gagner de la masse**.

Concernant **l'expérience de trajectographie**, comme vous avez pu le lire dans l'annexe dédiée, elle nous a donné **plus de fil à retordre que prévu**. Nous avons **quand même pu en tirer des choses intéressantes** et **comptons continuer de travailler sur ces résultats** afin d'en apprendre plus sur le vol.

Finalement, ce projet, étant la première fusée pour beaucoup des membres de l'équipe nous a appris énormément de choses, allant du travail en équipe à la rigueur en passant par la technique (*tant mécanique qu'électronique*).

Nous tenions enfin à remercier les équipes de Planète Sciences et du CNES pour l'organisation de cet évènement et le suivi à l'année des projets, puissiez-vous continuer encore longtemps à nous aider à faire voler nos rêves !

Annexes

- P17-21 : Description des expériences, des méthodes d'étalonnage et de traitement des résultats
- P22- 29 : Résultats obtenus jusqu'à présent, courbes et descriptions

Expérience Sagittarius

Maxime Brière

Septembre 2019

1 But

L'expérience embarquée dans la fusée consiste en l'élaboration d'un système de trajectographie 3D post-vol.

2 Principe

Afin de reconstituer la trajectoire de vol de la fusée, nous avons besoin de mesurer et enregistrer les données de vol du vecteur. Un module comportant un accéléromètre 6 axes et un gyroscope a été utilisé afin de mesurer les angles de roulis, de tangage, et de lacet ainsi que les accélérations longitudinales et verticales de la fusée. Ces données propre au repère de la fusée doivent être repassées dans un repère fixe au sol dont nous fixons l'origine à la rampe de lancement. Le système d'axes utilisé est un trèdre direct dont l'axe des z positifs est orthogonal au sol et pointe vers le haut. Nous considérons ce repère comme Galiléen au vu de la durée de vol.

Afin d'avoir une information supplémentaire sur l'altitude, un module comportant un capteur de pression a été utilisé comme altimètre barométrique.

Les données sont enregistrées pendant le vol sur une carte SD.

La position est déduite de la double intégration de des données d'accélérations propre au vecteur repassées dans le référentiel terrestre. Une double intégration étant nécessaire, nous avons cherché une méthode permettant la meilleure approximation possible de l'aire sous la courbe à intégrer. La méthode que nous avons retenue est la méthode Runge-Kutta d'ordre 4 qui donne une erreur totale cumulée d'ordre relativement élevé (4) permettant d'obtenir la trajectoire la plus précise que possible.

3 Matériels

La carte expérience utilisée est une Arduino-Uno alimentée par une pile 9V dont la tension d'alimentation a été régulée à 5V.

Les capteurs utilisés sont :

- Capteur de pression, température: Grove-PressureTemperature.
- Gyroscope : Grove-6-Axis AccelerometerGyroscope

Nous avons choisis ces capteurs pour leur rapport qualité-prix et leur inter-compatibilité avec la plate-forme arduino et leur bibliothèque d'exploitation bien documentée.

4 Code arduino de l'expérience

Le code de cette section est accessible sur le gitea de l'association Air ESIEA à l'adresse suivante: <https://git.skylab.tk/>

5 Étalonnage des capteurs

L'étalonnage des capteurs est effectuée post-vol et nécessite les informations complémentaires suivantes.

- Le capteur de température : La température sur le pas de tir avant le vol qui était de 35 degré.
- Le capteur d'humidité : Le taux d'hygrométrie était de 20%
- Le capteur de pression : Par le biais de la bibliothèque fournit avec celui-ci retourne directement l'altitude. C'est cette dernière qui a été étalonnée. Position du capteur en rampe 2 mètres.
- Le gyroscope : Pour le gyroscope, seul l'angle de la rampe est requis car il permet de déduire l'angle de tangage de la fusée. Les autres angles "roulis, lacets" sont étalonnés à 0. Il était de 80 degré.

La formule d'étalonnage utilisée pour les capteurs la suivante :

$$\Delta d = d_{sortiecapteur}(t = 0) - d_{réel}(t = 0)$$

Et le code est le suivant :

```
for i in range (len(tab_capteur)):
    tab_capteur[i] -= delta
```

5.1 Calibration du capteur de température, d'humidité et de pression

Aucune transformation mathématique préalable n'est nécessaire.

5.2 Calibration du gyroscope

La calibration du gyroscope s'effectue comme suit :

En rampe, les axes $O\vec{x}_{terre}$ et $O\vec{x}_{fusée}$ d'une part et les axes $O\vec{y}_{terre}$ et $O\vec{y}_{fusée}$ d'autre part sont pris confondu. On choisit donc à $t = 0$, un angle de roulis et de lacet de $0rad$.

