

MF04 - Whaitiri

FRAUDET Elouan

JEANNIN Sylvestre

PLOQUIN Hector

GRAFFIN Théophile

KREBS Paul

ISLER Héloïse

BACCHI Fabio

KLIMCZAK Alexis



L'objectif de Whaitiri est de faire une séparation d'étage assisté par rails électro-magnétiques (railgun) ainsi que récupérer les données inertielles des deux étages (Accélération et gyroscopiques).

L'objectif principal a été abandonné à la fin du projet pour manque d'aboutissement des solutions choisis. Seules les données inertielles de l'étage principal ont donc été enregistré.

Table des matières

Introduction	3
Description mécanique	3
Description générale	3
Stabtraj et ailerons	4
Fusée principale	4
Microfusée	5
Railgun	5
Etape de tire du railgun	5
Architecture du module de séparation	5
Support mécanique des cartes électronique	9
Fusée principale	9
Micro fusée	9
Description électronique et informatique	11
Railgun	11
Cartes électroniques	12
Interface de la fusée principal (minif)	12
Séquenceur de la fusée principale	13
Expérience de la mini fusée « minif »	14
Expérience et séquenceur de la micro	15
Expérience	17
Railgun	17
Donnée inertielle	17
Déroulement du vol	17
Résultats	17
Accélération	17
Rotation	19
Conclusion	21
Remercîments	21

Introduction

Le projet a pour l'objectif de montrer s'il existe un intérêt pour l'utilisation de railguns lors d'une séparation d'étage d'un lanceur. Pour ce faire Whaitiri devait démontrer le fonctionnement d'une première approche d'un tel fonctionnement et les résultats du vol avait pour objectif d'aider à la création d'un model de séparation afin de la comparer aux solutions existantes. Le projet a mis deux ans à se réaliser mais la séparation par raigun fut abandonnée à la fin de la deuxième par manque de temps pour finaliser et tester la solution choisie avant le C'space 2024.

Description mécanique

Description générale

L'architecture de Whaitiri est la suivante

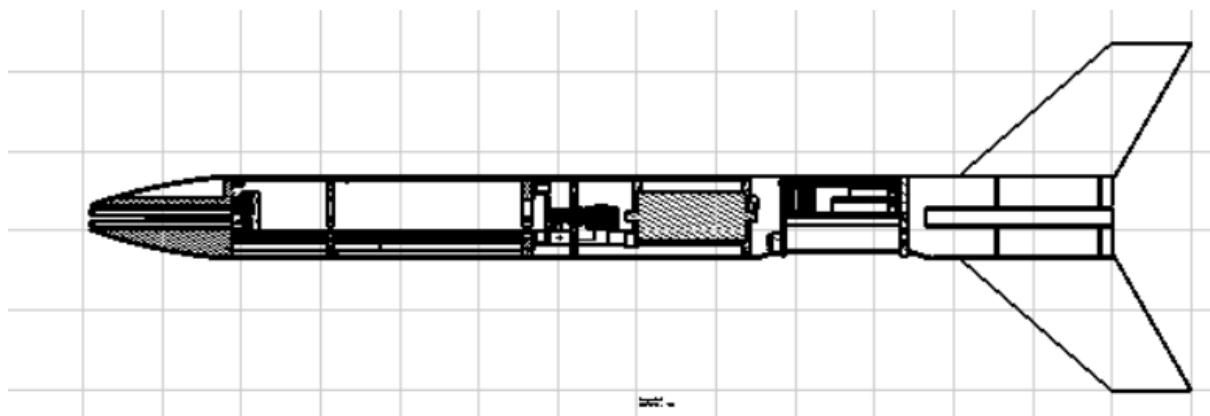


Figure 1 : Fusée principale sans microfusée

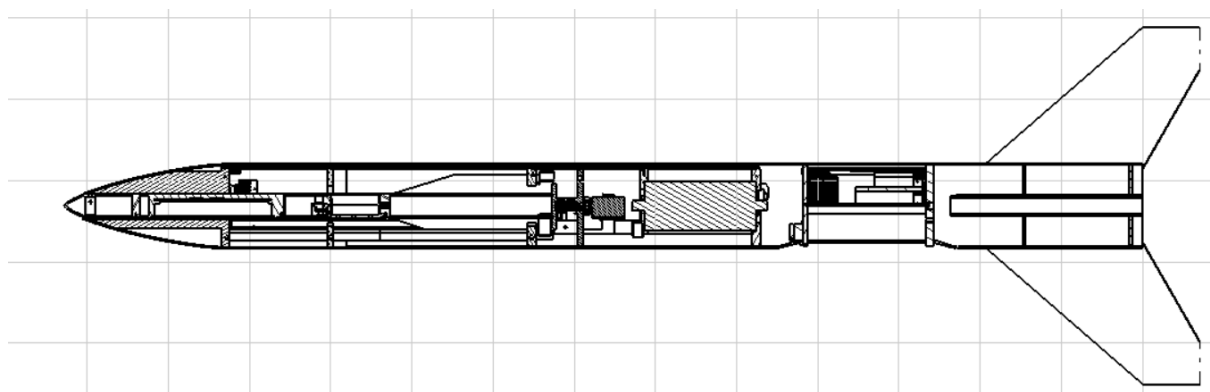


Figure 2: fusée principale avec microfusée

- Une micro fusée de longueur 590,2 mm avec un diamètre extérieur de 30mm composée de 6 ailerons, deux de ses ailerons sont composés en parti de cuivre permettant la propulsion de la micro fusée.
- Une coiffe rotative qui permet le passage des ailerons de la micro fusée sans impacter de manière importante les performances aérodynamiques de la fusée. La micro fusée fini la coiffe de la fusée principale.
- Un tube en fibre de verre, d'un diamètre externe de 103 mm et d'une longueur de 1331 mm
- Un tube porte moteur de diamètre interne de 24 mm et d'une longueur de 177 mm, collé à la résine époxy sur deux bagues de centrage d'un diamètre de 100 mm et d'une épaisseur de 3 mm. Celles-ci sont également collées à la résine époxy dans le tube.
- Trois ailerons en fibre de verre d'une épaisseur de 3 mm, collés au tube, au tube porte moteur et aux bagues de centrage avec de la résine époxy. Renforcés par 2 couches de fibre de verre reliant un aileron avec les deux ailerons à coter.

Stabtraj et ailerons

Fusée principale

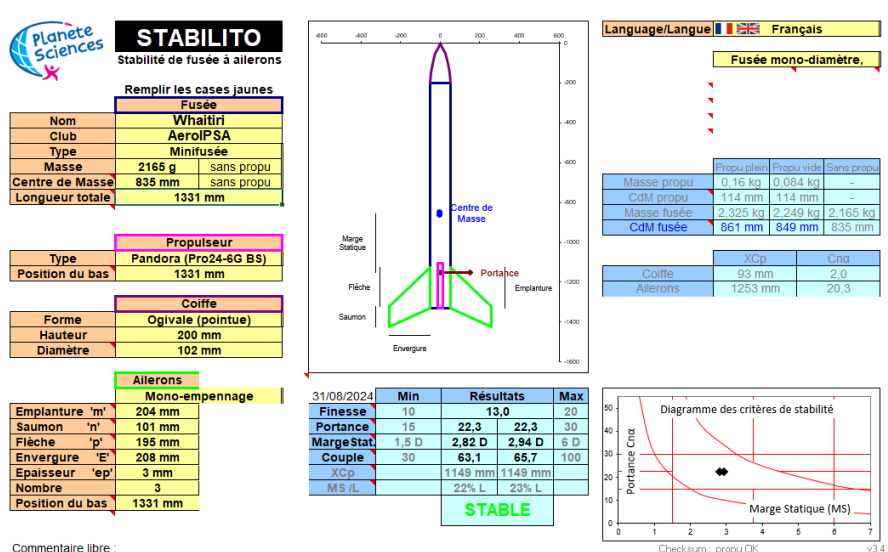


Image 1 : Stabtraj fusée principale

Les ailerons sont des ailerons trapézoïdes qui, comme dit précédemment, sont collés au reste de la fusée à l'aide de résine époxy. Ils sont en premier lieu collés au tube porte moteur et aux bagues de centrage. A ce collage, deux couches de fibre de verre lient un aileron aux ailerons se trouvant à ses cotée.

