



université
PARIS-SACLAY



RAPPORT DE PROJET POST-VOL

Minotaur - FX19

BCPE « Aerotech » - Polytech Paris-Saclay



Septembre 2022-Juillet 2023

Fiona Charaix - Lucas Dour - Thomas Jacquemin - Rassoul Ka - Jacques Lepage – Yahya Moumene -
Anthony Perrien - Marceau Pintonato - Guillaume Tremblier - Jeanne Villar



Crédits photo : @CNES/LANCELOT Frederic, 2023 ; Paul Krebs

Table des matières

I.	Introduction.....	4
1.	Remerciements.....	4
2.	Contexte du projet.....	4
3.	L'équipe.....	4
4.	L'association.....	6
II.	Partie mécanique.....	7
1.	Coiffe.....	8
2.	Le tube.....	9
3.	Bloc OBC.....	11
4.	Parachute.....	12
5.	Case moteur et ailerons.....	14
6.	Patins.....	16
III.	Partie électronique.....	17
1.	Intégration globale.....	17
2.	Le séquenceur.....	17
3.	Servomoteur.....	18
4.	Carte jack.....	18
5.	Interface Homme-Machine.....	19
6.	Electronique de l'expérience.....	19
IV.	Expérience.....	20
V.	Déroulement du vol.....	22
1.	Conditions.....	22
2.	Trajectoire.....	22
3.	Récupération.....	23
VI.	Résultats.....	24
1.	Accéléromètre DIY.....	24
2.	IMU.....	25
a)	Axe longitudinal (z).....	25
b)	Axes transversaux (x et y).....	27
3.	L'état de la fusée.....	27
VII.	Conclusion.....	28

I. Introduction

1. Remerciements

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont participé à ce projet de près ou de loin. Merci à l'Université Paris-Saclay et Polytech Paris-Saclay pour leur soutien. Ces structures nous ont aidés à faire vivre notre association étudiante BCPE « Aerotech », sans laquelle le projet n'aurait pas pu voir le jour.

Merci à RS France pour l'aide à l'acquisition de matériel et à l'IJCLab pour l'usinage de pièces. Nous sommes également très reconnaissants de l'aide accordée par le PSIA2 (Paris-Saclay Institute of Aeronautics and Astronautics), nouvel Objet Interdisciplinaire de l'UPS visant à promouvoir les activités du secteur au sein de l'Université.

Merci aux professeurs de Polytech qui nous ont aidés, d'un point de vue technique ou gestion de projet.

Nous remercions également les bénévoles de Planète Sciences et du CNES qui nous ont offert un excellent suivi, nous permettant de venir à bout de ce projet, ainsi qu'un excellent C'Space pour conclure cette belle aventure.

De manière plus générale, nous tenons à remercier toutes les personnes et structures qui ont gravité autour de *Minotaur*, qui nous ont chaleureusement accueillis et ont montré de l'intérêt pour notre projet.

2. Contexte du projet

Minotaur est un projet d'étude noté, prenant place dans la 2^{ème} année de cycle ingénieur (équivalent à l'année Bac+4) à Polytech Paris-Saclay. Il s'agit d'un projet inter-spécialité qui a mêlé trois des quatre filières enseignées à l'école : ESR (Electronique et Systèmes Robotisés), PSO (Photonique et Systèmes Optroniques) et MME (Matériaux : Mécanique et Energie). Ce projet s'est tenu de septembre 2022 à avril 2023, à la fin du 2^{ème} semestre.

La quasi-totalité de l'équipe s'étant vue prise par le stage de 2^{ème} année à l'étranger, une rotation a été réalisée au mois d'avril afin de pouvoir finir la fusée et d'assurer son lancement au C'Space en juillet 2023. C'est donc en avril que le projet est devenu un projet purement de club, extra-scolaire.

Nous avons souhaité réaliser une fusée, suite au vol nominal de la fusée expérimentale CERES, au C'Space en juillet 2022. Ce projet avait été réalisé avec PERSEUS, un groupe du CNES, l'agence spatiale française. Regroupant plusieurs école d'ingénieurs, CERES a été la première expérience de notre association, une expérience nominale dont nous avons beaucoup appris.

3. L'équipe

Nous sommes une équipe d'étudiants ingénieurs, tous intéressés par le domaine aérospatial. Nous avons au début du projet réalisé un organigramme, qui a évolué au cours du temps, pour mieux répartir le travail en fonction des compétences de chacun.

Chef de projet : Lucas Dour

Team expérience :

- Guillaume Tremblier, PSO. Également chef de projet par alternance
- Marceau Pintonato, PSO
- Fiona Charaix, ESR
- Anthony Perrien, ESR

Team fusée :

- Lucas Dour, MME
- Thomas Jacquemin, ESR
- Jeanne Villar, MME
- Jacques Lepage, MME

Ont aussi participé : Rassoul Ka, Lucien Jousset, Yahya Moumene.

Avec la précieuse aide de Samir Bouaziz, professeur de la spécialité ESR.



Figure 1 : l'équipe à la RCE2, en février 2023 à la Cité des Sciences à Paris. De gauche à droite : Marceau, Fiona, Jeanne, Jacques, Thomas, Anthony, Guillaume, Lucas

4. L'association

Le Bureau de Conception de Projet Etudiants (BCPE), communément appelé « Aerotech » est une association Loi 1901 qui a vu le jour en mars 2022. Elle a été créée initialement pour pouvoir participer au projet PERSEUS du CNES et éventuellement à terme lancer ses propres projets, sans forcément être en lien avec l'aéronautique.

Aerotech a ainsi contribué à CERES, la fusée PERSEUS pour le C'Space 2022. Une imposante fusée expérimentale qui a volé nominalement. La 1^{ère} expérience de l'association s'est donc conclue par un succès.



Figure 2 : Lancement de CERES le 22 juillet 2022

Suite à cette réussite, l'association a décidé pour l'année scolaire 2022-2023 de reparticiper à PERSEUS sur la nouvelle fusée « Serendipity » et de réaliser sa propre « fusex », à des dimensions plus conventionnelles pour le C'Space.

En septembre 2023, Lucas, président fondateur de l'association passe les rennes à Rassoul.