L'angle de tangage lui est donné par la pente de la rampe et vaud $\frac{\pi}{2} - 1,39626$. Voir figure ci dessous. (à insérer).

$$\text{Donc } \Delta angles = \begin{pmatrix} 0 \\ tangage_0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

5.3 Calibration de l'accéléromètre

La sortie de l'accéléromètre est de la forme :

$$\vec{a}_{sortie} = \vec{a}_{fusée} + R_{terre}^{fusée} \cdot \vec{g}$$

Où $\vec{g} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -9,81 \end{pmatrix}$ et $R_{terre}^{fusée}$ est la matrice de passage du référentiel terrestre au référentiel de la fusée.

Cette matrice est construite dans la section suivante.

Or, au repos la fusée ne subit que l'accélération de la pesanteur.

Donc $\vec{a}_{sortie} = \vec{0} + R_{terre}^{fusée} \cdot \vec{g}$.

Et ainsi $\Delta\vec{a} = \vec{a}_{sortiecapteur}(t=0) - R_{terre}^{fusée} \cdot \vec{g}$

6 Construction de la matrice de passage du référentiel terrestre au référentiel de la fusée

On cherche ici à automatiser la projection des vecteurs du référentiel terrestre inertiel vers le référentiel de la fusée par le calcul de la matrice $R_{terre}^{fusée}$.

6.1 Rotation selon $O\vec{x}$

Insérer schéma

$$\text{On en déduit que } \begin{pmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos tangage & -\sin tangage \\ 0 & \sin tangage & \cos tangage \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{pmatrix}$$

On a donc $R_{O\vec{x}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos tangage & -\sin tangage \\ 0 & \sin tangage & \cos tangage \end{pmatrix}$ matrice de rotation selon $O\vec{x}$.

6.2 Rotation selon $O\vec{y}$

Insérer schéma

On en déduit que $\begin{pmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos lacet & 0 & \sin lacet \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin lacet & 0 & \cos lacet \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{pmatrix}$

On a donc $R_{O\vec{y}} = \begin{pmatrix} \cos lacet & 0 & \sin lacet \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin lacet & 0 & \cos lacet \end{pmatrix}$ matrice de rotation selon $O\vec{y}$.

6.3 Rotation selon $O\vec{z}$

Insérer schéma

On en déduit que $\begin{pmatrix} x_f \\ y_f \\ z_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos roulis & -\sin roulis & 0 \\ \sin roulis & \cos roulis & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{pmatrix}$

On a donc $R_{O\vec{z}} = \begin{pmatrix} \cos roulis & -\sin roulis & 0 \\ \sin roulis & \cos roulis & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ matrice de rotation selon $O\vec{z}$.

6.4 Détermination de $R_{terre}^{fusée}$

Le produit matriciel n'est pas commutatif. Mais physiquement on peut fixer la transformation suivante :

$$R_{terre}^{fusée} = R_{O\vec{z}} \cdot R_{O\vec{y}} \cdot R_{O\vec{x}}$$

Et on a :

$$R_{O\vec{z}} R_{O\vec{y}} = \begin{pmatrix} \cos roulis & -\sin roulis & 0 \\ \sin roulis & \cos roulis & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos lacet & 0 & \sin lacet \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin lacet & 0 & \cos lacet \end{pmatrix}$$

$$R_{O\vec{z}} R_{O\vec{y}} = \begin{pmatrix} \cos roulis \cdot \cos lacet & -\sin roulis & \cos roulis \cdot \sin lacet \\ \sin roulis \cdot \cos lacet & \cos roulis & \sin roulis \cdot \sin lacet \\ -\sin lacet & 0 & \cos lacet \end{pmatrix}$$

Ainsi

$$R_{terre}^{fusée} = \begin{pmatrix} \cos roulis \cdot \cos lacet & -\sin roulis & \cos roulis \cdot \sin lacet \\ \sin roulis \cdot \cos lacet & \cos roulis & \sin roulis \cdot \sin lacet \\ -\sin lacet & 0 & \cos lacet \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos tangage & -\sin tangage \\ 0 & \sin tangage & \cos tangage \end{pmatrix}$$

$$R_{terre}^{fusée} = \begin{pmatrix} \cos roulis \cdot \cos lacet & -\sin roulis \cdot \cos tangage + \cos roulis \cdot \sin lacet \cdot \sin tangage & \cos roulis \cdot \sin tangage \\ \sin roulis \cdot \cos lacet & \cos roulis \cdot \cos tangage + \sin roulis \cdot \sin lacet \cdot \sin tangage & -\cos roulis \cdot \sin tangage \\ -\sin lacet & \cos lacet \cdot \sin tangage & \cos lacet \end{pmatrix}$$

De plus "terre" et "fusée" sont deux bases de R^3 donc $R_{terre}^{fusée}$ est une matrice inversible et $R_{terre}^{fusée} = (R_{fusée}^{terre})^{-1}$

7 Code d'analyse des données de vol

Le code de cette section est accessible sur le gitea de l'association Air ESIEA à l'adresse suivante: <https://git.skylab.tk/>

Le code présenté n'est pas encore totalement fonctionnel et est encore en cours de développement.