Microfusée

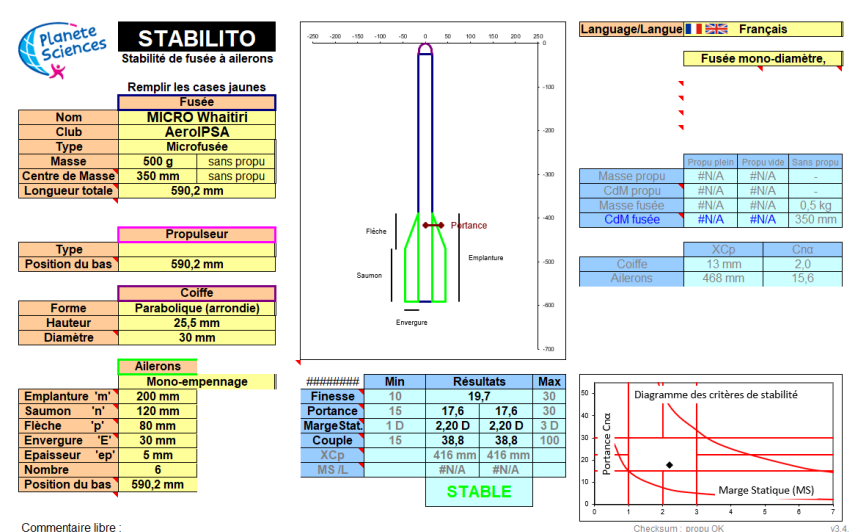


Image 2 : Stabtraj de la microfusée

Les ailerons de la fusée sont faits par impression et sont composés de PLA et d'une barre de cuivre pour faire la connexion avec les rails du railgun.

Railgun

Etape de tire du railgun

Le lancement de la microfusée à l'aide du railgun se fait en deux étapes :

Accélération mécanique

Avant que les contacts de cuivre de la micro fusée entre en contact avec les rails, la micro fusée est poussée à l'aide d'un ressort relâché au moment du décollage de la microfusée. Ce système permet d'éviter que les connecteurs de cuivre se soudent aux rails lorsque le courant passe à travers eux au lancement de la micro fusée. Cela permet aussi de ne pas avoir à utiliser des interrupteurs "heavy-duty" pour connecter l'alimentations au rail : les connecteurs en cuivre n'étant pas en contact avec les rails avant le lancement, ils servent indirectement d'interrupteurs car le circuit n'est fermé que lorsque les connecteurs touchent les rails.

Accélération électro-magnétique

Lorsque que les connecteurs de la micro-fusée entre en contact avec les rails, le circuit des rails est fermé et la force de Lorentz prends le relais. L'équation de cette force est la suivante :

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Un champ magnétique pouvant être créé à l'aide d'une variation de courant dans le temps, un railgun peut alors accélérer son projectile à l'aide d'une source de courant sans avoir besoin d'un champ magnétique permanent.

Cette force est utilisé pour accélérer la micro fusée lors de sa séparation avec l'étage principal

Architecture du module de séparation

Le module de séparation est composé de quatre éléments :

Coiffe rotative

Afin d'éviter de potentielle collisions entre la micro fusée et la fusée principale lors de la séparation, nous avons décidé de faire sortir la micro fusée par la coiffe de la fusée principale. Cela pose des problèmes pour le passage des ailerons de la micro fusée, la coiffe doit donc avoir des fentes pour les laisser passer. Afin de limiter les effets qu'on les fentes sur la stabilité du vol, nous avons décidé de cacher ces fentes lors du vol de la fusée pour ne les exposer qu'au moment du lancement à l'aide d'une coiffe rotative activée par un servomoteur. La micro fusée étant coaxial à la fusée principale la rotation de la coiffe autour de l'axe principal ne permet pas de libérer de l'espace pour le tube de la micro fusée. C'est pourquoi la coiffe de celle-ci finit la coiffe de la fusée principale.

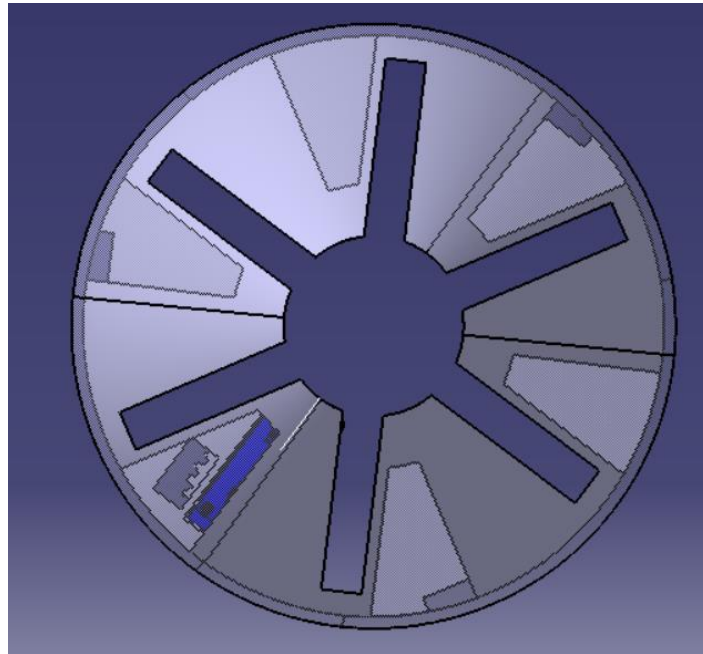


Image 3 : Vue de dessus de la coiffe ouverte sans la micro

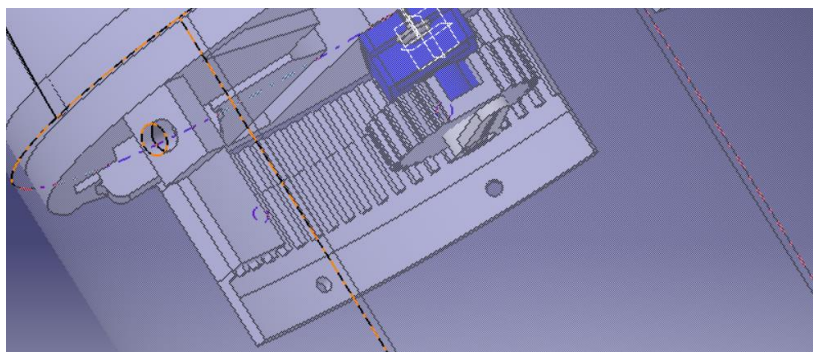


Image 4: Vue rapprochée du mécanisme de rotation

Alimentation du railgun

L'alimentation du railgun se fait à l'aide d'un supercondensateur fourni gracieusement par Eaton, Il fournit une tension de 3.0V, a une capacité de 3000F et peut contenir 3Wh d'énergie

Pour charger et décharger ce super condensateur 4 ports électriques sont accessibles du côté de la fusée (2 positifs, 2 négatifs). Il est par la suite relié au rail en passant par une plaque de

cuivre amovible servant de sécurité au cas où les rails soient manipulés alors que le condensateur était branché .