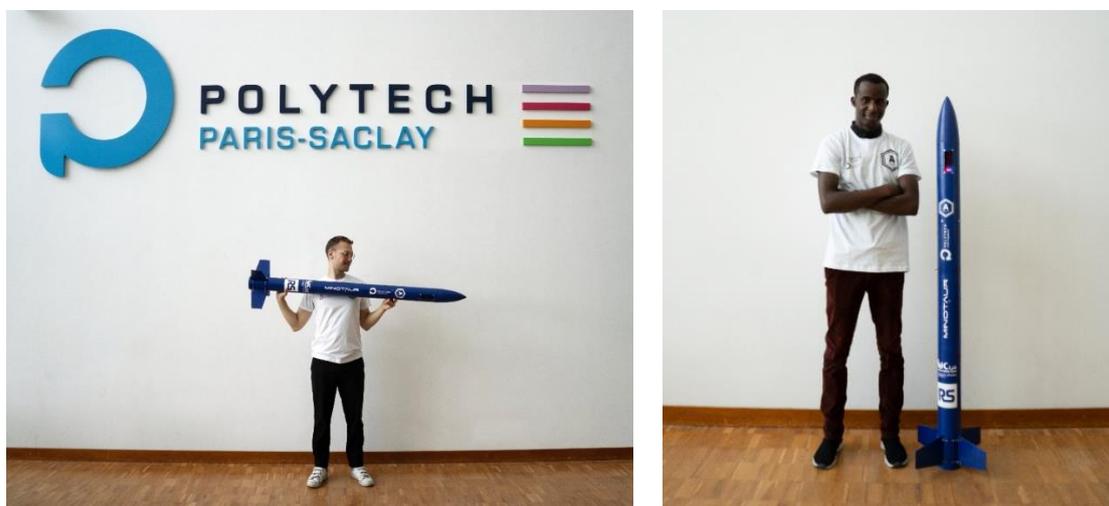


Figure 3 : Lucas et Rassoul avec Minotaur

II. Partie mécanique

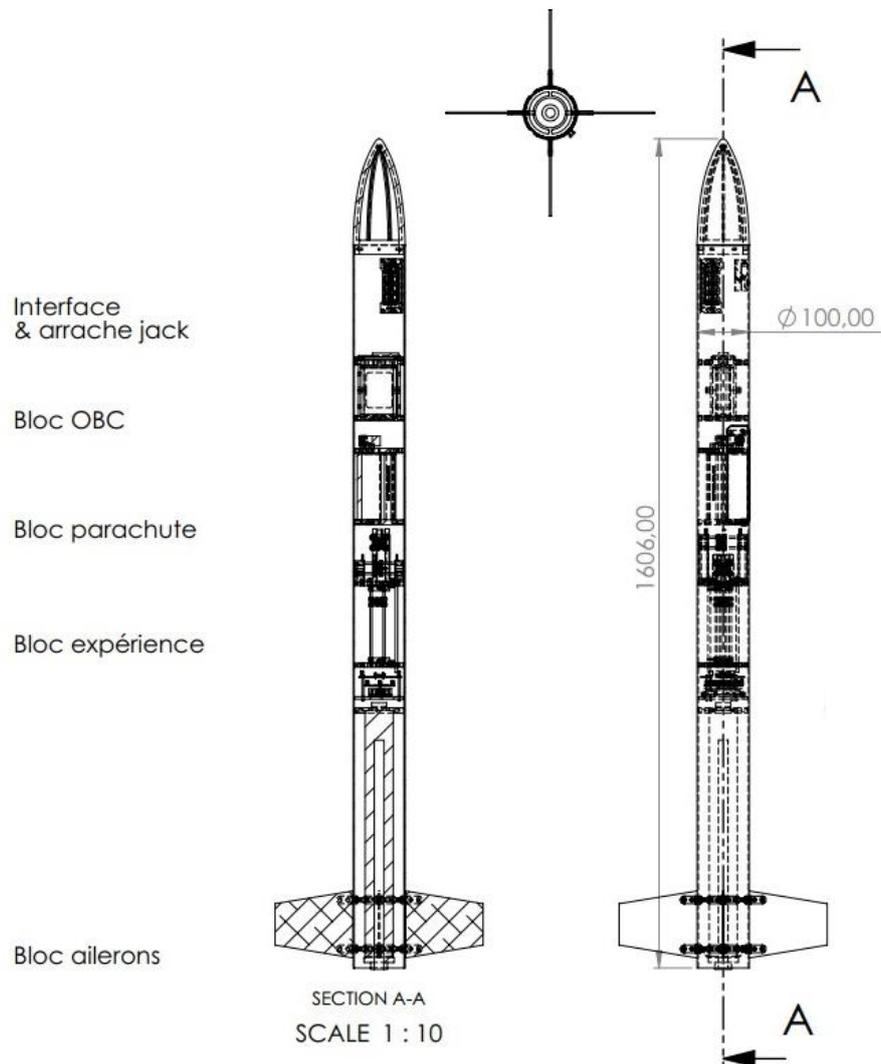


Figure 4 : plan général de Minotaur



STABILITO

Stabilité de fusée à ailerons

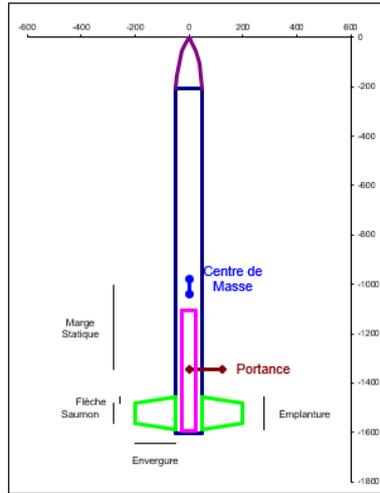
Remplir les cases jaunes

Fusée	
Nom	Minotaur
Club	Aerotech
Type	Fusée expérimentale.
Masse	5000 g sans propu
Centre de Masse	928 mm sans propu
Longueur totale	1606 mm

Propulseur	
Type	Barasinga (Pro54-5G C)
Position du bas	1596 mm

Coiffe	
Forme	Ogivale (pointue)
Hauteur	206 mm
Diamètre	100 mm

Ailerons	
Mono-empennage	
Emplanture 'm'	130 mm
Saumon 'n'	80 mm
Flèche 'p'	25 mm
Envergure 'E'	150 mm
Épaisseur 'ep'	3 mm
Nombre	4
Position du bas	1589 mm



10/10/2023	Min	Résultats	Max
Finesse	10	16,1	35
Portance	15	18,4	40
Marge Stat.	2 D	3,09 D	3,69 D
Couple	40	56,8	67,8
XCp		1345 mm	1345 mm
MS /L		19% L	23% L

STABLE

Language/Langue Français

Fusée mono-diamètre,

	Propu plein	Propu vide	Sans propu
Masse propu	1,685 kg	0,652 kg	-
CdM propu	250 mm	240 mm	-
Masse fusée	6,685 kg	5,652 kg	5 kg
CdM fusée	1036 mm	976 mm	928 mm

	XCp	Cn α
Coiffe	96 mm	2,0
Ailerons	1497 mm	16,4

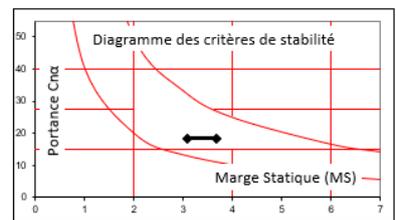


Figure 5 : Stabtraj final de Minotaur

Dans cette partie, les composantes mécaniques sont présentées du haut de la fusée vers le bas.

1. Coiffe

Nous avons choisi de réaliser une coiffe ogivale pour notre fusée. En figure 6, ses dimensions :

Coiffe	
Forme	Ogivale (pointue)
Hauteur	206 mm
Diamètre	100 mm

Figure 6 : extrait du stabtraj final portant sur la coiffe

Nous l'avons imprimée en ABS chargé carbone, pour une meilleure résistance mécanique et une meilleure conductivité de la chaleur, car elle serait plus tard peinte en bleu foncé. Il s'agit probablement de surqualité, de l'ABS simple aurait suffi, mais nous voulions tenter l'expérience. L'imprimante dispose de deux têtes d'impression : une pour l'ABS au carbone (noir) et une pour le PVA (blanc).



Figure 7 : la coiffe fraîchement imprimée

Une fois la pièce imprimée, elle a subi un bain pour dissoudre le PVA qui a servi de support d'impression. Ensuite, nous avons inséré 6 inserts au moyen d'un fer à souder afin de fixer la coiffe au tube.

2. Le tube

Nous avons choisi une architecture en mode peau porteuse, c'est-à-dire que les composants internes ne sont pas mécaniquement attachés entre eux, mais tous au même tube. Celui-ci se doit donc d'encaisser tous les efforts internes lors du vol de la fusée.

Notre tube est issu du commerce. Il est en alliage d'aluminium. Ses dimensions sont les suivantes : 2000 x 100 x 2 mm. Nous avons commencé par le tronçonner à la bonne longueur de 1400 mm.