Annexe- Résultats obtenus

Les résultats obtenus pour le moment sont recensés dans cette indexe, cependant, nous allons continuer de travailler sur ces derniers dans l'avenir afin de les affiner.

Altitude

On commence par tracer la courbe de pression en fonction du temps :

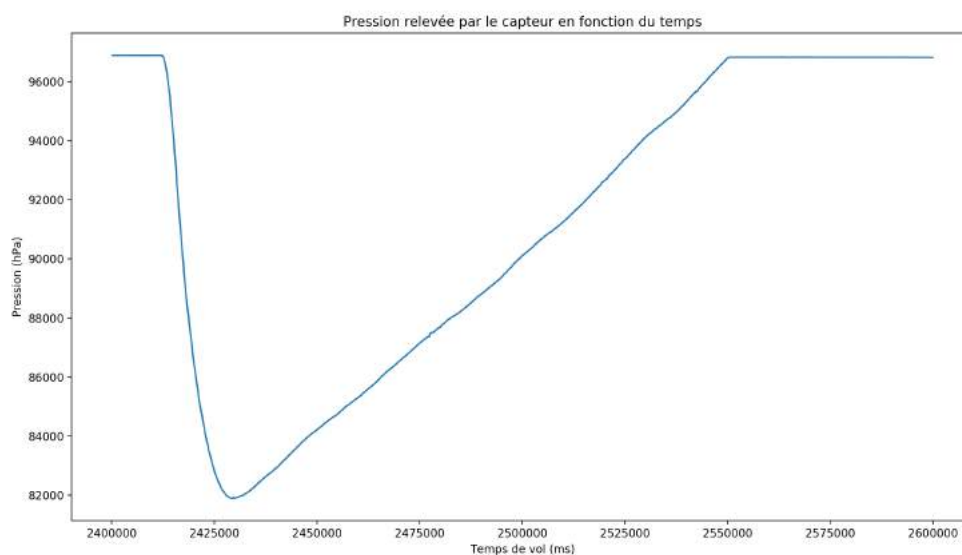


Figure 1 : Courbe de l'évolution de la pression en fonction du temps

Couplé à la courbe d'étalonnage donnant la pression en fonction de l'altitude, cela nous permet de tracer la courbe d'altitude en fonction du temps :

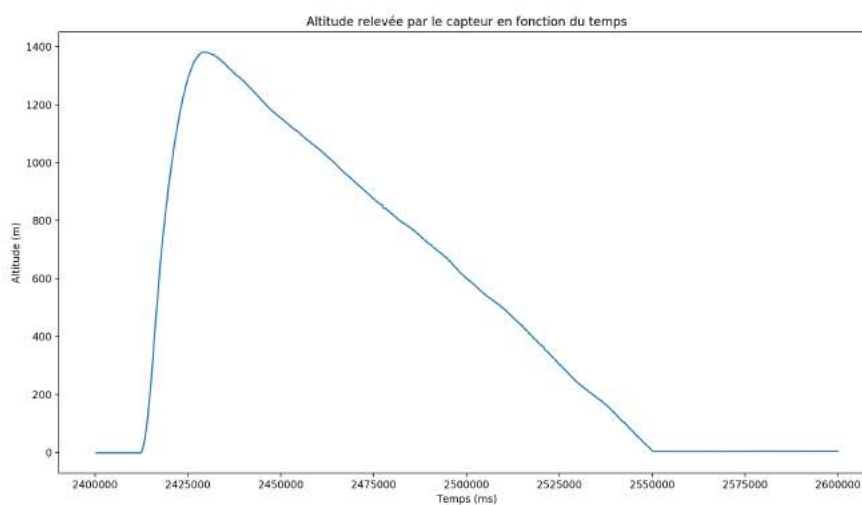


Figure 2 : Courbe de l'altitude de la fusée en fonction du temps

La courbe possède deux parties, la première est une **parabole suivant la trajectoire balistique** de la fusée, la seconde correspond à la **descente sous parachute à vitesse constante** (partie linéaire de la courbe)

En zoomant sur cette courbe on peut observer le décollage, l'apogée et l'atterrissage de la fusée :

