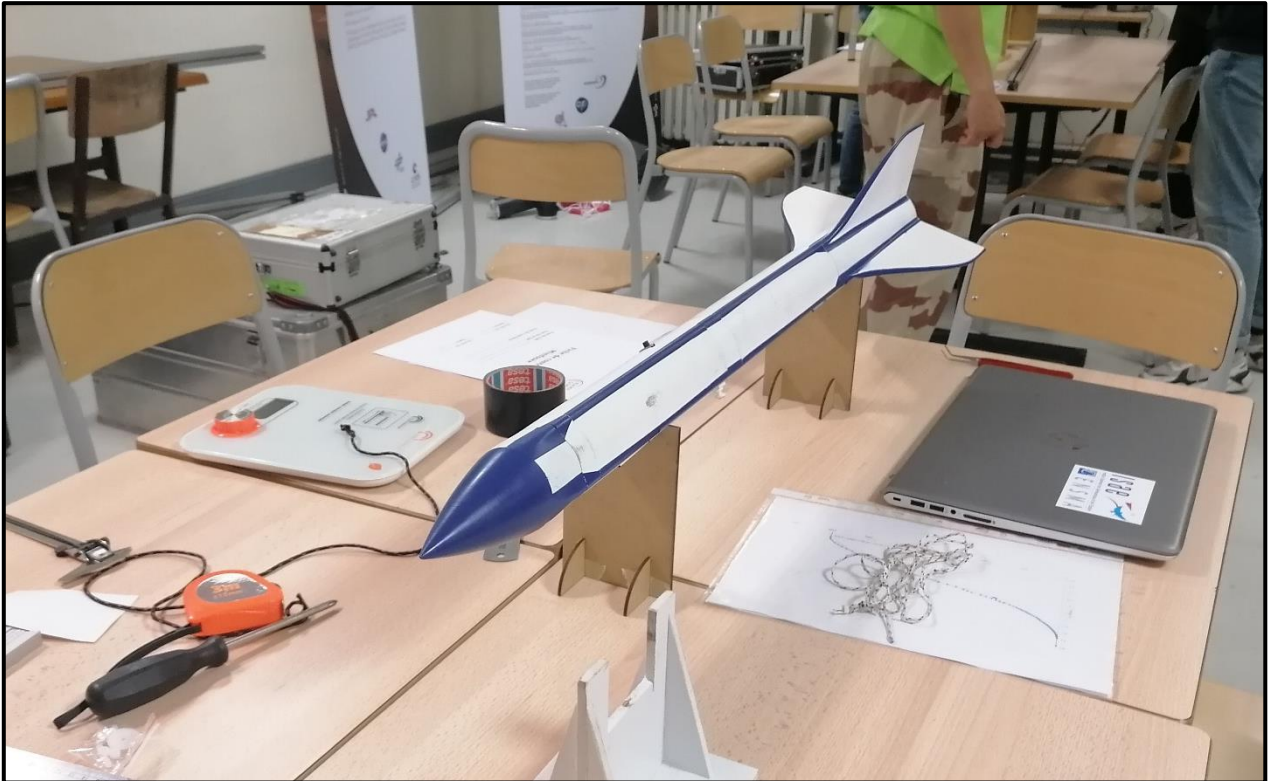


Compte rendu

Astréos



C'Space 2021

Catégorie mini-fusée

ENSMASpaceProject



Sommaire

Membres du projet.....	3
Présentation du projet.....	4
Introduction.....	5
Description mécanique.....	7
Description électronique et informatique.....	19
Expériences.....	20
Déroulement du vol.....	21
Résultats.....	22
Conclusion et remerciements.....	30



Membres du projet :

- Louis GALINIER (chef de projet)	- Arslene CHEBOUROU (vice-chef de projet)
- Achraf SIDALI	- Armand PETIT-JACQUIN
- Corentin THOUENON	- François BLAS
- Gregory SUPPLISSON	- Guillaume PEYRICHON
- Hadrien CREVON	- Jan GRABOWSKI
- Julien GRZESKOWIAK	- Nicolas FAVRE
- Tanis PIETO	- Teiva BERRUS
- Thaïs FURON	- Théo COUTY
- Thibault MAGNIER	- Thomas BIAULET
- Valentin LE PAPE	- Valentin GRIENENBERGER

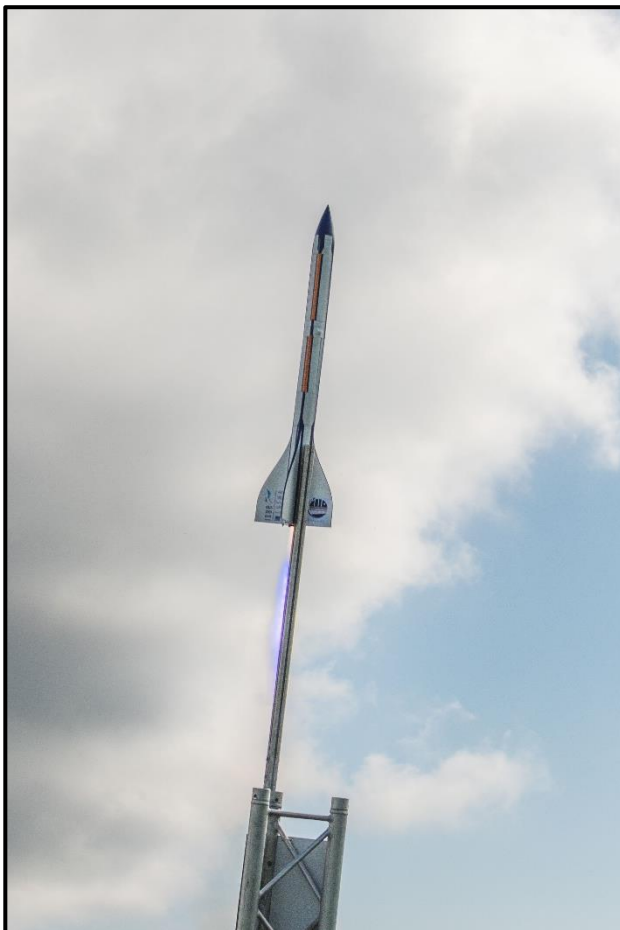


Présentation du projet :

Cette année encore, bon nombre d'étudiants ont décidé de se réunir pour lancer un projet original, innovant et constructif. Ce projet s'inscrit dans le cadre du C'space 2020/2021, et comme toutes mini-fusées Astréos se devait d'apporter un petit plus, une expérimentation, quelque chose permettant de la distinguer des autres mini-fusées. Cette année l'équipe a décidé de se tourner vers l'impression 3D, l'objectif étant de réaliser les pièces structurales ainsi que les éléments critiques avec cette méthode de fabrication. Et le défi fut relevé car seules les tiges, boulons et la bague moteur n'ont pas pu être réalisés ainsi pour des raisons de sécurité.