Figure 8 : tronçonnage du tube par Jacques

Nous avons imprimé un patron de perçage pour nous aider à percer le tube avec le bon angle entre chaque trou. Un patron de perçage en 2D, imprimé sur une feuille, aurait aussi été une solution, mais bien moins pratique. Ce patron nous a servi pour les ligne de 6 trous répartis à 60 ° et pour les trous des équerres maintenant les ailerons, repartis irrégulièrement. Comme pour la coiffe, le PVA est retiré par dissolution à l'eau.

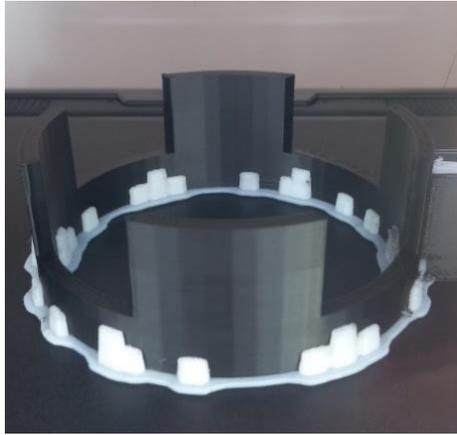


Figure 9 : patron de perçage pour le tube

La porte de la trappe latérale du parachute (voir plus bas la partie concernant le parachute, partie II. 8 Parachute) a été découpée à la disquuseuse et à la Dremel directement dans le tube principal : elle ne provient pas d'une autre section de tube. La largeur du disc cause une perte de matière qui n'est pas gênante : cela laisse du jeu à la porte pour se positionner correctement.



Figure 10 : découpe dans le tube de la trappe et de la porte pour le parachute

3. Bloc OBC

Le but du bloc OBC (« On Board Computer ») est d'accueillir le séquenceur et l'alimentation électrique de la fusée, donc dans notre cas, une STM32 et deux power banks de téléphone, un choix facilitant pour nous.

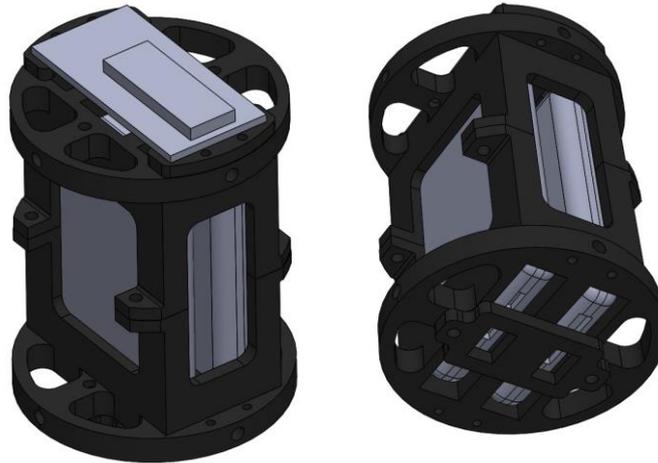


Figure 11 : CAO du bloc OBC, vu de dessus et vu de dessous. La carte STM32 est vissée sur le dessus

Nous avons imprimé les quelques pièces constituant le bloc en ABS et posé des inserts au besoin. Petite erreur de conception, nos câbles d'alimentation sortent des batteries par le bas, ce qui signifie qu'avec la très forte accélération que subit la fusée, ils pourraient se débrancher. Nous les avons donc glués le jour du lancement, ce qui serait à éviter à l'avenir. Heureusement, cela a suffi pour notre vol, rien ne s'est débranché.



Figure 12 : Mauvaise idée de brancher les câbles par le bas !

4. Parachute

Plusieurs formes de parachutes sont couramment employées au C'Space : principalement les hémisphériques et les cruciformes.



Figure 13 : parachutes hémisphérique et cruciforme

Il est courant au C'Space de fabriquer soi-même son parachute en se munissant de toiles et d'une machine à coudre. Aucun membre de notre club ne disposant de compétences en couture, il a été décidé de l'acheter chez un fournisseur de parachute. Nous avons alors découvert une forme plus rare mais plus performante : la toroïdale.



Figure 14 : parachute toroïdal

Cette forme offre une bien meilleure trainée aérodynamique (coefficient $C_x = 2,2$ au lieu de $C_x = 1$ dans la plupart des cas) pour une même surface projetée. En effet, les suspentes au milieu ramènent la cheminée vers le bas et donnent au parachute la forme toroïdale. On peut donc se contenter d'un parachute plus petit pour satisfaire le CDC, permettant ainsi de petites économies de masse et d'encombrement.

De plus, la surface projetée étant plus faible et les suspentes plus nombreuses que sur un parachute « classique », les efforts déployés à l'ouverture sont moindres et mieux répartis : on peut donc se permettre de faire un point d'ancrage moins massif et donc de faire cette fois d'importantes économies de masse et d'encombrement.

Le parachute « High performance CD2.2 » en taille 4 ft de chez Rocketman a ainsi été choisi pour équiper Minotaur. L'émérillon (pivot) est inclus. Il permet d'éviter que les rotations de la fusée ne se transmettent au parachute et vice-versa.

La toile a les caractéristiques dimensionnelles suivantes :

diamètre ext (ft)	diamètre ext (in)	rayon ext (mm)	diamètre trou (in)	rayon trou (mm)	surface (m ²)
4	48	609,6	8,44	107	1,1314

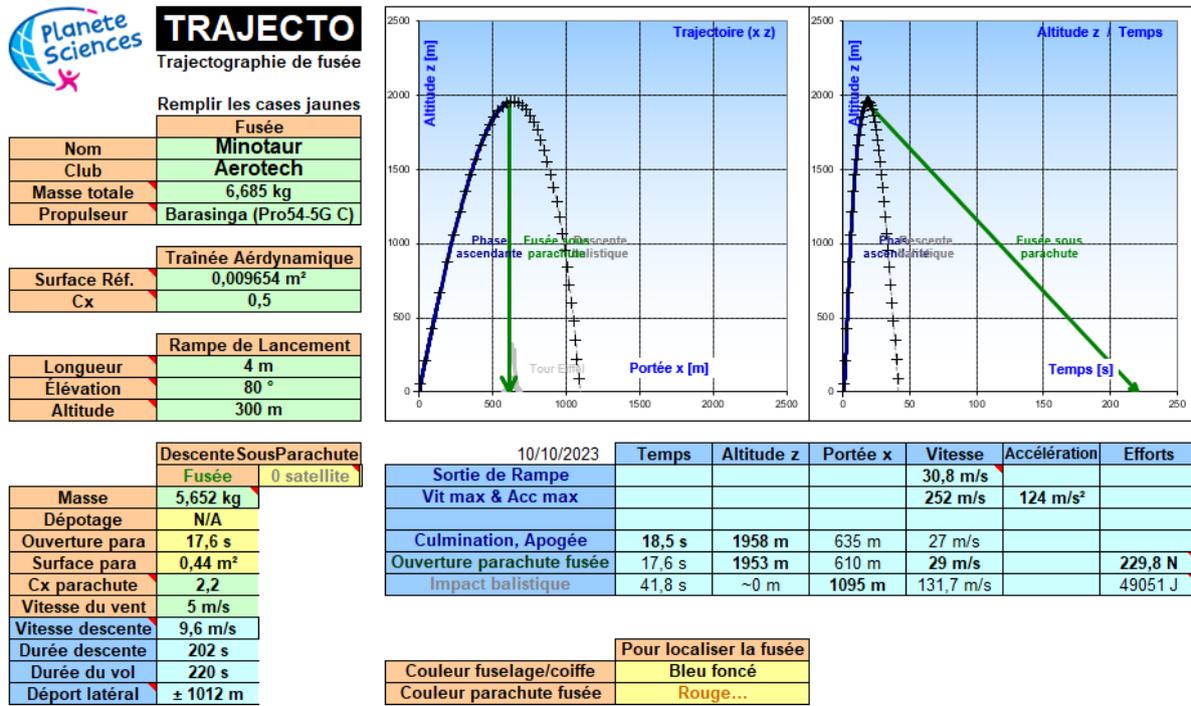


Figure 15 : extrait du Stabtraj final, onglet trajectoire

En figure 15, on lit que la vitesse de descente est de 9,6 m/s, ce qui permet une marge de manœuvre assez large entre les valeurs limites du cahier des charges (5 et 15 m/s) au cas où le parachute devait se comporter de manière inattendue. On rappelle que ce genre de parachute nous était inconnu avant le lancement.