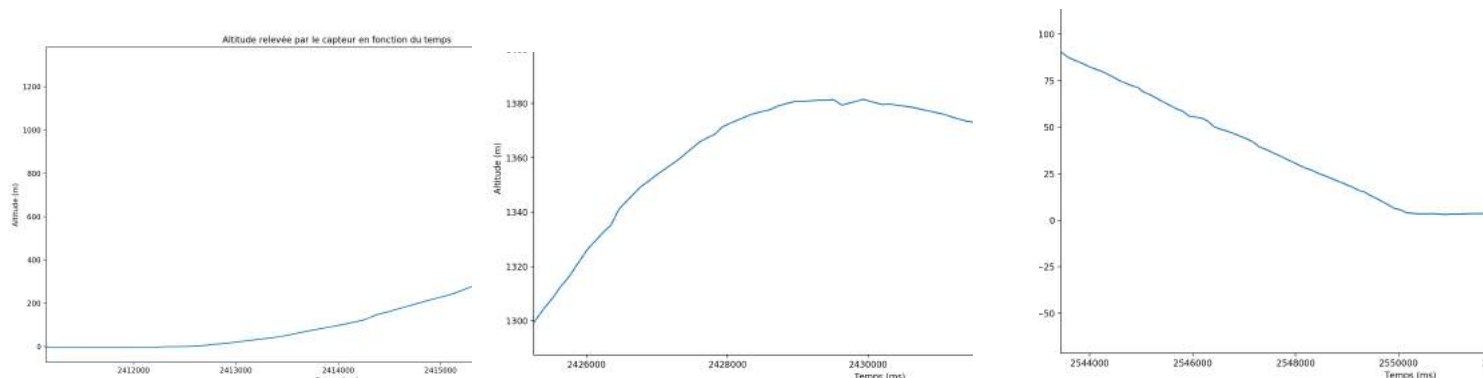


Figure 3 : zooms sur la courbe d'altitude

On peut avant tout observer que la fusée, a décollé en partant d'une altitude de 0m pour **atterrir à une altitude d'environ 3m**, cela semble cohérent étant donné qu'elle a **atterri dans un arbre**.

Nous pouvons voir que l'**apogée** a été atteinte au bout de **17s (2430000-2413000 ms)**, ce qui est en **accord avec la feuille de calcul Stabtraj**. Cette apogée est située à environ **1380m**, ce qui est également **en accord avec les prédictions de la feuille de calcul**.

Le **temps de vol total** fut de 137s soit **2min17s**, ce qui est en **accord avec le temps de vol mesuré grâce aux vidéos** de ce dernier.

Température et humidité

Des capteurs de température d'humidité étaient présents dans la fusée, les courbes obtenues sont les suivantes :

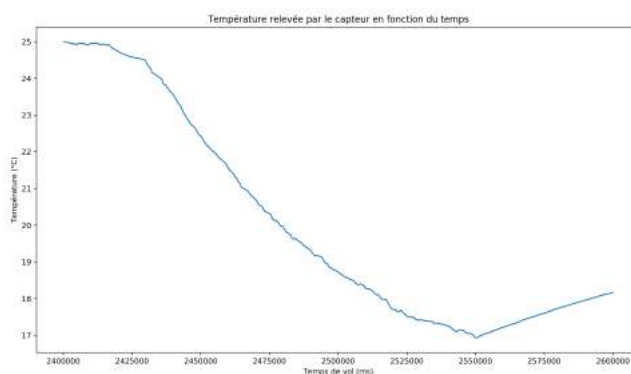


Figure 4 : courbe de température en fonction du temps

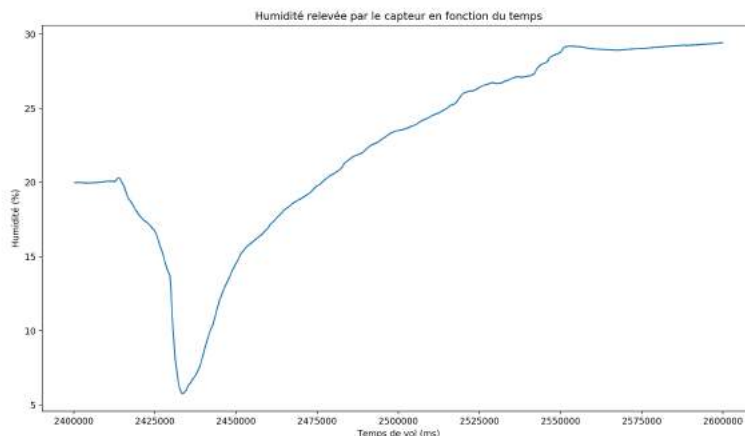


Figure 5 : Courbe d'humidité en fonction du temps

On peut observer que la température a baissée en altitude et n'a commencé à remonter qu'après l'atterrissage de la fusée.