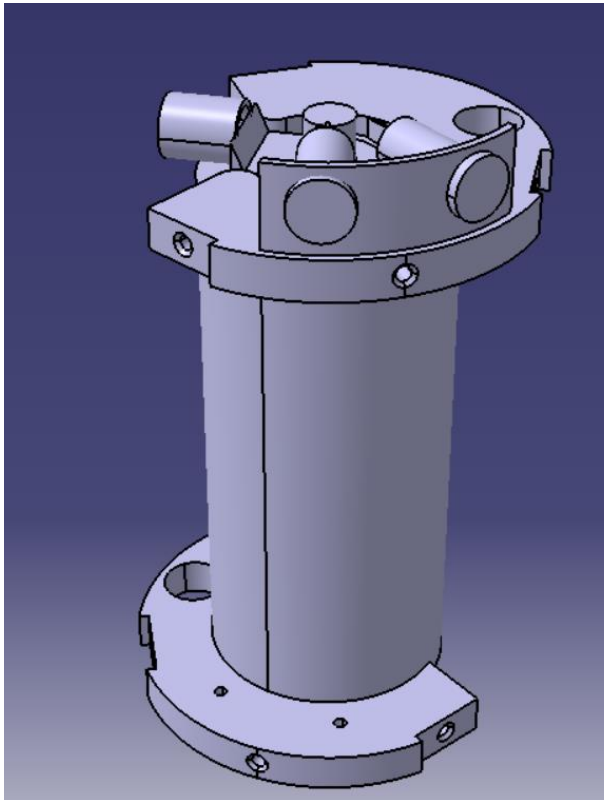


Image 5 : Le supercondensateur avec ses ports de charge et décharge

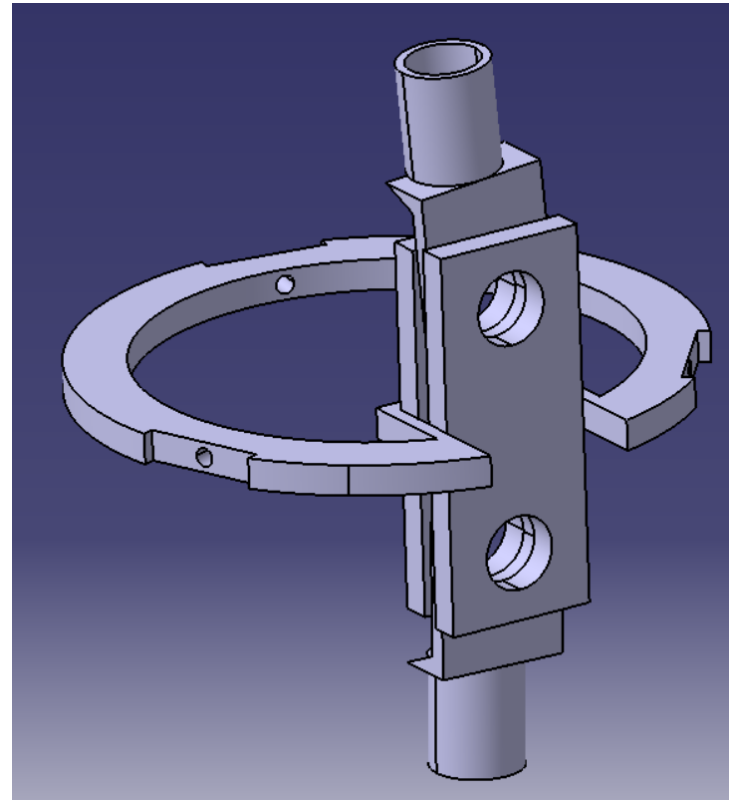


Image 6 : La plaque de cuivre amovible

Propulseur mécanique

Le propulseur mécanique est composé d'une plateforme qui permet de pousser la micro fusée jusqu'au rails, cette plateforme est elle-même poussée par un ressort qui une fois compressé est maintenu en place a l'aide d'un servo-moteur activé pour démarrer le lancement de la micro fusée.

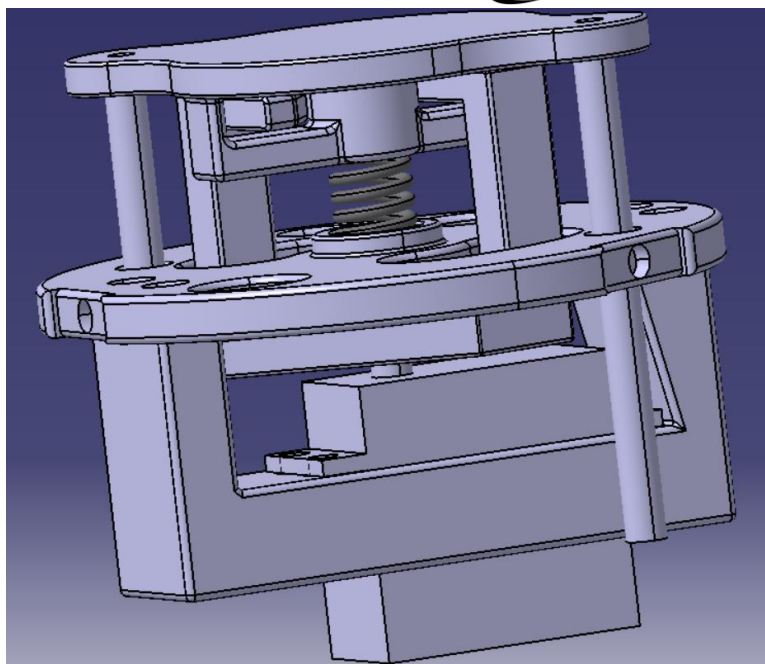


Image 7 : propulseur mecanique

Railgun

Les rails du railgun sont faits en cuivre et sont vissés en trois points sur des bagues en PLA. A l'opposé de ces rails se trouvent des barres en aluminium montées sur ressort qui permettent de compresser les connecteurs de la microfusée au rails, ceci permet de réduire la résistance de contact inerrante à ce type de connexion, augmentant ainsi la performance du railgun.

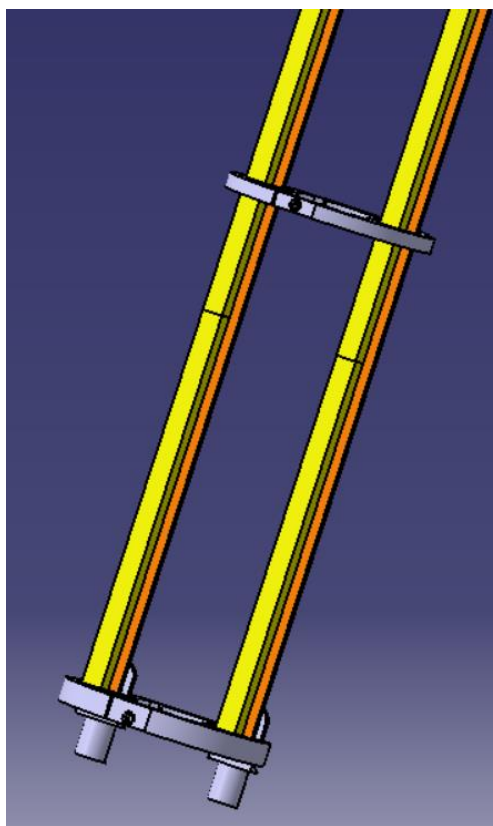


Image 8 : Rails (jaune : sbarre en aluminum, orange: barre de cuivre)

Support mécanique des cartes électroniques

Fusée principale

Le support des cartes électroniques est fait en PLA et est situé derrière la cage du parachute permettant de réduire la longueur de la fusée et d'éloigner les cartes du supercondensateur.