Tout comme ce qui a été développé sur CERES (PERSEUS) en 2022, le déploiement du parachute se fait par une trappe transversale verrouillée par un servo-moteur. L'ouverture de ce dernier est contrôlé par le séquenceur.

L'extrémité de la sangle côté fusée est fixée au point d'ancrage. Il s'agit d'une bague en alliage d'aluminium avec quelques fentes alignés pour le passage et l'accrochage de la boucle de la sangle (voir figure 16). La visserie associée est du M5. Un trou supplémentaire sur cette bague permet d'accueillir le patin supérieur.



Figure 16 : rack parachute 1^{ère} version, et le rack parachute après le vol de la fusée

5. Case moteur et ailerons

La case moteur permet de transmettre la poussée de ce dernier à la fusée (bague de reprise de poussée) et de le maintenir en position longitudinale (bague de centrage). Ces deux bagues de centrage moteur, tout en bas, nous servent aussi à fixer les ailerons.

Ces trois pièces ont été usinées en alliages d'aluminium au Laboratoire de Physique des 2 Infinis – Irène Joliot-Curie (IJCLab) que nous remercions.

Les ailerons, quant à eux, ont été découpés dans une plaque d'aluminium de 3 mm d'épaisseur au moyen d'une disqueuse. Les arêtes ont été limées pour éviter de se blesser ou d'endommager la housse de stockage.



Ailerons	
Mono-empennage	
Emplanture 'm'	130 mm
Saumon 'n'	80 mm
Flèche 'p'	25 mm
Envergure 'E'	150 mm
Epaisseur 'ep'	3 mm
Nombre	4
Position du bas	1589 mm

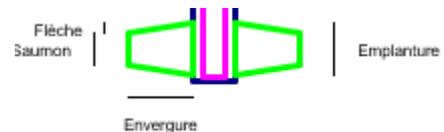


Figure 17 : ailerons découpés et assemblés au bloc, données ailerons dans le Stata

La fixation des ailerons aux bagues s'est faite au moyen de 4 équerres à 4 trous par ailerons. Le côté de chaque équerre reposant contre le tube a dû être arrondi. Pour ce faire, l'équerre est tenue dans un étau et légèrement tordue à la pince pour créer une courbure.



Figure 18 : torsion des équerres à la pince pour leur donner le bon profil

Sur la figure 19, on note que la bague de centrage moteur dispose d'un perçage en plus pour accueillir le patin et deux perçages pour fixer les languettes de butée moteur. Au final, seulement une seule languette sera utilisée après les contrôles au C'Space, sur conseil des suiveurs.

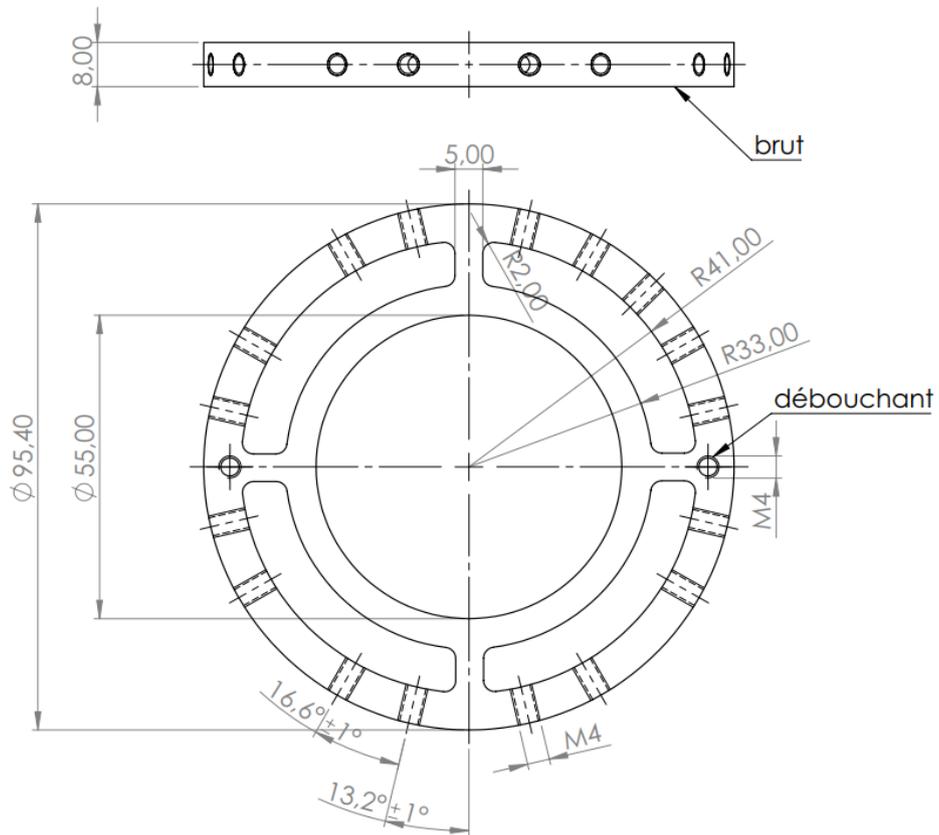


Figure 19 : mise en plan de la bague de centrage inférieure

6. Patins

Nous avons choisi de faire une fusée pour rampe rail, donc nous avons réalisé des patins, usinés en alliage d'aluminium. Leur géométrie est tirée du cahier des charges fusex monoétage.

Un test d'alignement a été réalisé avec un profilé à notre FabLab pour éviter d'éventuelles mauvaises surprises aux contrôles au C'Space