Une deuxième expérience a été ajoutée, la trajectoire d'Astréos a en effet été mesurée à l'aide de capteurs pour permettre le déclenchement à l'apogée du parachute ainsi que le stockage dans une carte sd pour analyse et comparaison ensuite aux modèles théoriques StabTraj.

Astréos a pris son envol au C'Space 2021 le 16/07 après avoir passé avec succès les qualifications le 15/07.



I. Introduction

Le projet d'Astréos s'inscrit dans le cadre du C'space dans la catégorie des mini-fusées, inscrite en tant que projet étudiant. La fusée a été réalisée par le club de l'ENSMA SPACE PROJECT, il s'agit du club de projet scientifique de l'ISAE-ENSMA, club participant régulièrement au C'space à travers des mini-fusées et des fusées expérimentales notamment.

Nous avons décomposé notre projet en 4 groupes :

- Groupe matériaux et impression :

Ils avaient pour objectif de trouver la matière d'impression répondant au mieux à nos exigences tout en limitant le coût de conception et d'impression. Ils ont dû ainsi se pencher sur le choix entre acier et aluminium pour la bague en métal ainsi que les tiges de renforts. Dans un second temps, le remplissage et le motif d'impression, d'un côté le remplissage doit être suffisant pour permettre une rigidité et une résistance respectant le cahier des charges mais d'un autre côté pas trop important pour limiter la masse.

Le motif lui non plus ne doit pas être pris au hasard, le nôtre doit permettre une rigidité élevée mais aussi une bonne résistance face à la compression et l'allongement pour résister au mieux aux contraintes de vol (le sens d'impression rentre aussi en jeu à ce niveau-là).

- Groupe structure :

Le groupe structure avait pour objectif de décider de la forme de la fusée pour permettre et faciliter l'impression et l'assemblage.

Pour ce faire ils ont modélisé la fusée sur CATIA un logiciel de CAO bien connu à l'ISAE-ENSMA.

Les différentes contraintes étaient de laisser un espace suffisant aux différents modules de la fusée (récupération, électronique, propulsion), de prévoir à l'avance leurs besoins d'accès à l'extérieur, mais aussi d'assurer la stabilité de la fusée en vol.

La difficulté la plus évidente était de s'assurer que les différents tronçons de la fusée soient solidement attachés, l'imprimante 3D du club ne pouvant imprimer des tronçons de plus de 30 cm.

- Groupe récupération :

La mission de la récupération peut se résumer aussi simplement que de nous éviter un vol balistique au cours du lancement.

Ils étaient en charge de réaliser :

- La conception du système d'éjection du parachute et de la trappe, ils devaient s'assurer de son fonctionnement, de sa faisabilité.
- La réalisation du parachute, et des suspentes reliant celui-ci au corps de la fusée.

C'est aussi ce groupe qui a choisi le servo-moteur utile au maintien de la trappe en prenant en compte le diamètre très réduit d'Astréos et les forces exercées par le ressort d'éjection.

- Groupe électronique :

Leurs objectifs étaient de réaliser un système de mesures et étude de la trajectoire réelle de la mini-fusée à l'aide de capteurs. Les problématiques rencontrées sont les suivantes :

- La recherche des capteurs permettant l'analyse de la trajectoire comme un accéléromètre, un altimètre ou encore un capteur de pression.
- La réalisation d'une carte électronique sur-mesure, le choix des éléments nécessaires au système de récupération et de stockage des données.
- L'autonomie, l'électronique doit pouvoir tenir au moins 1 heure allumée et au moins 3 heures pour le reste.
- L'accessibilité et le positionnement de l'électronique embarquée doivent aussi respecter les contraintes du cahier des charges mais aussi être optimisés et miniaturisés pour minimiser la place nécessaire.

Dans un second temps, il devait aussi travailler en collaboration avec l'équipe structure et récupération sur le meilleur système d'ouverture de trappe possible. Le choix de l'utilisation d'un servo-moteur a été relevé.

Chaque groupe avait une séance par semaine, on vient y ajouter une séance supplémentaire où toute l'équipe était réunie pour parler des difficultés rencontrées et pour réaliser l'interaction entre chaque groupe pour une meilleure efficacité.

Malgré cette année difficile, nous avons réussi à réunir une équipe de 20 étudiants de l'ENSMA passionnés et volontaires pour réaliser une mini-fusée pour le C'space 2021.

Notre club étant doté d'une imprimante 3D performante, l'idée de réaliser une mini-fusée entièrement en impression 3D nous est venue en visitant l'atelier pour la première fois. Le projet était à la fois assez simple pour un premier projet toutefois il présentait quand même plusieurs difficultés très intéressantes à étudier pour préparer une éventuelle Fusex pour les années futures.



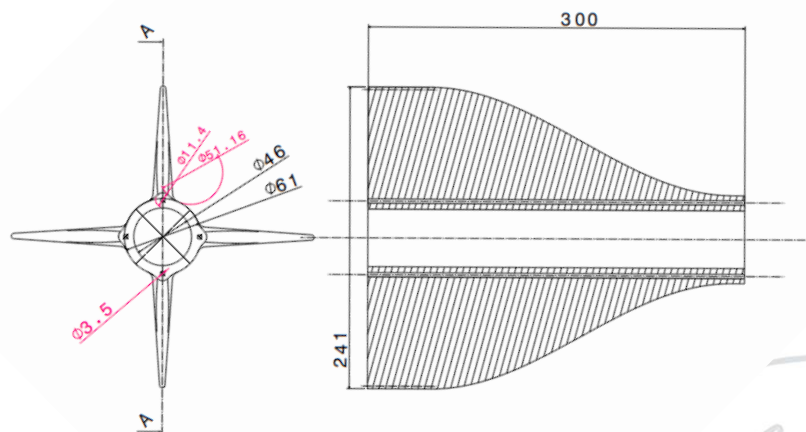
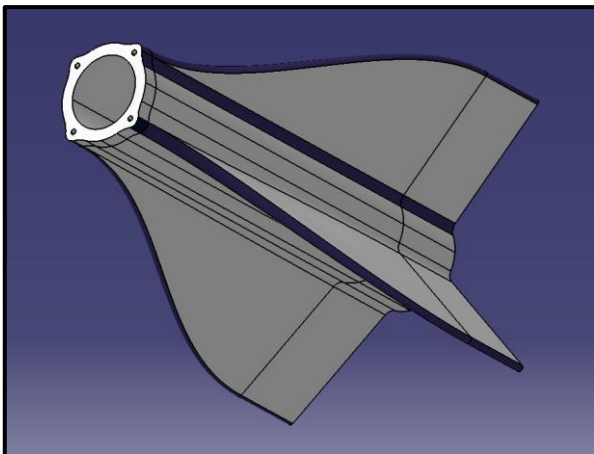
II. Description mécanique

La forme de la fusée le long du corps n'est pas réellement circulaire il s'agit d'un cercle et de quatre renforts permettant d'y glisser des tiges filetées, ainsi lorsque par la suite on parlera de forme cylindrique pour parler des différents modules il s'agira simplement d'un abus de langage.