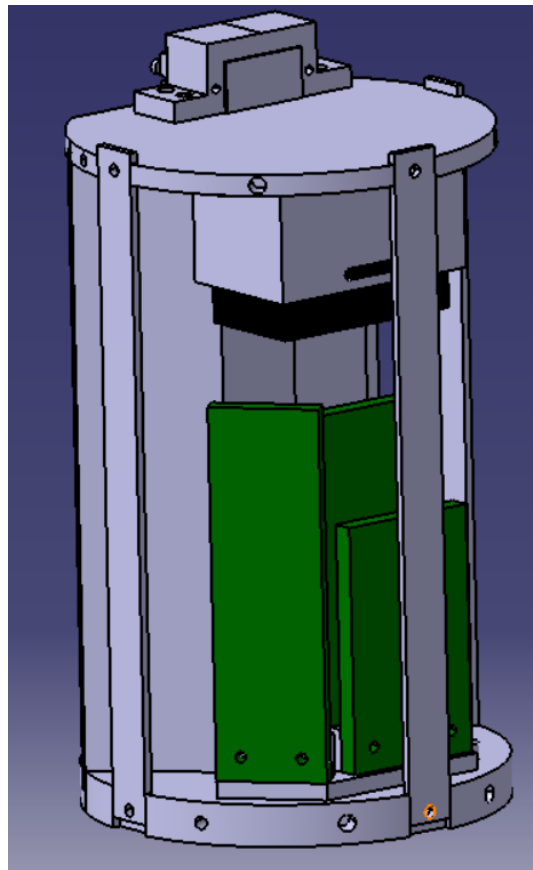


Image 9 : Cartes électroniques à l'arrière de la cage para

Micro fusée

Le support des cartes de la micro fusée est fait en PLA et est situé en haut de la micro fusée afin d'éloigner les cartes de la source magnétique propulsant la micro fusée.

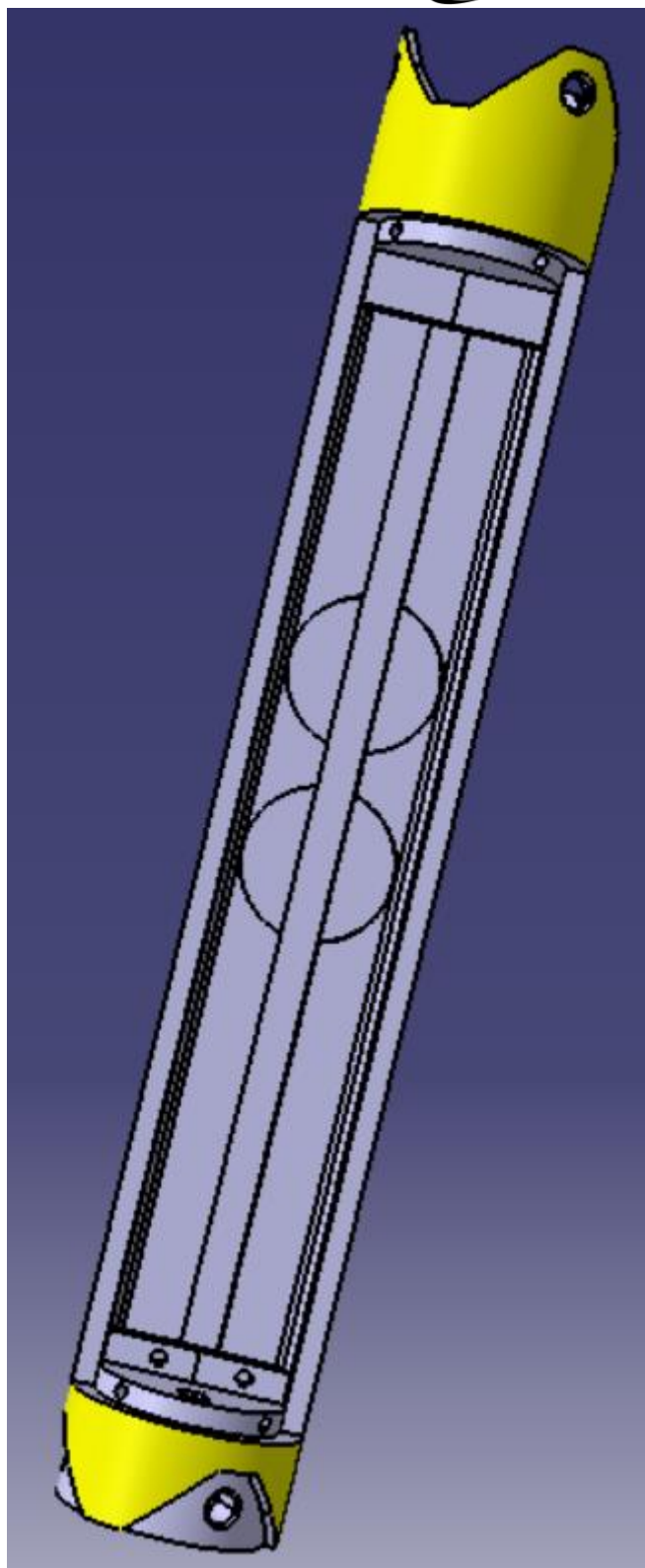


Image 10 : Support carte électronique pour micro fusée

Description électronique et informatique

Railgun

Le railgun est branché au supercondensateur, une barre de cuivre amovible est présente comme sécurité supplémentaire lors de la manipulation de la fusée quand le supercondensateur est branché. Le circuit se ferme quand le connecteur de cuivre de la micro fusée entre en contact avec les rails.