La courbe d'humidité nous apprend que **l'humidité semble moins importante en altitude**. De plus, on voit que la **zone d'atterrissage est beaucoup plus humide que la zone de décollage**, cela peut s'expliquer par le fait que la fusée ait atterri dans une **forêt marécageuse** à côté de la zone de lancement.

Accélération

On peut tracer les courbes d'accélération sur les trois axes :

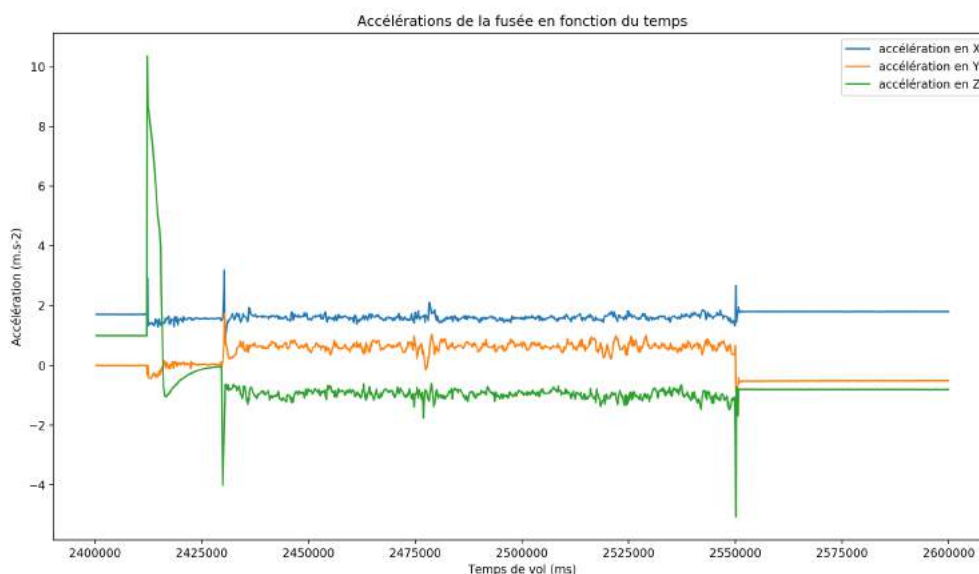
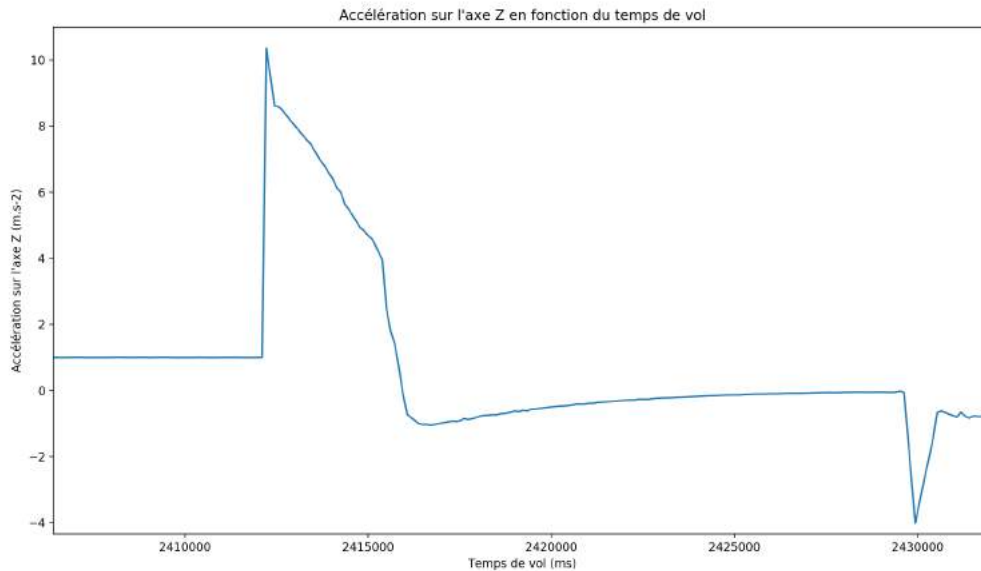


Figure 6 : Courbes d'accélération en fonction du temps sur les 3 axes

La courbe à laquelle nous allons nous intéresser plus particulièrement est la courbe de l'accélération sur l'axe des Z (normal au sol)



On observe sur cette courbe deux pics : la **poussée du propulseur** (à gauche) et l'**ouverture du parachute** (à droite). Le second semble correspondre à l'ouverture du parachute car il intervient **17s après le décollage** de la fusée. Ce dernier correspond à une accélération négative (une décélération), on peut donc en tirer que le parachute a **tiré la fusée vers le bas**.