La contrainte de l'impression 3D nous a poussé à réaliser la fusée en plusieurs parties. Nous avons réalisé 11 parties :

- La partie basse ailerons :

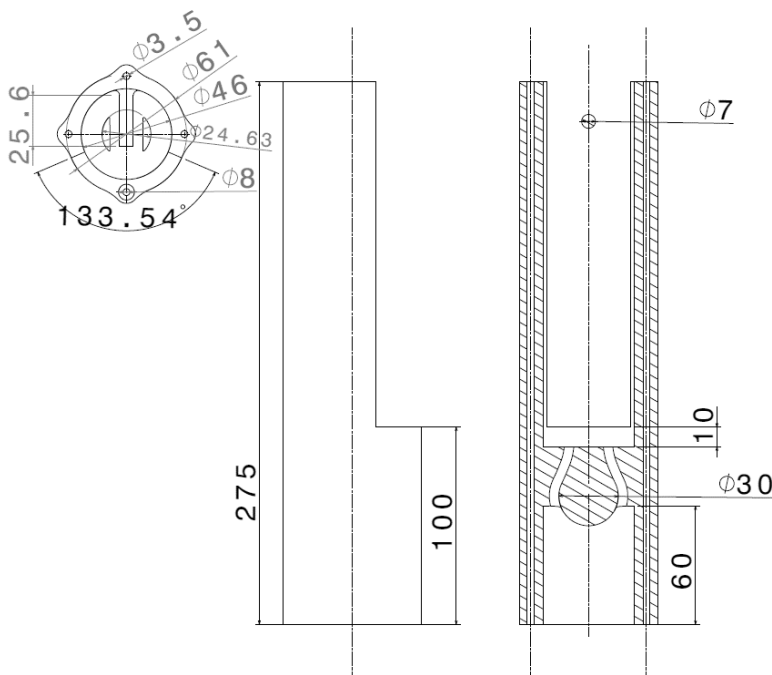
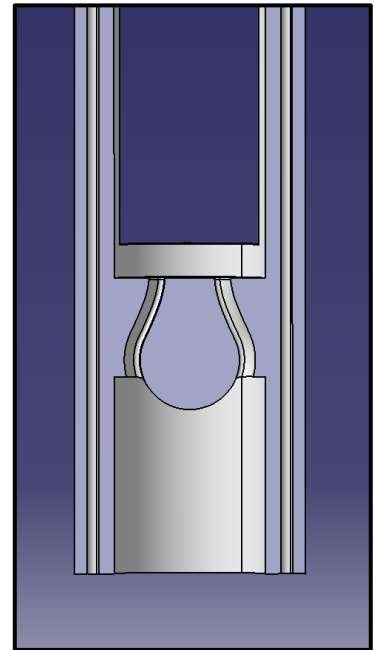
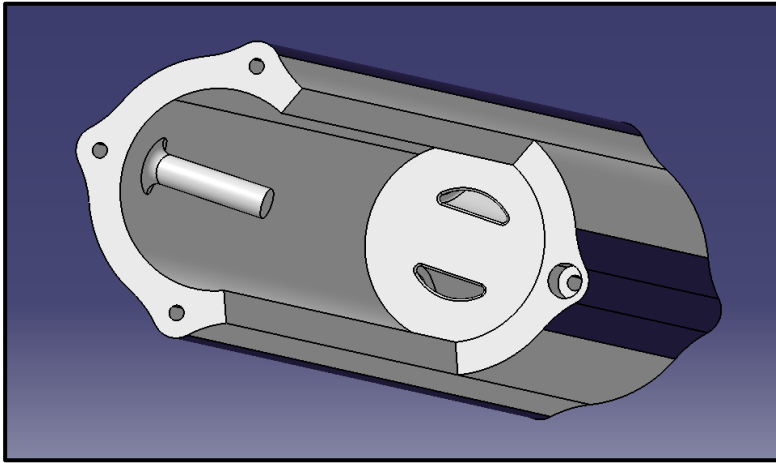
Les ailerons ont été imprimés en une pièce séparée, ils n'ont pas d'épaisseur constante et ne sont pas triangulaires ce qui a pu causer des problèmes lors des mesures pour la vérification de la stabilité effectuée par les contrôleurs de la RCE3 et du C'Space. Leur forme est à la fois aérodynamique et esthétique, c'est l'impression 3D qui a permis d'atteindre une telle complexité. À la base de cette pièce nous trouvons quatre trous qui seront ensuite prolongés jusqu'à la coiffe. Ils permettent d'y faire passer des tiges en acier filetées réalisant le serrage et l'assemblage de la fusée à l'aide de boulons.



- La partie centrale récupération :

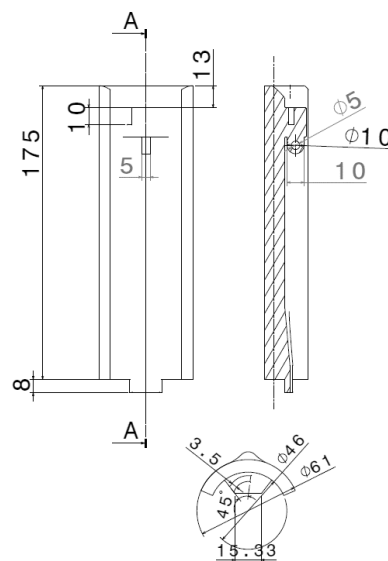
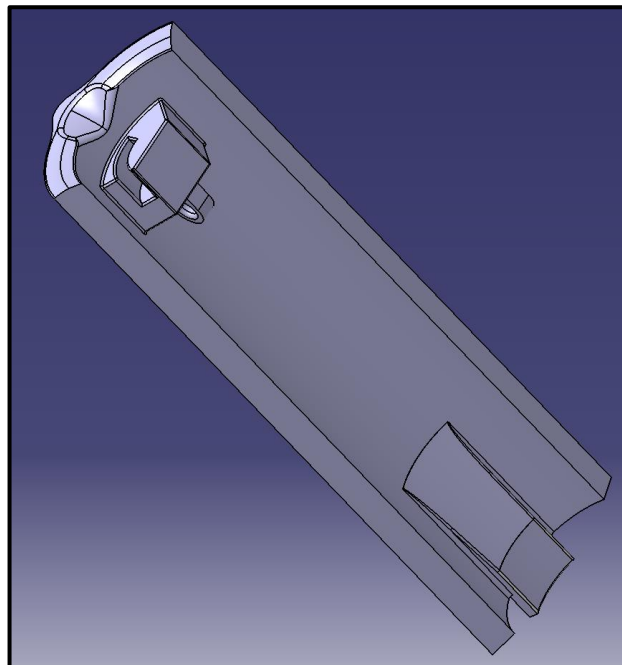
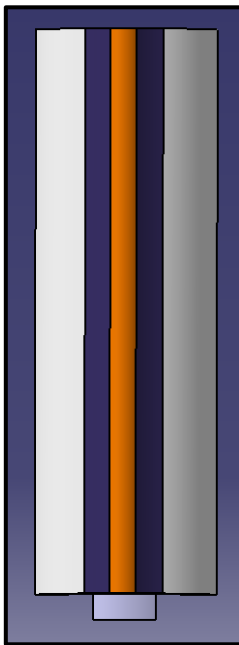
Ce module est un cylindre creux doté de trois particularités :