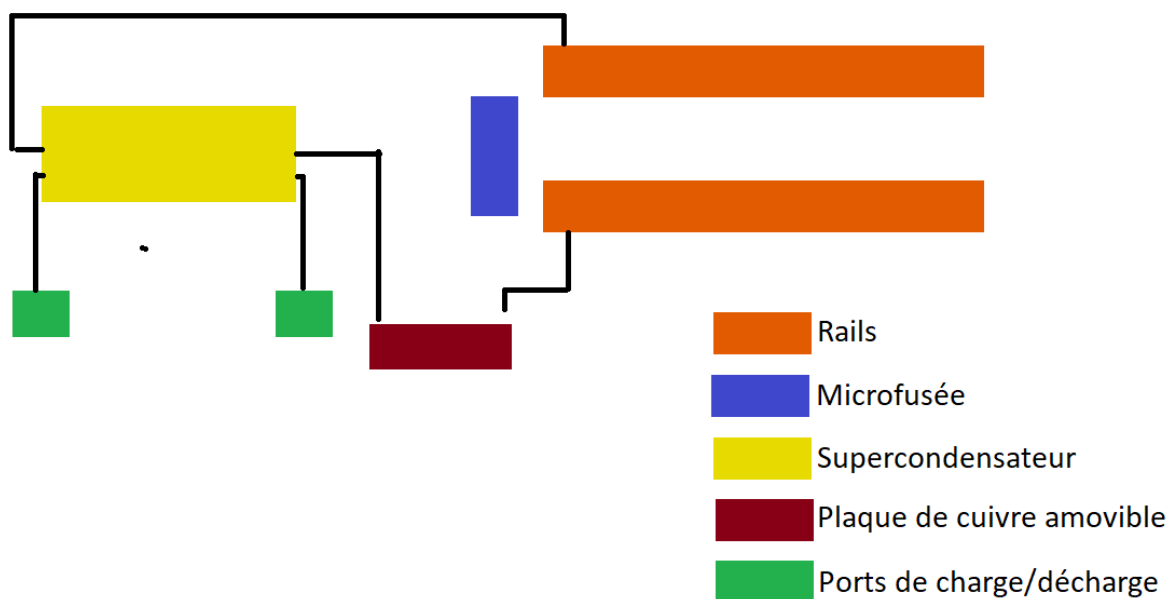


Figure 3: Railgun en attente de tir avec la sécurité débranchée

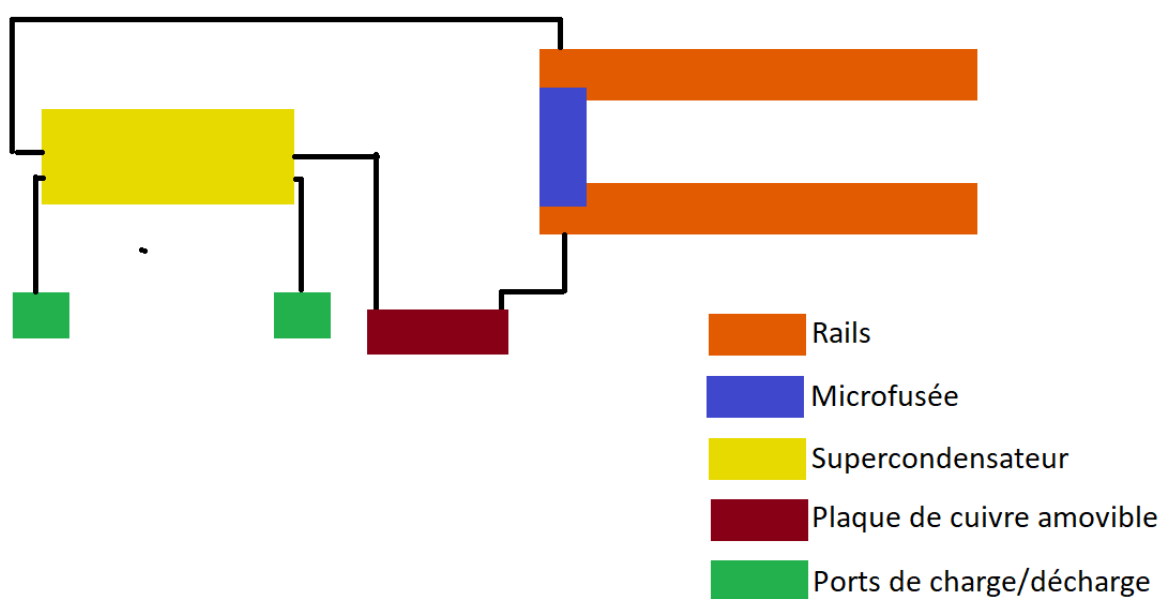


Figure 4 : Railgun en tir

Cartes électroniques

Pour nos systèmes électroniques, 4 cartes électroniques ont été conçues, 3 cartes pour notre minif et une carte pour la micro. Nos circuits imprimés ont tous été conçus sur le logiciel EasyEDA. Les différentes cartes électroniques conçues sont la carte interface minif, la carte séquenceur, la carte expérience et la carte micro. La micro fusée n'ayant pas été embarquée, sa carte électronique n'a donc pas été utilisée. Les microcontrôleurs utilisés pour les cartes électroniques de la mini fusée sont des Arduino nano. Ceux prévus pour la micro fusée étaient des XIAO ESP-32 C3. Des microcontrôleurs choisis pour leur petite taille et leur facilité d'intégration dans la micro fusée. La carte interface sert au contrôle du circuit et à l'indication des étapes du programme informatique. La carte séquenceur sert à déployer le parachute de la fusée au moment voulu du vol et la carte expérience prend les données du capteur et les enregistre sur une carte SD.

Interface de la fusée principal (mini fusée)

L'électronique, ici a pour but de faire un pont entre l'utilisateur et la fusée en elle-même, c'est donc une interface homme-machine. Ainsi, il y a un affichage de LED pour indiquer les différentes étapes de la chronologie de la fusée. L'utilisateur de la fusée peut, quant à lui, la manipuler avec les différents interrupteurs présents sur la fusée. Ces interrupteurs sont au nombre de six et ont leurs rôles respectifs :

- 1) OPEN-PARA ouvre la trappe du parachute au sol. La LED jaune clignote pour indiquer que la trappe est ouverte lorsque l'interrupteur est sur position 1.

- 2) ALIM-PARA permet de déclencher l'alimentation de la carte séquenceur. Aucune LED ne s'allume.

- 3) Go-para, initialise le séquenceur et vérifie la position du servo moteur du para. La minuterie de 5.5 secondes se déclenche une fois le jack débranché (au décollage). La LED verte de la carte séquenceur s'allume en continu. La position du servo moteur est vérifiée, si le servo est bien positionné la LED jaune s'allume en continu.

- 4) ALIM-E déclenche l'alimentation de la carte expérience.

- 5) GO_EXP initialise l'expérience. L'expérience, ayant pour but la récupération de données, se déclenche réellement si le jack est en plus débranché. A ce moment les capteurs sont initialisés et leur bon fonctionnement est vérifié. Si tout fonctionne les LEDs vertes et jaunes de la carte expérience s'allument en continu.

Voici le schéma explicatif du fonctionnement des différentes LED ainsi que des différents interrupteurs permettant le lien Homme-machine.

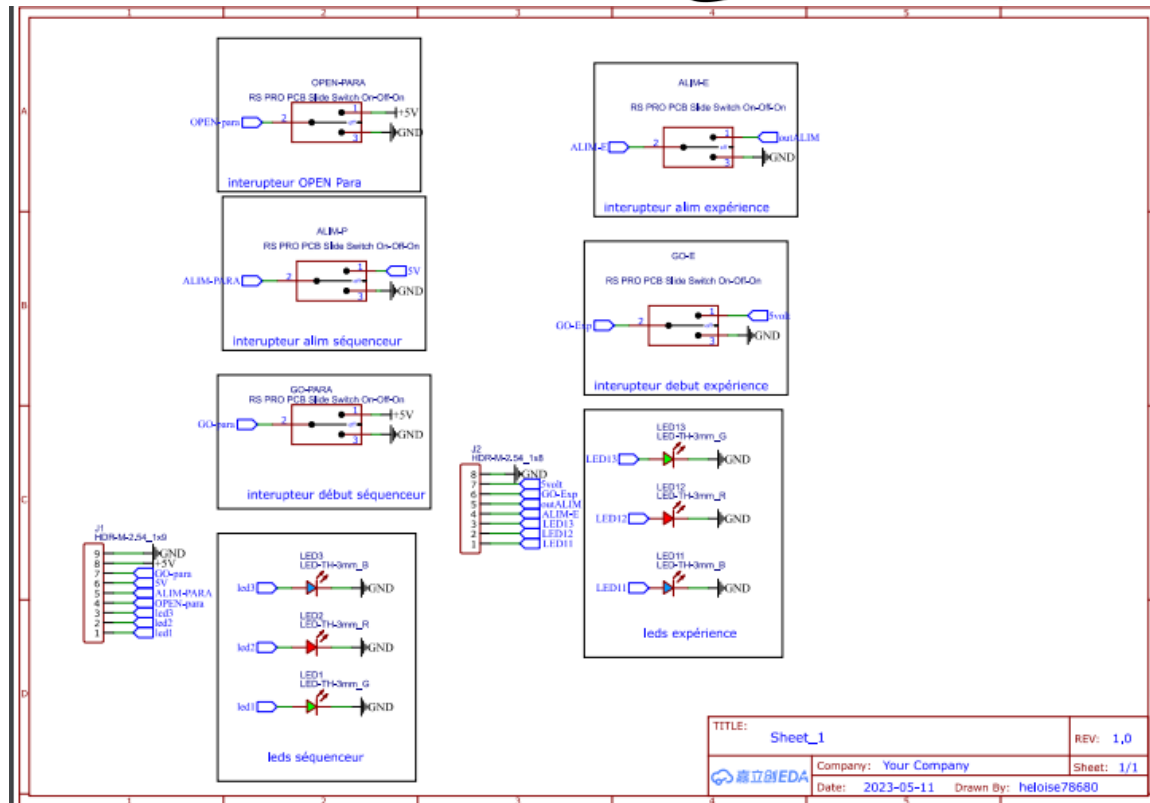


Figure 5: interface minif

Séquenceur de la fusée principale

Le but du séquenceur est d'actionner une minuterie, qui une fois terminé, active la rotation d'un servomoteur libérant la trappe retenant le parachute. La fin de la minuterie est déterminée à partir du temps que la fusée est supposée mettre à atteindre l'apogée avec le moteur utilisé. La libération du parachute est prévue un peu après l'apogée pour faciliter le déploiement du parachute. La minuterie se déclenche lorsque le jack est déconnecté de la carte électronique. La LED rouge s'allume lorsque le jack est débranché et que le servo moteur ait tourné de 120°.


$$\theta_{total} = \theta_{initial} + w * t$$

Il faut cependant noter que les données ont continué d'être enregistrer durant l'entièreté du temps pendant lequel la fusée était au sol après son vol, nous donnant plus de 20 000 lignes de données.