Figure 20 : test des patins avec un profilé d'aluminium

III. Partie électronique

1. Intégration globale

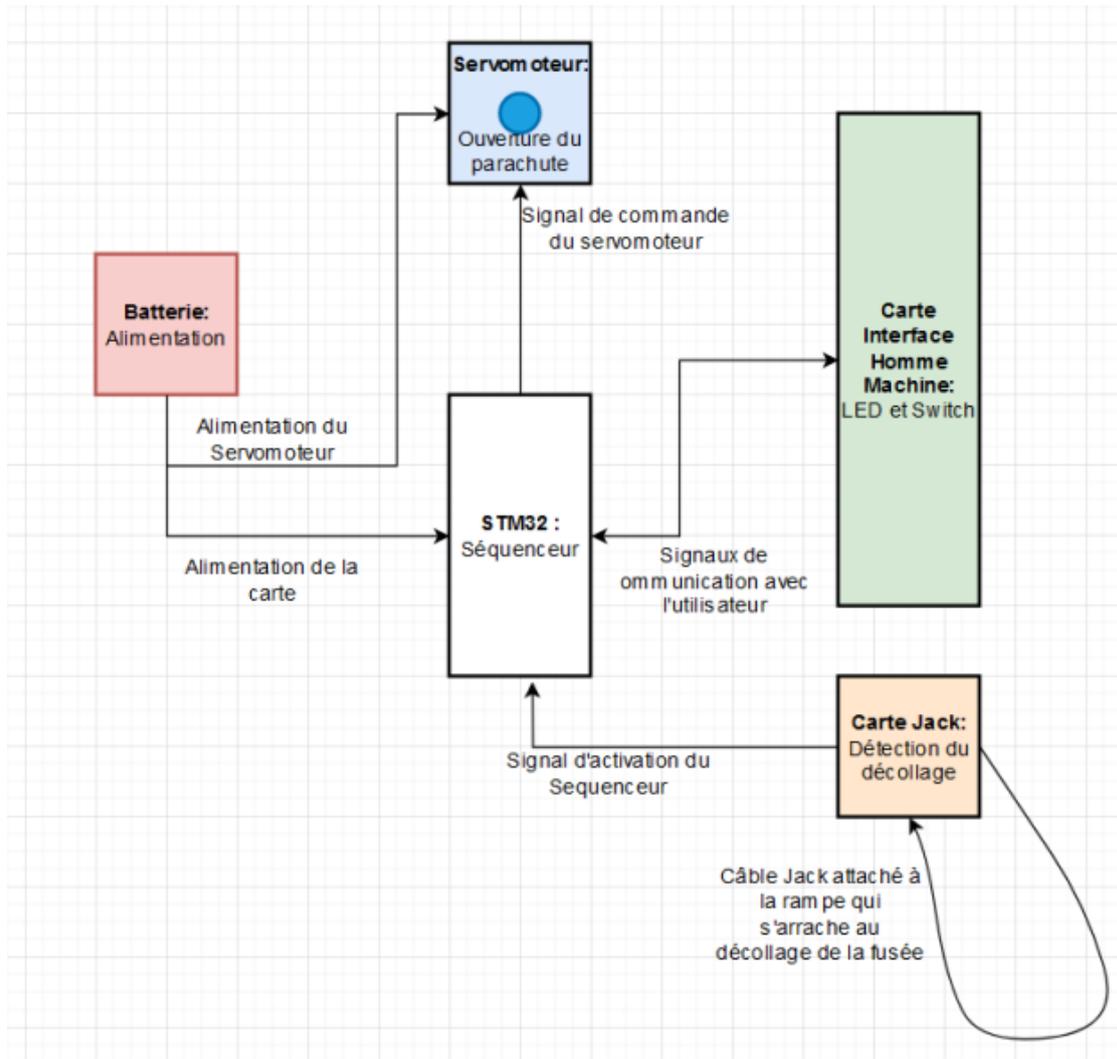


Figure 21 : Interaction entre les différents éléments autour du séquenceur

2. Le séquenceur

Afin de respecter le cahier des charges nous avons réalisé un séquenceur en charge de l'ouverture du parachute. Pour cela nous avons utilisé une carte Nucléos LM432KC sur laquelle est intégré un STM32. Nous avons choisi cette carte car elle offrait largement la capacité de calcul nécessaire pour réaliser le séquenceur.

L'ouverture du parachute est commandée par un signal envoyé au servomoteur. Ce signal est envoyé au moment de l'apogée moins 0,5 s pour laisser un bref délai à la sangle pour être tendue à l'apogée, moment où la fusée se déplace le moins vite, limitant ainsi les efforts qui lui sont appliquées lors du déploiement du parachute.



Figure 22 : Nucléos LM432KC

3. Servomoteur

Le servomoteur est la partie qui est en charge de l'ouverture mécanique de la trappe. Nous avons choisi servomoteur Parallax en contrôle de position. Celui-ci est attaché au rack parachute, juste derrière la trappe.



Figure 23 : Intégration du servomoteur

4. Carte jack

Afin de détecter le moment du décollage de la fusée nous avons réalisé une détection par arrachage de câbles jack. Les parties expériences et déclenchement du parachute, devant être indépendantes sur le plan électrique nous avons prévu 2 signaux. Un qui sera à destination de la carte Nucléos LM432KC qui est en charge du séquençage et un pour le début de l'acquisition des données à destination de la MBed de la partie expérience.

Nous avons réalisé une carte électronique qui intègre deux ports jack femelle. Les câbles agissent comme des liaisons entre l'état haut et cartes. Les signaux en sortie sont donc à l'état haut jusqu'au décollage.

5. Interface Homme-Machine

Afin de pouvoir contrôler les différents éléments de la fusée durant les phases de test et de mise en rampe, nous avons réalisé une carte avec des interrupteurs et des LEDs, accessible depuis l'extérieur de la fusée.

Cette interface à 4 interrupteurs et 2 LEDs nous permet de contrôler les systèmes internes à la fusée depuis l'extérieur. Un pour allumer le séquenceur, un pour allumer l'expérience, un pour passer en mode vol, un pour contrôler manuellement l'ouverture et la fermeture du servo-moteur. Ce dernier nous permet de réaliser facilement des tests d'ouverture de trappe et de déploiement parachute au sol.



Figure 24 : Interface vu depuis l'extérieur de la fusée en rampe

6. Electronique de l'expérience

La partie expérience embarquait très peu d'électronique. Les seuls besoins de cette partie étaient de pouvoir enregistrer les données de l'IMU et des 3 capteurs optiques. Nous avons choisi une carte MBED. Nous avons enregistré les données sur la mémoire de la carte MBed. Nous avons près de 30 min d'acquisition, c'était largement suffisamment.

IV. Expérience

Le bloc expérience est le plus complexe. Il contient l'objet de notre vol : l'accéléromètre expérimental. Basé sur le principe masse-ressort, celui-ci nous permet de remonter aux accélérations subies par la fusée sur les 3 axes. En effet, connaissant la masse m des chariot et la raideur k des ressorts, on peut en mesurant la position x des chariot remonter à la force subie par ceux-ci avec la loi de Hooke et la 2^{ème} loi de Newton.

$$F = -k \cdot x = m \cdot a$$

Avec :

F la force de la fusée sur le chariot en N

k la constante de raideur du ressort en N/m

x le déplacement mesuré lors du vol du chariot par rapport au capteur (=par rapport à la fusée) en m