- Tout d'abord, l'une des 4 tiges filetées s'arrête pour laisser place à la trappe
- Un petit cylindre permettant le de guidage du ressort d'éjection a été imprimé sur la paroi intérieure en direction de la trappe
- Pour finir, un bloc de PLA vient remplir l'intérieur de la pièce dans la partie inférieure laissant une boucle de passage permettant d'y fixer solidement la sangle et de bien répartir les efforts.



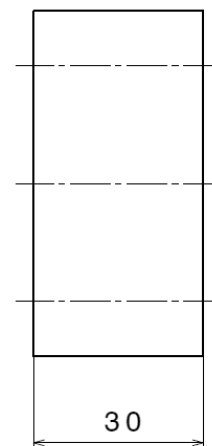
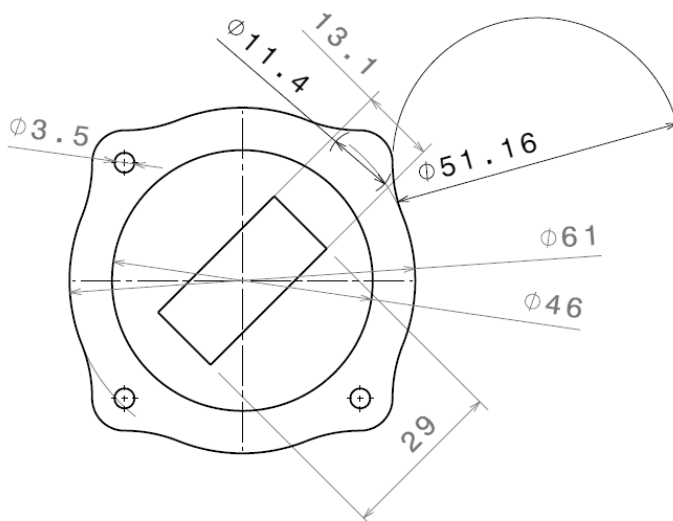
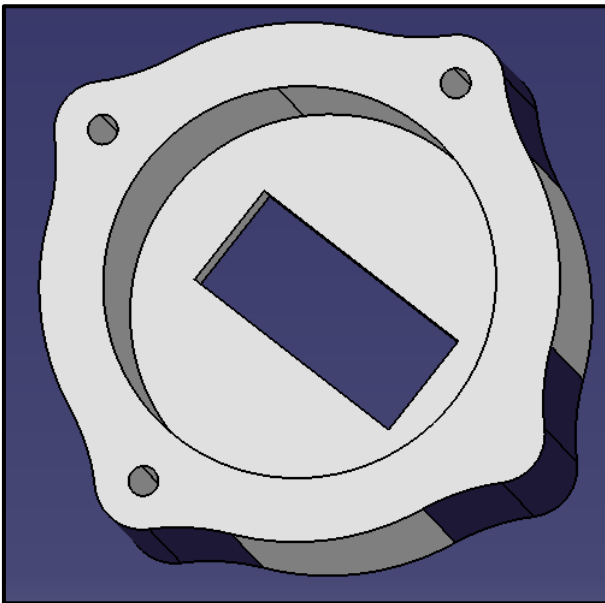
- La partie trappe parachute :

La trappe parachute est une portion de fuselage à laquelle on a retiré le trou nécessaire pour faire passer une tige filetée, inutile ici. On a aussi rajouté une languette en bas pour bien la tenir lorsqu'elle n'est pas fermée ainsi qu'une buté au sommet face au cylindre de guide du module récupération pour permettre au ressort d'appuyer sur une surface plane. Cette buté est percée verticalement d'un sillon suivant une trajectoire circulaire permettant au servo-moteur de venir s'y mettre et de tenir la trappe en position de montée.



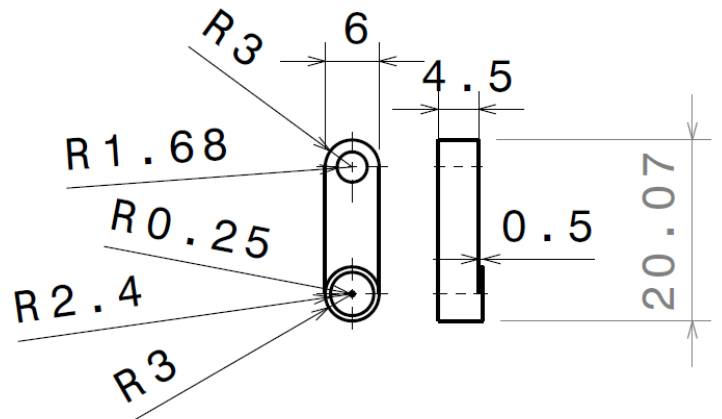
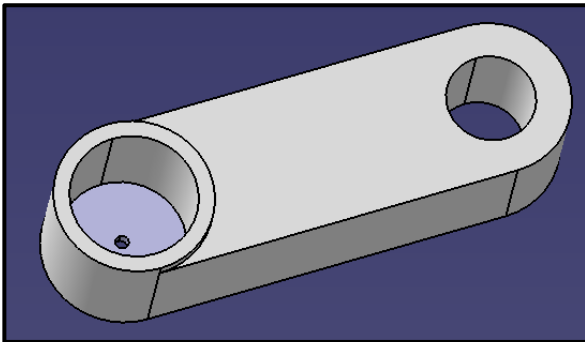
- Partie servo-moteur :

La bague servo est une portion de fusée découpée horizontalement permettant d'y glisser le servo-moteur, une ouverture rectangulaire sur le sol permet de le poser à plat et de le faire passer dans le sillon de la trappe récupération. Des vis ont été mises post-impression pour venir le fixer solidement.