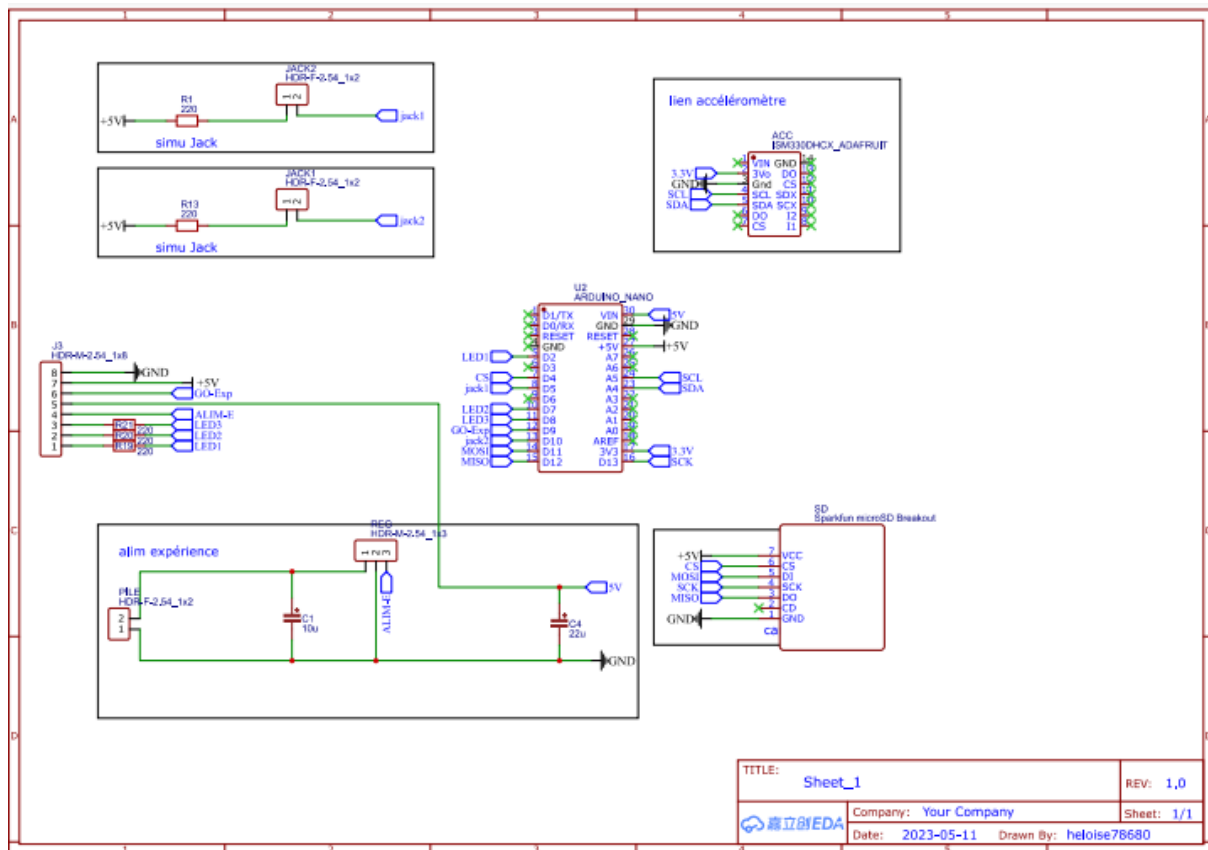


Figure 6: expérience minif

Expérience et séquenceur de la micro

Il faut tout d'abord noter que l'expérience micro, au vu de sa complexité et de sa dangerosité liée au supercondensateur, fut supprimée au cours de la seconde année de conception.

La carte servant au fonctionnement de la micro est séparée en deux parties distinctes qui sont l'expérience et le séquenceur. Ainsi le but initial de l'expérience était de récupérer l'accélération de la micro et de voir la vitesse générée avec les rails électriques. Cela aurait permis de comparer cette accélération avec les calculs réalisés en amonts.

La seconde partie de la carte (le séquenceur) avait pour objectif de réaliser l'ouverture du parachute de la micro. Ce séquenceur se serait alors déclenché au détachement d'un jack lors de la séparation des deux fusées (entre la micro et la minif).

Voici le schéma de la carte électronique de la micro fusée :

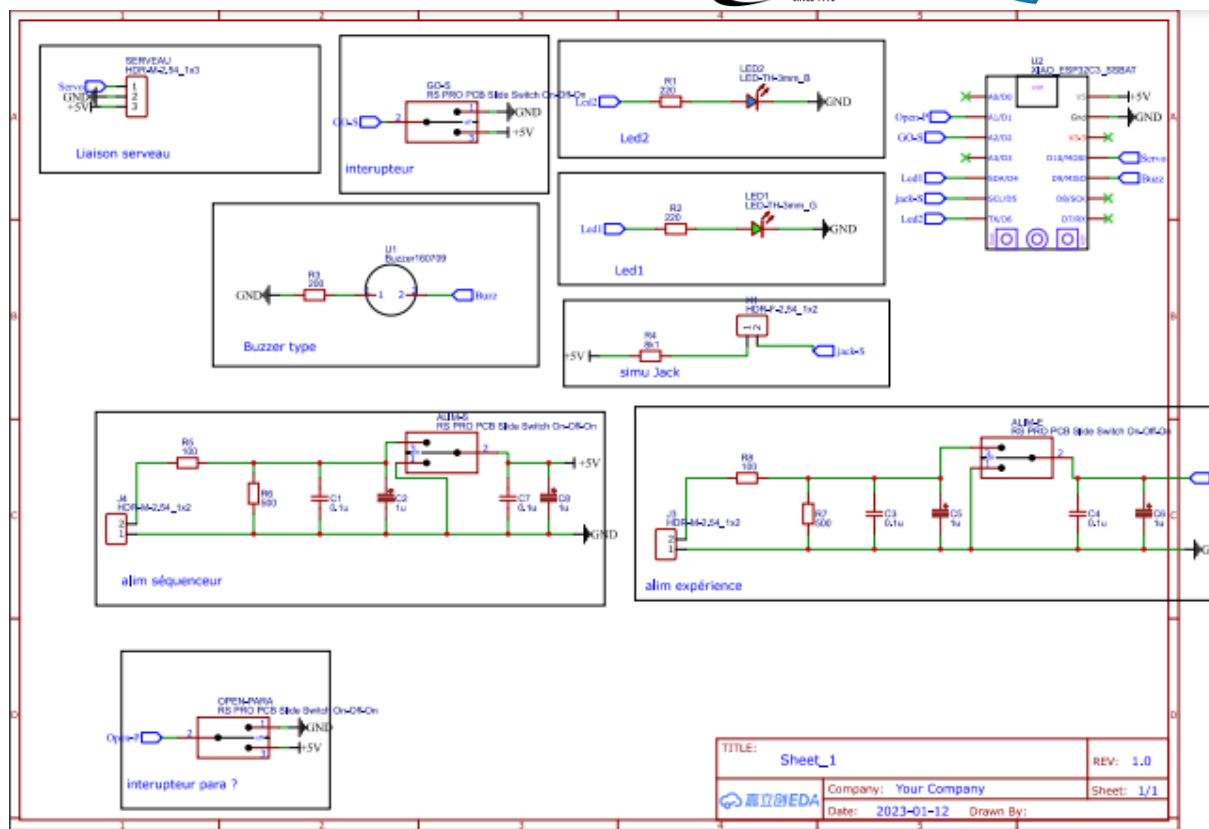


Figure 7: électronique de la micro

Expérience

Railgun

Le railgun fut abandonné à la sortie de la RCE3, car celui-ci avait encore beaucoup d'étapes à valider et il n'était pas réaliste que ces étapes soient validées à temps pour le C'space.