Afin d'obtenir des informations plus pertinentes, on trace la **norme du vecteur accélération en fonction du temps** (On utilise ici la norme 2)

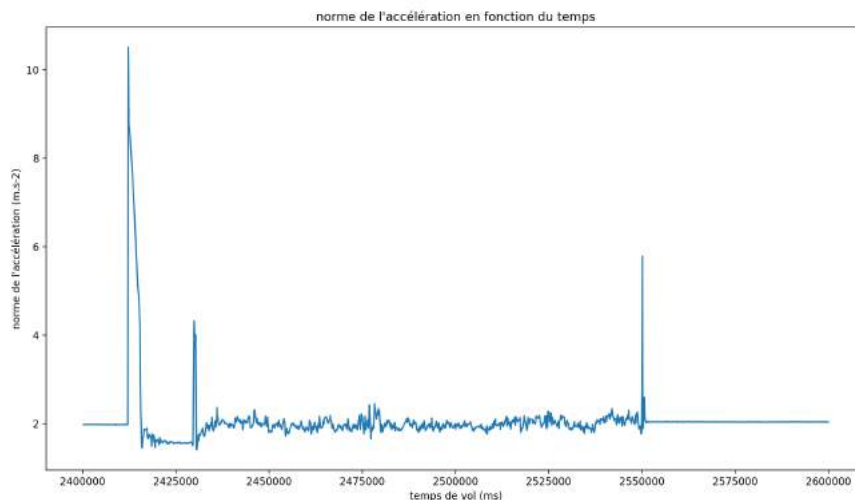


Figure 7 : Courbe de la norme de l'accélération en fonction du temps

On observe ici **3 pics** qui correspondent, au vu de leur moment de manifestation, à (*de gauche à droite*) :

- La poussée du propulseur
- L'ouverture du parachute
- L'atterrissage de la fusée

Si l'on s'intéresse aux deux premiers, on peut voir que le parachute s'est ouvert après 17s de vol, comme prévu :

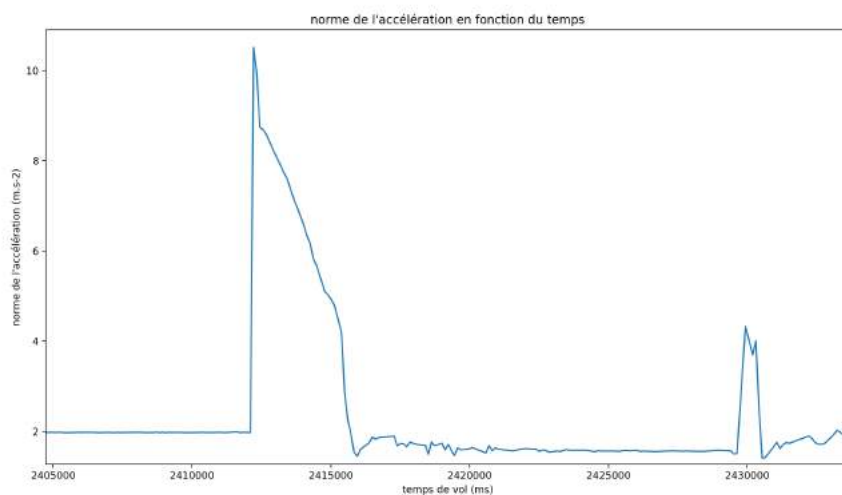


Figure 8 : Zoom sur la norme de l'accélération en fonction du temps

On peut regarder plus en détail la courbe de poussée et comparer cette dernière à la courbe de poussée fournie par le constructeur du Pro54-5G :