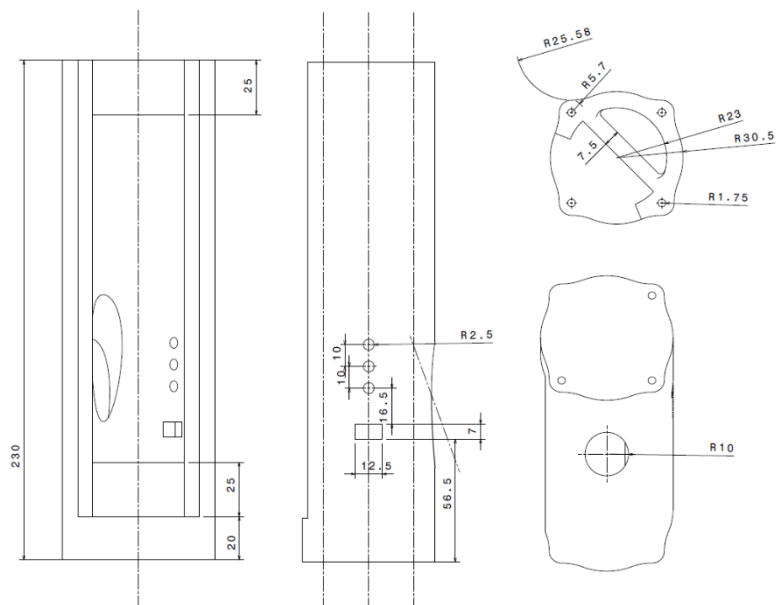
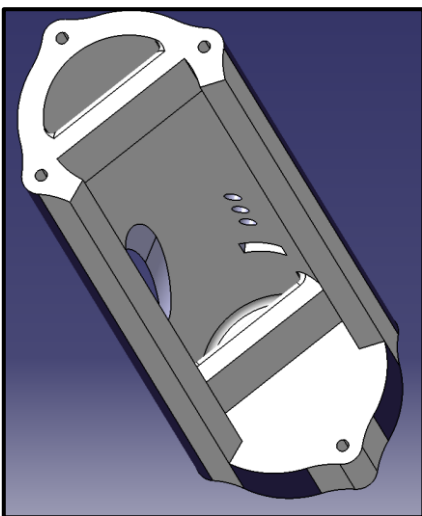
- Crochet :

Crochet fixé au servo-moteur permettant d'y assembler une tige servant de guide dans la trappe récupération.



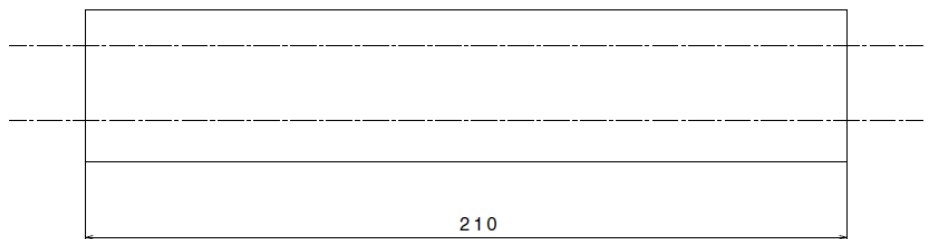
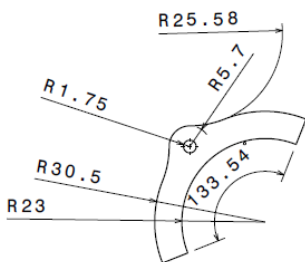
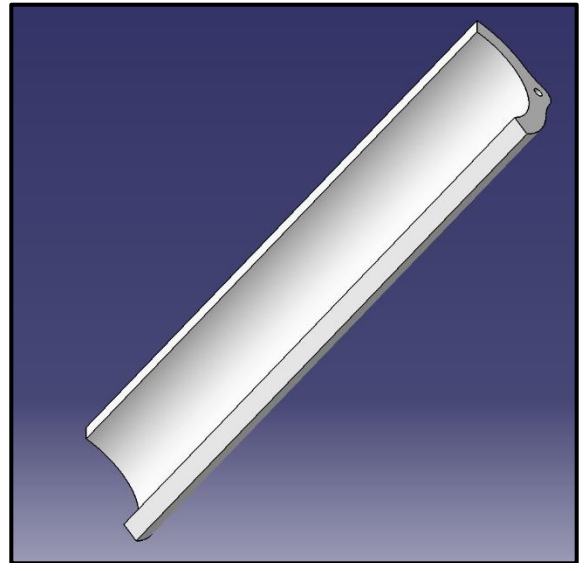
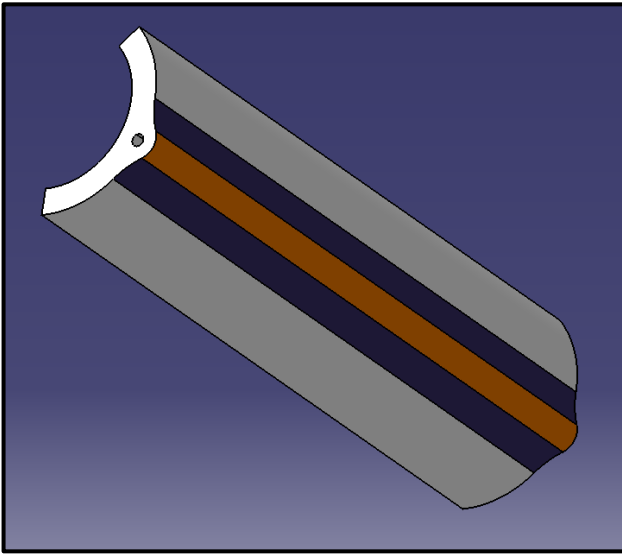
- Partie électronique :

Le module électronique est un second cylindre creux avec cette fois un sol, l'une des 4 tiges filetées doit être courte pour passer depuis le sommet de la pièce à l'encastrement au pied de la pièce et permettre en vol de tenir la trappe électronique (Il s'agit du deuxième morceau de la tige filetée découpée pour le module récupération). Deux butées ont été imprimées à l'intérieur de la pièce pour permettre d'y fixer ensuite les cartes électroniques. Pour finir plusieurs ouvertures ont été réalisées pour laisser passer le câble vers le servo sur le "sol" du module, les leds et interrupteurs sur le côté de la fusée.