Donnée inertielle

Le railgun étant abandonné, seules les données inertielles du vol de la fusée principal ont pu être récupérées pour analyser l'évolution du vol.

Déroulement du vol

Le vol de Whitiri s'est effectué le 10 juillet à 12h, il s'est effectué sans encombre. Voici son déroulement :

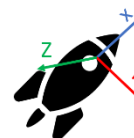
- Mise en rampe de la fusée
- Mise en place du Jack et fixation au sol
- Allumage de l'électronique
- Vérification de l'état des LEDs d'alimentation et suivi de la chronologie
- Retour au pupitre
- Allumage du moteur
- Lancement

Le parachute s'est correctement ouvert au temps choisi : $T+5.5s$ mais la sangle reliant le parachute à la fusée étant un peu longue, le parachute a mis un peu de temps à correctement se déployer.

Nous avons ensuite récupéré Whitiri et pu lire les données enregistrées dans la carte SD afin de visualiser graphiquement les données de vol.

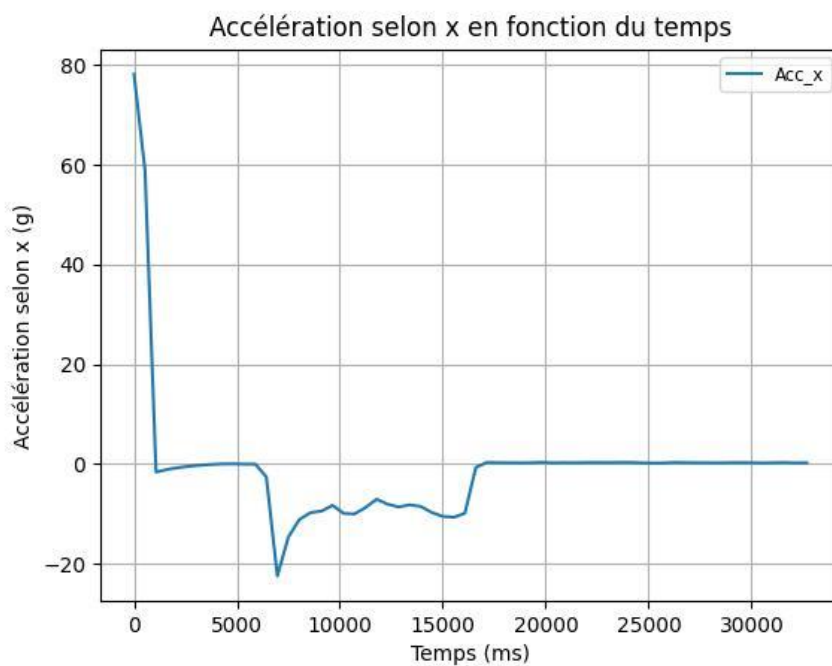
Résultats

Afin que les axes référencés dans les lignes suivantes soient compréhensibles par tous, voici un schéma représentant leurs directions sur une fusée de représentation :

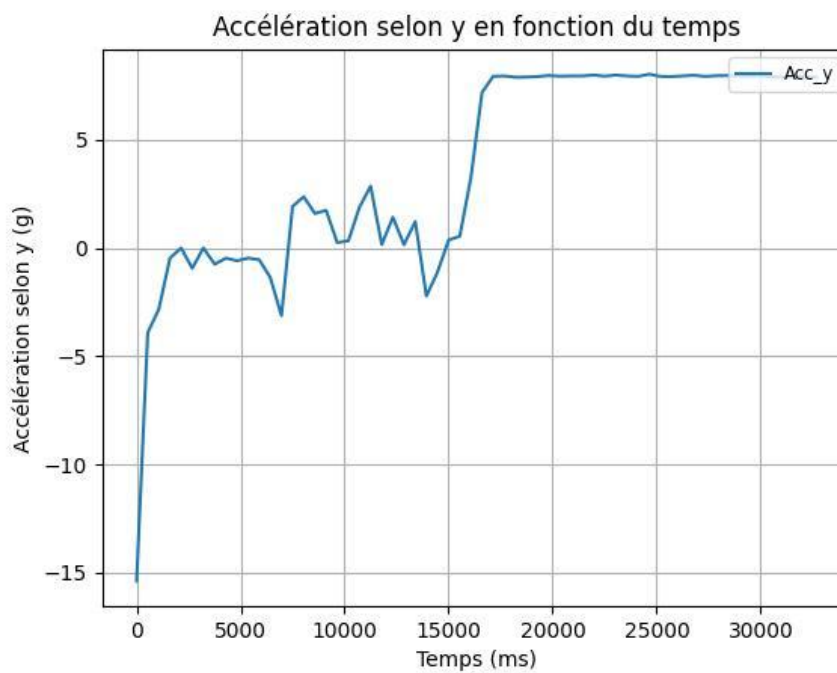


Accélération

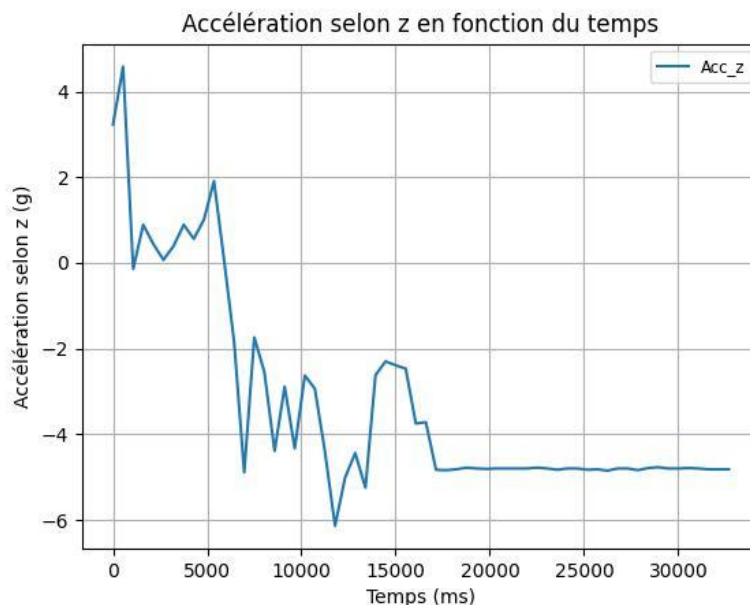
Nous pouvons voir ici les graphiques d'accélération de Whitiri :