m la masse du chariot en kg

a l'accélération du chariot par rapport à la fusée en m/s^2

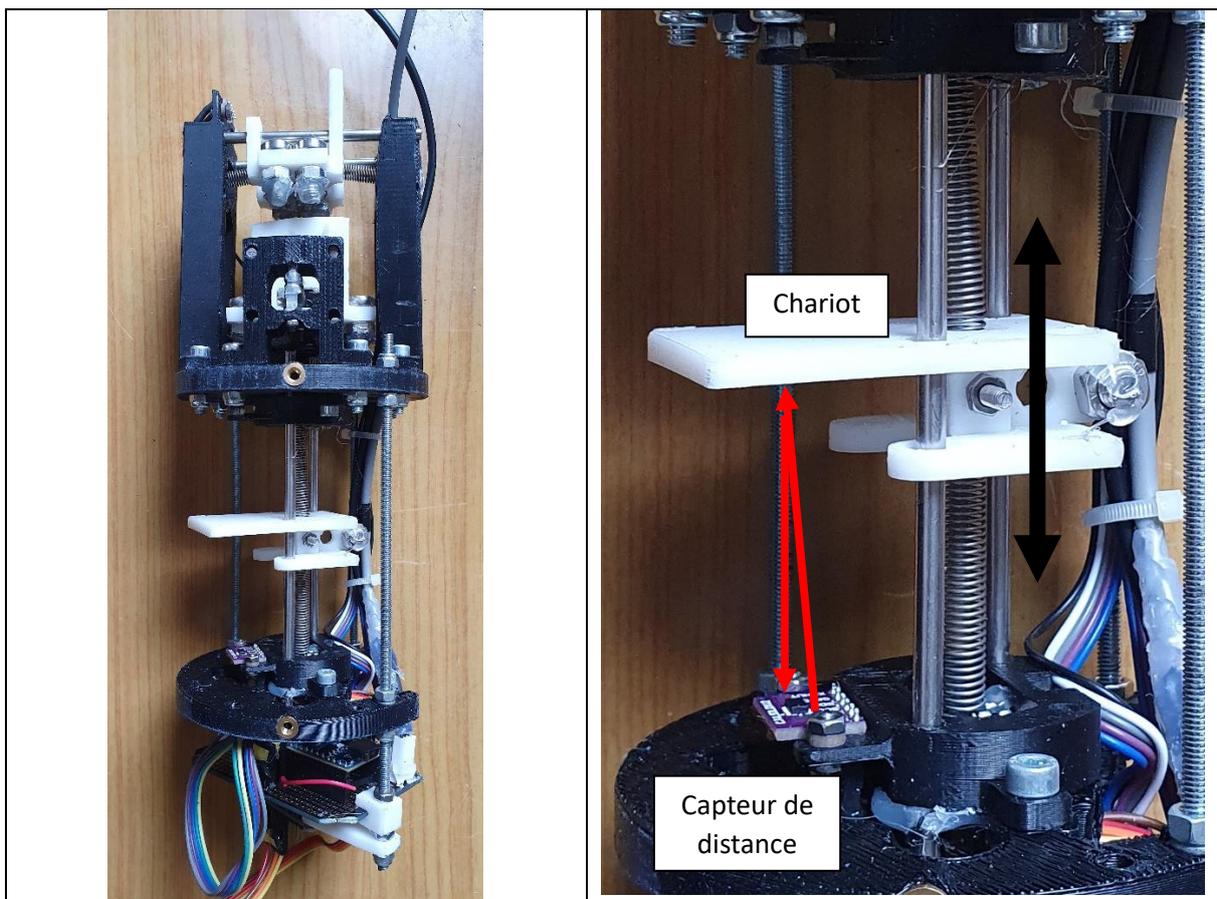


Figure 21 : le bloc expérience

Nous avons réalisé des tests en déplaçant manuellement le chariot de l'axe longitudinal jusqu'en bout de course.

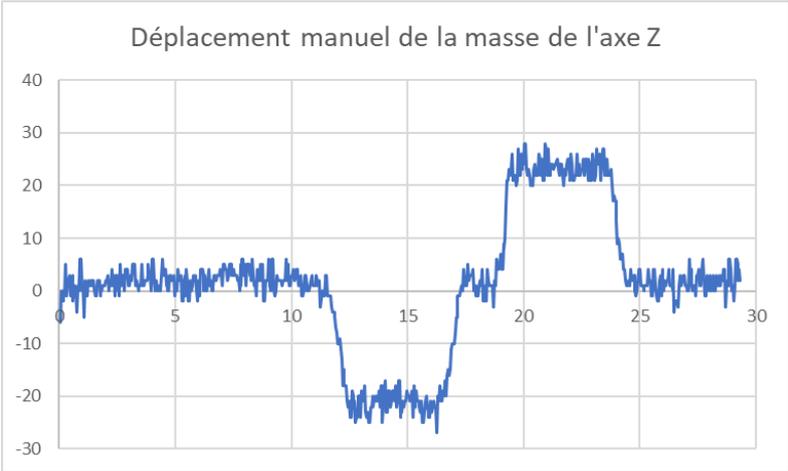


Figure 22: déplacement manuel du chariot de l'axe longitudinal

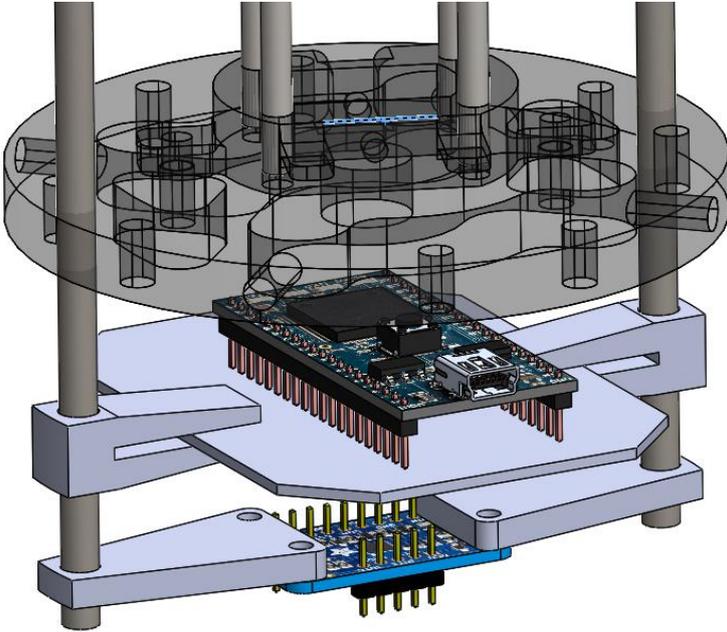


Figure 23 : CAO supports des cartes expérience

V. Déroulement du vol

1. Conditions

Nous avons lancé Minotaure le mercredi 19 juillet à 14h37. La météo du jour était typique du mois de juillet à Tarbes : nuageux et chaud, sans trop de vent. La fusée était en rampe dès le matin pour un lancement à 10 h, mais les restrictions aériennes imposées par l'aéroport de Tarbes nous ont obligés à reporter le vol à 14 h.

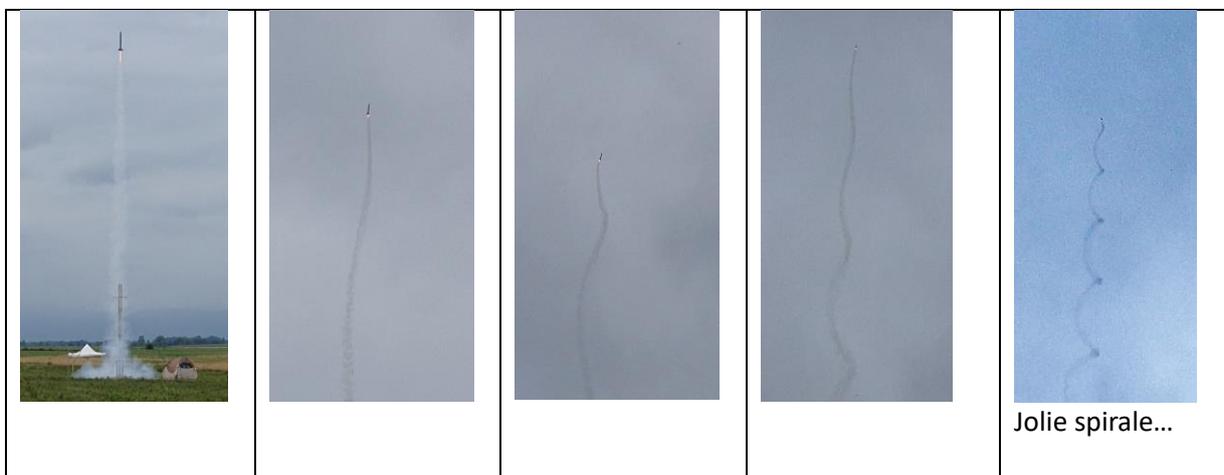


Figure 24 : Minotaure en rampe le matin sur Toutatis

A notre retour en début d'après-midi, la liste des lancements ayant changé, nous avons changé de rampe pour permettre à un autre groupe de se préparer afin de gagner du temps.