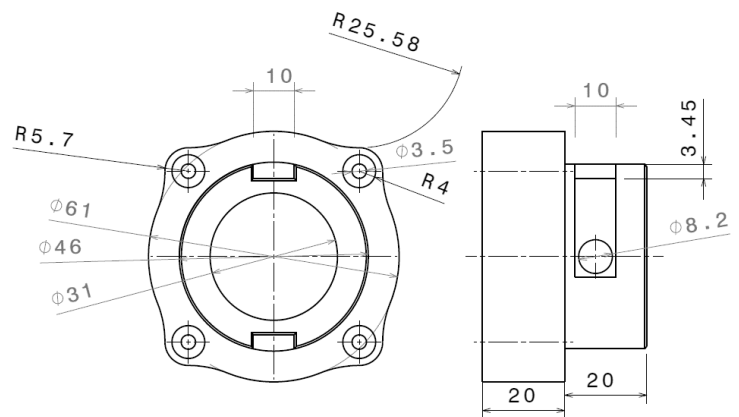
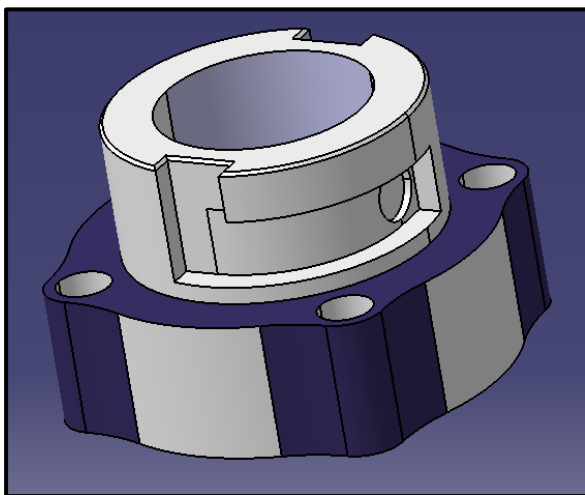
- Partie trappe électronique :

La trappe électronique est aussi une portion de fuselage, cependant un trou la parcourt pour venir y glisser la tige filetée permettant le maintien de celle-ci.



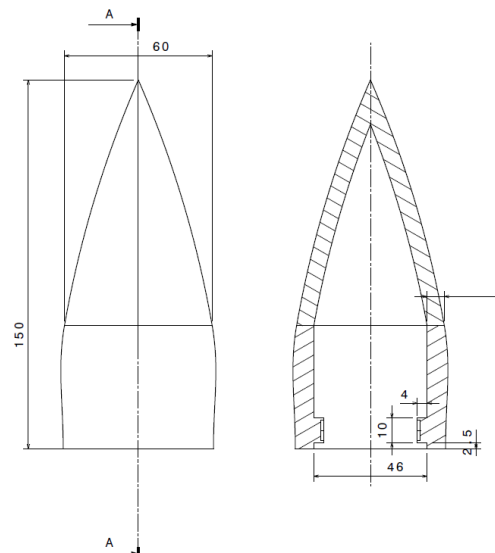
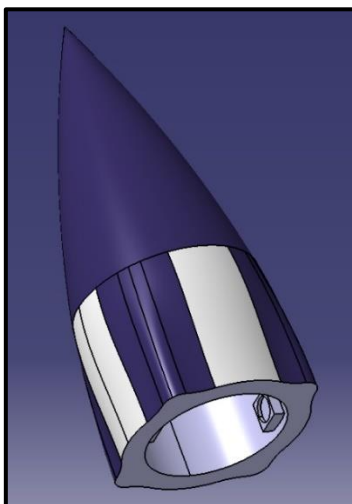
- Bague assemblage :

La bague assemblage se trouve entre le module électronique et la coiffe, il s'agit d'une portion découpée verticalement de la fusée, elle dispose de 4 trous où viennent se glisser et se terminer les tiges avec un élargissement final permettant d'y faire reposer les boulons qui de ce côté-là ont été soudés. Elle dispose aussi d'une partie cylindrique centrale dotée de deux buté rectangulaire et permettant de venir y visser la coiffe. Le sol présent au centre de cette partie cylindrique a été à l'origine prévu pour venir y intégrer une masse morte en cas de problème de stabilité.



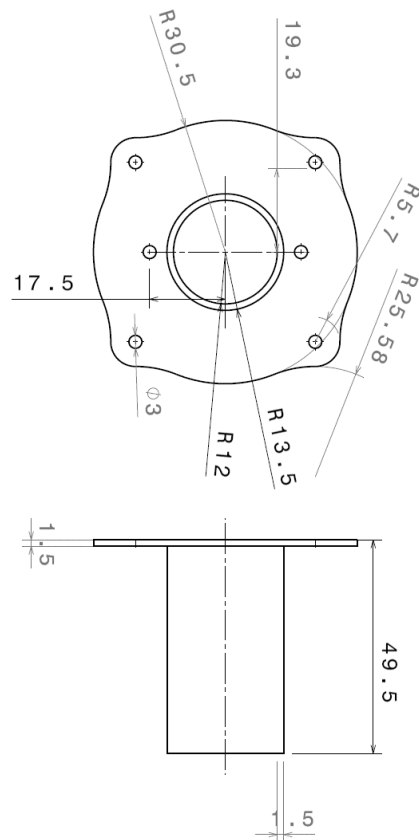
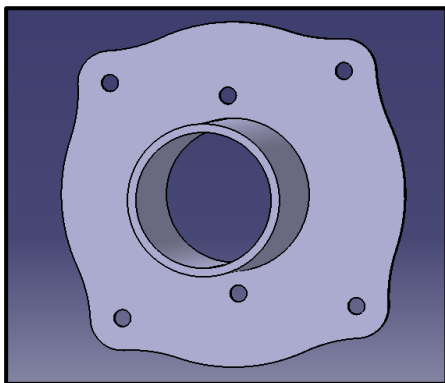
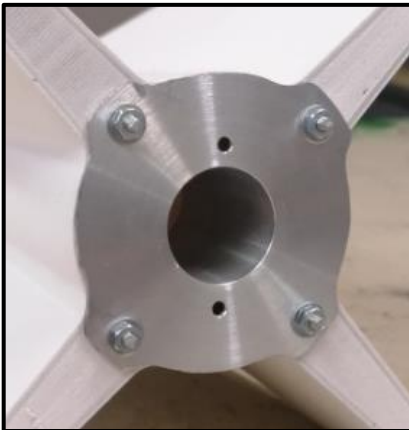
- Coiffe :

La coiffe est une forme complexe voyant d'abord une augmentation de diamètre permettant de passer de la forme complexe du reste de la fusée à une forme circulaire, puis elle se termine en pointe en suivant une trajectoire convexe. On peut retrouver les deux guides à l'intérieur de la coiffe permettant l'emboîtement avec la bague assemblage.