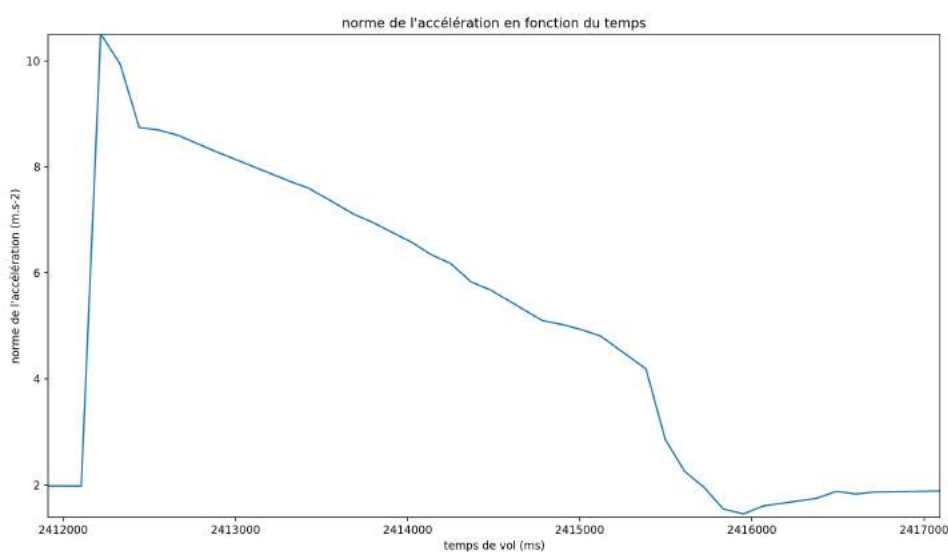


Figure 9 : Courbe expérimentale de la poussée du propulseur

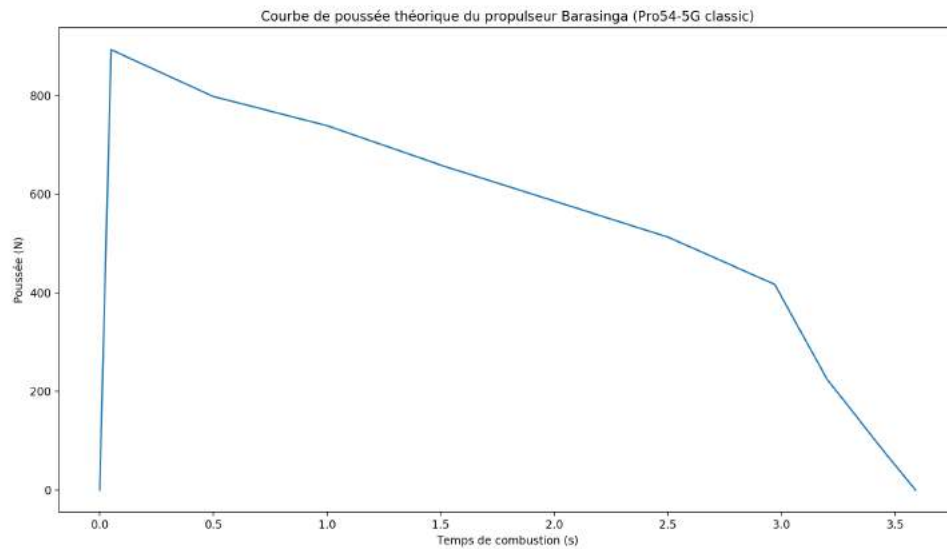


Figure 10 : Courbe de poussée donnée par le constructeur

On peut observer que les **deux courbes se ressemblent** à ceci-prêt que sur la courbe réelle nous avons un **pic de poussée au départ** plus important que sur la courbe donnée par le constructeur. On peut imputer ce pic à une combustion plus importante dû, par exemple à l'usure du casing.

Vitesse et position

Afin d'obtenir la trajectoire nous intégrons les courbes d'accélération avec la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 vue précédemment :

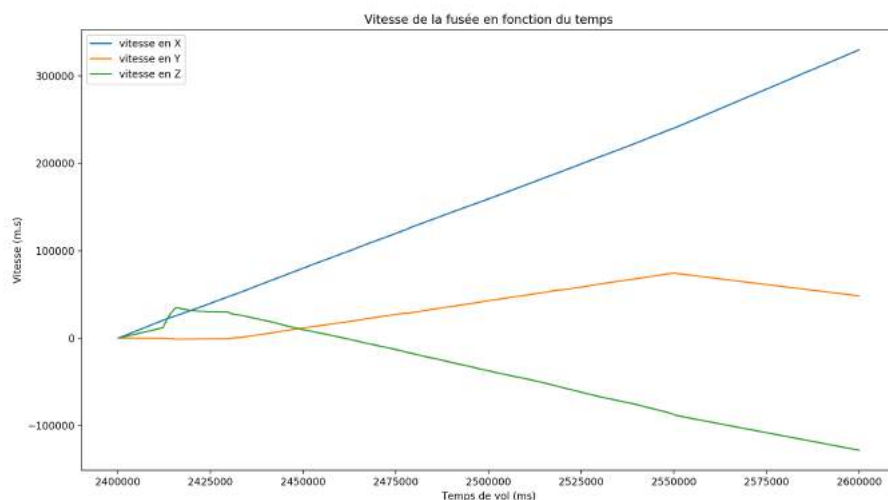
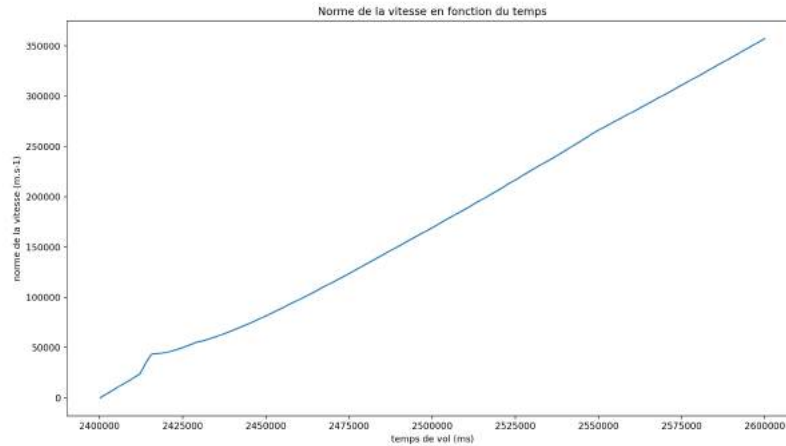