2. Trajectoire

Tableau 1 : vidéo du lancement, analyse trajectoire



Lors du décollage, la fusée a réalisé des vrilles, laissant derrière elle une trainée de fumée en forme de spirale. Sur le moment, nous n'avons pas compris pas ce que nous venions de voir. Difficile de dire si la stabilité de notre fusée était insuffisante, si le moteur avait bougé dans son logement...Fort heureusement, la fusée a gardé le cap, le parachute s'est bien déployé et la fusée a ratterri non loin de la zone de lancement. Au moins un succès partiel. Il s'est avéré plus tard que non seulement l'expérience a bien marché, mais elle nous a en plus permis de mieux comprendre l'incident.

3. Récupération

A bord de la ZAS Patrol, nous nous sommes rendu dans le champ où Minotaur a atterri. Le moteur était absent de la fusée et n'a toujours pas été retrouvé à l'heure qu'il est.



Figure 25 : Minotaur à terre après son vol, vue par drone

VI. Résultats

1. Accéléromètre DIY

Les données sont beaucoup plus bruitées que prévu malgré nos tests fructueux au sol.

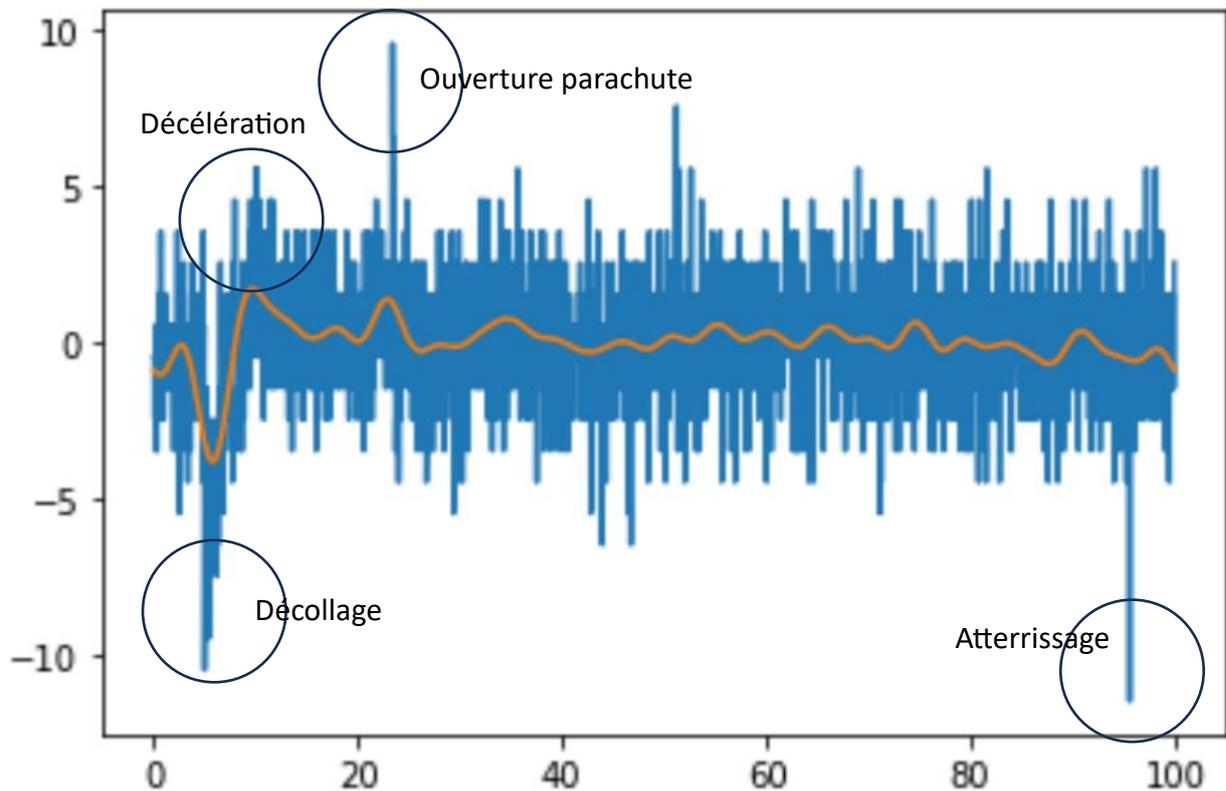


Figure 26 : données fournies par l'expérience : accélération (m/s^2) subie selon l'axe Z (longitudinal) au cours du temps (s)

De telles données sont difficiles à exploiter mais heureusement l'IMU a collecté des données bien plus précises.

2. IMU

Ces données sont bien plus riches car moins bruitées et plus précises, sur les trois axes.

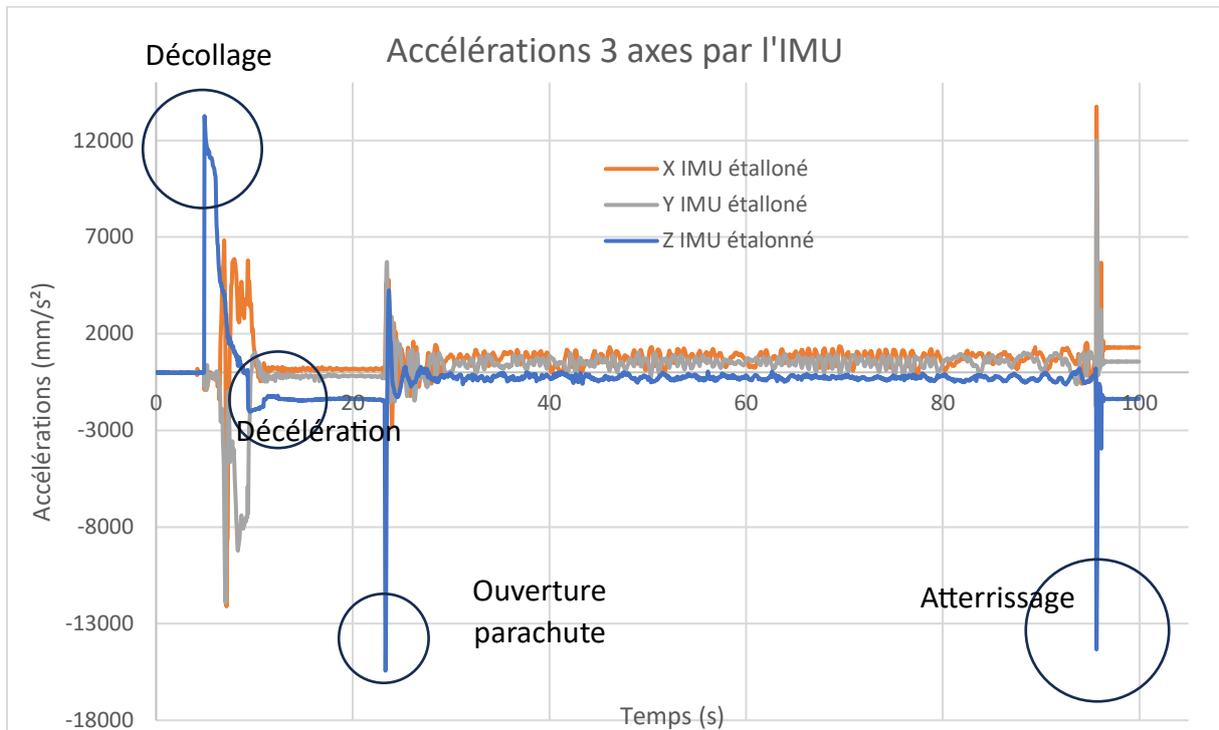


Figure 27 : Accélérations 3 axes (mm/s^2) en fonction du temps (s) mesurées par l'IMU

a) Axe longitudinal (z)