- Bague moteur :

La bague moteur est une pièce cylindrique d'aluminium venant se glisser en bas de la fusée dans la partie aileron et possédant quatre trous extérieurs pour laisser passer les tiges pour enfin serrer la fusée avec des boulons. Des trous supplémentaires ont été réalisés pour venir y fixer une languette d'aluminium permettant de tenir le moteur. Les arrondis ont été fait à la main pour venir épouser la forme de la fusée.



- Guide rail :

Les patins ont été imprimés puis vissés sur le corps de la fusée assemblée.

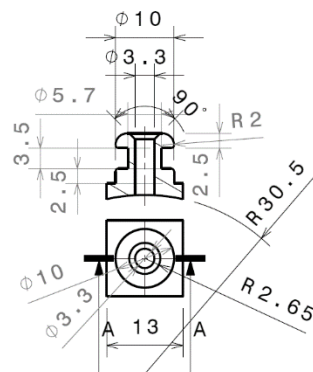
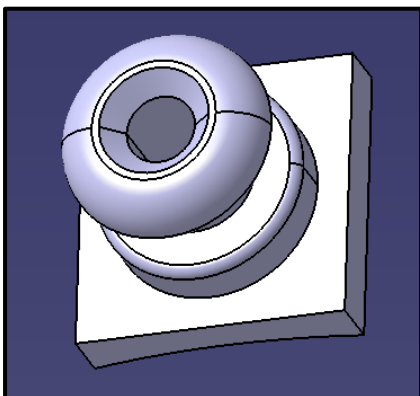
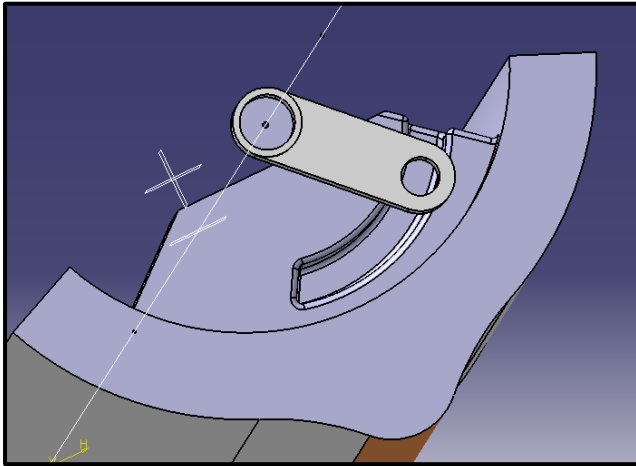


Illustration du mécanisme d'ouverture de trappe :



StabTraj :



STABILITO

Stabilité de fusée à ailerons

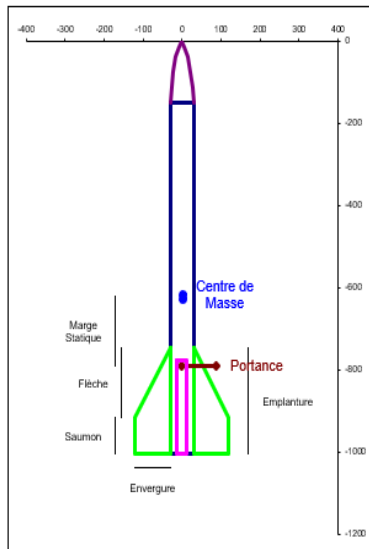
Remplir les cases jaunes

Fusée		
Nom	Astréos	
Club	ES	
Type	Minifusée	
Masse	1711 g	sans propu
Centre de Masse	602 mm	sans propu
Longueur totale	1005 mm	

Propulseur		
Type	Pandora (Pro24-6G BS)	
Position du bas	1005 mm	

Coiffe		
Forme	Ogivale (pointue)	
Hauteur	150 mm	
Diamètre	61 mm	

Ailerons		
Mono-empennage		
Emplanture 'm'	260 mm	
Saumon 'n'	90 mm	
Flèche 'p'	170 mm	
Envergure 'E'	90 mm	
Epaisseur 'ep'	12 mm	
Nombre	4	
Position du bas	1005 mm	



19/06/2021	Min	Résultats	Max
Finesse	10	16,5	20
Portance	15	21,6	21,6
Marge Stat.	1,5 D	2,68 D	2,86 D
Couple	30	57,9	61,8
XCp		790 mm	790 mm
MS /L		16% L	17% L

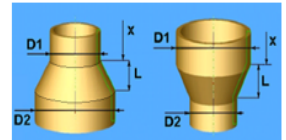
STABLE

Language/Langue Français

Fusée mono-diamètre,

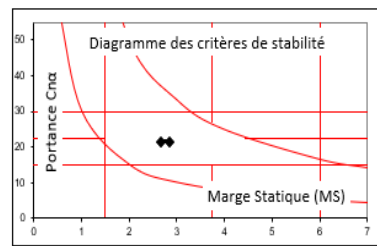
	Propu plein	Propu vide	Sans propu
Masse propu	0,16 kg	0,084 kg	-
CdM propu	114 mm	114 mm	-
Masse fusée	1,871 kg	1,795 kg	1,711 kg
CdM fusée	627 mm	616 mm	602 mm

	XCp	Cnα
Coiffe	70 mm	2,0
Ailerons	863 mm	19,6



Propulseur	
Haut	777 mm
Longueur	228 mm
Bas	1005 mm

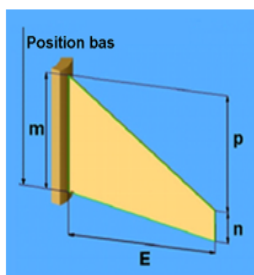
Ailerons bas	
Haut	745 mm
Emplanture	260 mm
Bas	1005 mm



Checksum : propu OK

v3.4.2

Commentaire libre :



Maintenant que votre fusée est stable, vérifiez sa trajectoire via la feuille [Trajecto](#)



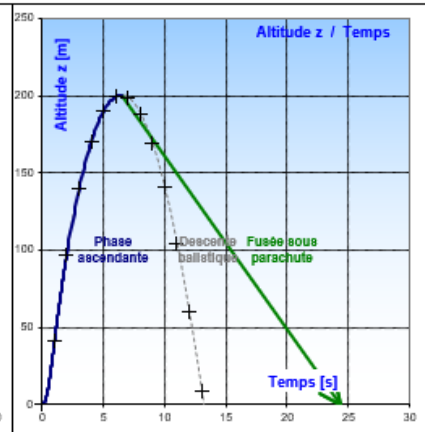
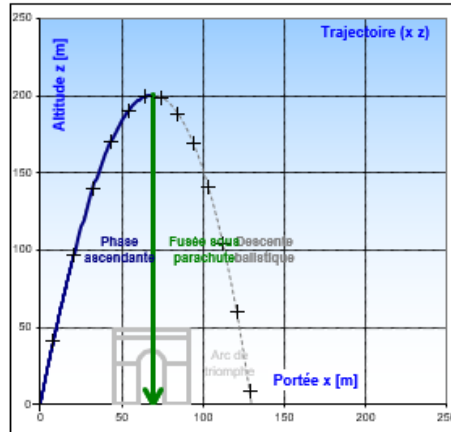
TRAJECTO