Graph 1 : Accélération selon l'axe principal de la fusée



Graph 2 : Accélération selon y

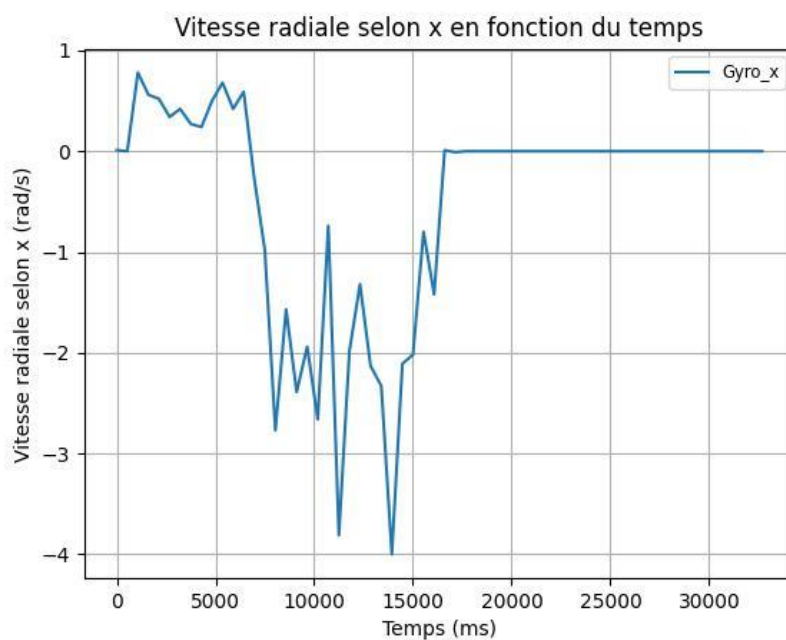


Graph 3 : Accélération selon z

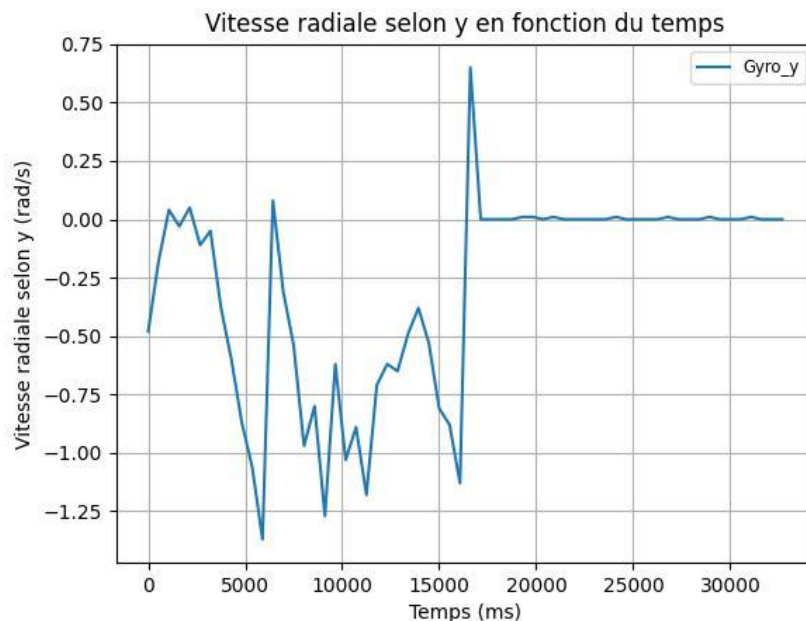
On peut observer sur l'accélération suivant l'axe principal de la fusée les différentes étapes du vol avec en premier lieu la poussée du moteur, suivi d'un passage en zéro jet, on peut voir que l'ouverture du parachute s'est faite au moment voulu pour finalement se poser après 17 s de vol. Sur les deux autres graphiques, on observe qu'à la fin du vol les plateaux d'accélérations sont à environ 7.5m/s^2 et -5.5m/s^2 , lorsqu'on fait la norme de ces valeurs, on retrouve environ la valeur d'accélération gravitationnelle de la terre ce qui est cohérent.

Rotation

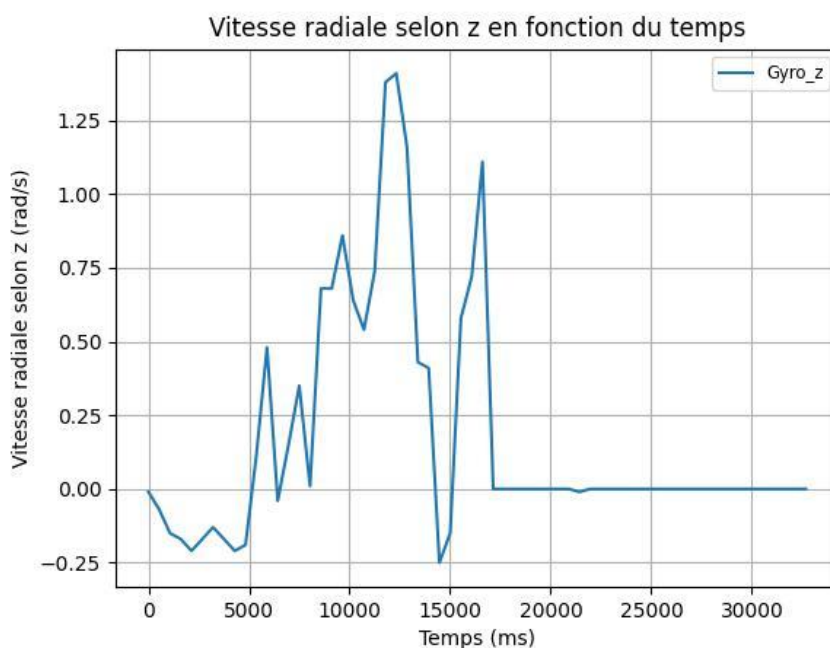
Ici nous observons les données gyroscopiques :



Graph 4 : Vitesse radial sur l'axe x



Graph 5 : Vitesse radial sur l'axe y

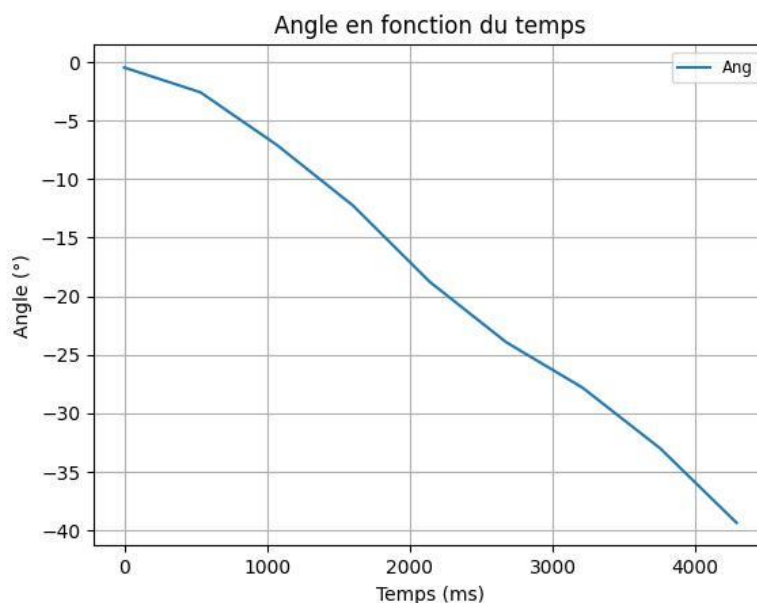


Graph 6 : Vitesse radial sur l'axe z

On peut voir sur les précédents graphiques, lorsque le parachute s'ouvre, l'évolution des vitesses radiales sont erratiques, cela est dû aux interférences que causent la sangle sur les mouvements de la fusée. On remarque également que pour l'axe principal de la fusée, l'ouverture du parachute cause une inversion totale de la direction de la rotation, cela est dû au fait que le parachute est attaché à la fusée en dessous de son centre de gravité, faisant qu'à l'ouverture, la fusée pointe vers le bas.

En appliquant la relation suivante pour l'axe z nous obtenons ces résultats :

$$Angle_totale = Angle_Initial + w * t$$



Graph 7 : angle de la fusée par rapport

L'angle mesuré a augmenté durant toute la montée mais la dernière valeur est de -39° autour de l'axe z de l'accéléromètre ce qui rentre dans l'intervalle réglementaire ($\pm 45^\circ$ autour de l'azimut) pour une séparation en vol

Conclusion

Bien que nous n'ayons pu atteindre tous les objectifs de ce projet, celui-ci nous a permis d'apprendre beaucoup sur la conception et mise en place de railgun dans une fusée. Les contraintes de poids imposées par le choix du support (mini fusée) sont les causes principales de cet échec. En effet les contraintes de poids que le propulseur et la rampe fournis limite le poids maximal de la fusée a 3,4kg environ, un poids qui est vite atteint avec des supercondensateurs de 500 g et les rails de cuivre correspondants d'également 500 g. Un manque de connaissances approfondis sur la conception de railguns a fait que le projet avançait à petit pas afin d'éviter des problèmes majeurs dans les étapes où le retour en arrière n'était plus possible.

Remerciements

L'équipe du projet souhaite particulièrement remercier Eaton qui nous ont fourni les supercondensateurs utilisés lors du développement du projet.

Nous souhaitons également remercier Planète Science, le CNES et AéroIpsa pour nous avoir soutenus lors de ce projet peu commun.