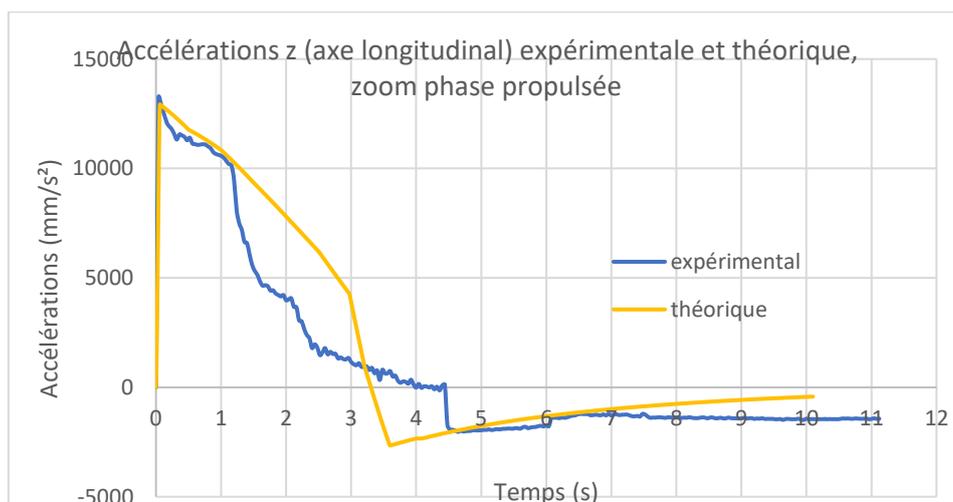


Figure 28 : accélération longitudinales expérimentale et théorique (Stabtraj) au cours du temps, zoom phase propulsée

On constate ici très clairement un défaut moteur qui ne pousse pas comme il faudrait : au bout de 1,5 seconde environ, la poussée décroît de moitié, qui doit correspondre à une fuite de la tuyère : les

composantes longitudinales apparaissent à ce moment, voir figure 31. Cela fait sens, la tuyère fuit et les gaz ne sont plus entièrement dirigés longitudinalement, donc la poussée longitudinale diminue.



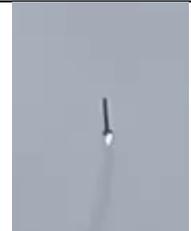
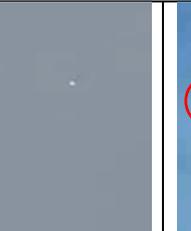
Figure 29 : flammes longitudinale et transversale du moteur

Ensuite, on constate que le moteur pousse une seconde de trop. Cela doit être dû à un débit trop faible et donc plus long dans le temps, peut-être causé par un bouchon de suie, qui aurait aussi causé la fuite de la tuyère.

Et enfin, on constate dans la phase de décélération, à 6 s, une diminution de la décélération. Cela correspond sur la vidéo au rallumage de la flamme. Très étrange.

On constate aussi sur la vidéo une éjection de quelque chose d'incandescent : peut-être de la suie, peut-être un morceau du tube (voir Tableau 3). Au passage, merci à Stéphane Dulac, bénévole Planète Sciences, ex-membre Space'Tech, pour la qualité de cette vidéo. Juste après notre lancement nous cherchions des réponses à cet incident et Stéphane s'est tout de suite montré disponible pour apporter des éléments à notre « enquête ».

Tableau 2 : vidéo du lancement, analyse poussée moteur

					
Vrille	Arrêt moteur Stabilisation fusée	Rallumage moteur tout doucement	Ejection d'un élément incandescent	Disparition fusée et de sa flamme dans les nuages	Fusée sous son parachute et le moteur encore chaud faisant route à part

b) Axes transversaux (x et y)

Contrairement à ce que certains ont pu avancer en voyant notre lancement, ce n'est pas la stabilité de la fusée qui est en jeu (et la fiabilité du Stabtraj avec) : une fois le moteur défaillant éteint, la fusée reprend une trajectoire droite. C'est même son excellente stabilité qui lui a permis de garder le cap malgré la poussée transversale du moteur.

On a vu le vol de Belisama FX-02 (Elisa Space) le vendredi midi se conclure bien plus dramatiquement avec également une fuite du même moteur que le nôtre : le Pro54. La fuite a sûrement été plus importante que la nôtre. Celle-ci a poussé la fusée à faire un looping, lui faire plonger du nez tout en continuant d'accélérer pendant la redescente car le moteur n'avait pas fini de se consumer.

3. L'état de la fusée

Tableau 3 : état de la fusée post-vol

		
Déformation des équerres tenant les ailerons lors du ratterrissage	Usure du tube et fonte de la peinture par la chaleur d'une des flammes transversales	Rupture de la butée du moteur par une des flammes transversales

L'état du tube nous permet d'apprendre qu'il y a en fait eu deux flammes transversales, de part et d'autre du centre du tube, à peu près symétriques. C'est cette asymétrie qui doit être à l'origine de la vrille. La fusée Belisama, n'a pas eu cette « chance » et n'a eu qu'une seule flamme transversale (asymétrie bien plus importante donc), causant une déstabilisation bien plus problématique.

On comprend aussi pourquoi le moteur n'est plus présent dans son logement : la butée le retenant a été rompue.

Concernant ces trous dans le tube, cet enlèvement de matière n'est pas dû à de la fusion mais à de l'abrasion, la température des flammes étant trop basse par rapport à la température de fusion de l'aluminium allié. Cependant, c'est bien la chaleur qui est responsable de la disparition de la peinture.

VII. Conclusion

En somme, la fusée a bien volé malgré un moteur en-dessous des attentes. Cela est assez frustrant car ses performances ne dépendent pas de nous. En revanche, notre parachute innovant a très bien fonctionné. Concernant l'expérience, celle-ci n'a pas été aussi précise que prévu, mais l'IMU sauve la mise. Elle s'est même montrée cruciale dans l'analyse du problème moteur, elle nous a permis de mieux comprendre ce qu'il s'est passé lors de l'incident. Notre expérience aurait pu s'appeler « Analyse d'un problème moteur », mais on ne peut pas prévoir ce genre de chose ! Les hypothèses émises pourront être confirmées ou non après analyse du moteur, si jamais il est retrouvé en ZAS.

Nous avons appris lors de ce projet à mener la construction d'une fusée et de son expérience avec une exigence que nous ne connaissions pas avant. Nous avons appris à travailler sans compter afin de voir notre fusée prendre son envol. A l'école, nous apprenons souvent à mener des projet fictifs, oubliés une fois la soutenance finale passée. Dans notre cas, nous avons eu à réaliser des réelles prévisions de budget, de réelles commandes de matériel, une réelle fabrication de produit, une réelle gestion de groupe et de connaissances, avec à la clé un résultat bien concret : une fusée. Pour de vrai. La dimension extra-scolaire qu'a pris ce projet lui a permis de démultiplier la hauteur des résultats. Nous considérons que cette expérience est bien plus réaliste et correspond mieux à ce qui se fait dans le monde du travail que des projets fictifs.

En termes de retour de d'expérience, nous notons qu'il serait préférable à l'avenir de s'assurer d'un meilleur engagement de toute l'équipe. La quantité de travail fourni a été mal répartie et certaines parties de la fusée auraient pu être plus abouties. Cependant, la voie des fusex est maintenant ouverte pour notre association et les suivantes pourront se baser sur au moins une partie du travail réalisé sur Minotaur.

Pour conclure, nous tenons une fois de plus à remercier nos sponsors, nos enseignants, les bénévoles de Planète Sciences et du CNES, et tous ceux qui ont travaillé de près ou de loin sur Minotaur.



Figure 30 : Minotaur prend 13 G. @CNES/LANCELOT Frederic, 2023