Figure 11 : Courbe de vitesse en fonction du temps

On observe ici un problème, les courbes divergent, cela est encore plus visible quand on trace la norme de la **vitesse en fonction du temps** :



12 : Courbe de la norme de la vitesse en fonction du temps

S'ensuit que si l'on intègre une deuxième fois et que l'on affiche la norme des vecteurs positions résultants, on obtient encore un **résultat divergent** (*Le résultat diverge d'ailleurs encore plus rapidement étant donné que l'on intègre deux fois*) :

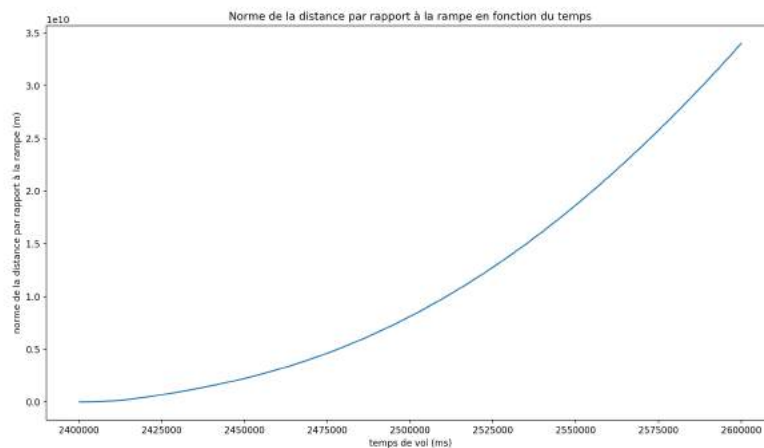


Figure 13 : Courbe de la norme de la distance par rapport à la rampe en fonction du temps

On peut tout de même tenter de tracer la reconstitution de la trajectoire en 3D, cependant les valeurs sur les axes sont aberrantes :

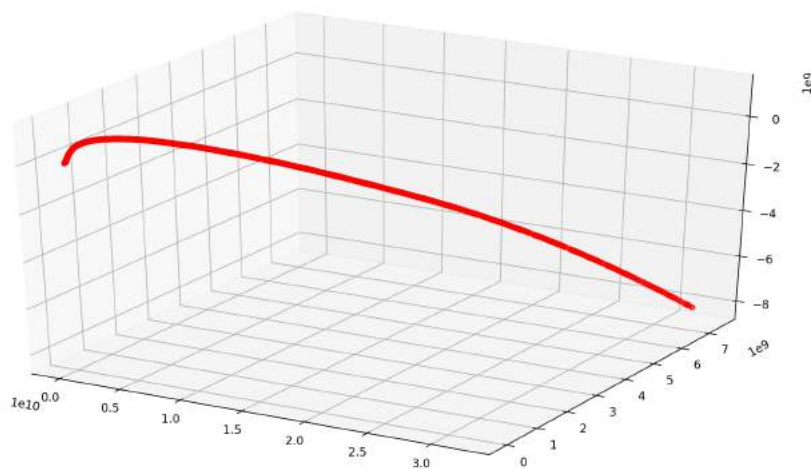


Figure 14 : Courbe de la position de la fusée en fonction du temps

On peut tout de même remarquer que la courbe s'approche de la trajectoire de la fusée que nous souhaitons obtenir.

Le problème que l'on a donc ici porte sur **l'intégration**, en effet, **l'opération ne semble pas converger**. Nous allons donc **continuer de travailler sur la méthode d'intégration** afin de tenter d'obtenir des résultats viables concernant la trajectographie de la fusée.