Trajectographie de fusée

Remplir les cases jaunes

Fusée	
Nom	Astréos
Club	ES
Masse totale	1,8709 kg
Propulseur	Pandora (Pro24-6G BS)
Trainée Aérodynamique	
Surface Réf.	0,007242 m ²
Cx	0,6
Rampe de Lancement	
Longueur	2,5 m
Élévation	80 °
Altitude	0 m

Descente Sous Parachute	
Fusée	0 satellite
Masse	1,7953 kg
Dépotage	N/A
Ouverture para	6,5 s
Surface para	0,23 m ²
Cx parachute	1
Vitesse du vent	5 m/s
Vitesse descente	11,2 m/s
Durée descente	18 s
Durée du vol	24 s
Déport latéral	± 89 m



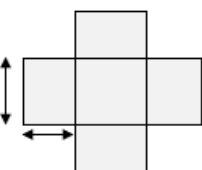
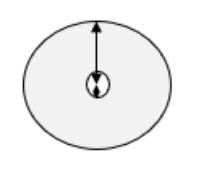
19/06/2021						
	Temps	Altitude z	Portée x	Vitesse	Accélération	Efforts
Sortie de Rampe				21,2 m/s		
Vit max & Acc max				65 m/s	119 m/s ²	
Culmination, Apogée	6,4 s	200 m	69 m	10 m/s		
Ouverture parachute fusée	6,5 s	200 m	70 m	10 m/s		14,5 N
Impact balistique	13,2 s	~0 m	130 m	55,1 m/s		2727 J

Pour localiser la fusée	
Couleur fuselage/coiffe	Brun/Orange...
Couleur parachute fusée	Rouge...

propu C
v3.4

Commentaire libre :

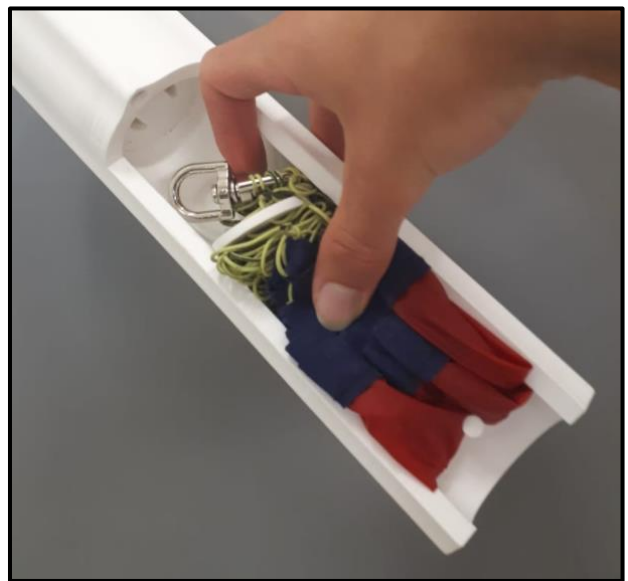
Calcul de la surface d'un parachute

Longueur du bord 249 mm	
Largeur du coté 199 mm	
Surface para 0,26 m ²	
Rayon extérieur 270 mm	
Rayon intérieur 15 mm	
Surface para 0,23 m ²	

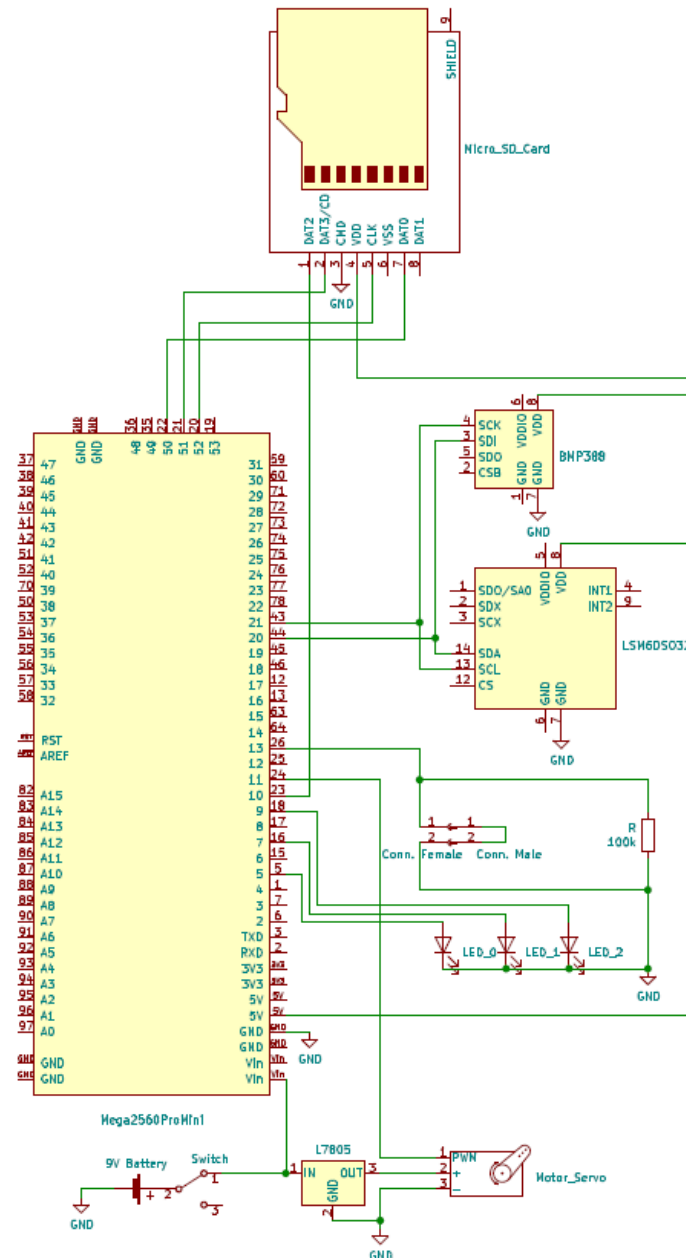
Résultats détaillés	Temps s	Altitude z m	Portée x m	Vitesse m/s	Accélération m/s ²	Angle °
Décollage	0	0	0	0	-	80
Sortie de Rampe	0,22	2,26	0,40	21,2	95,2	80,0
Vit max & Acc max	-	-	-	65	118,8	-
Fin de Propulsion	1,1	47	9	64	15,7	78,1
Culmination, Apogée	6,4	200	69	10	9,8	2,9
Impact balistique	13,2	~0	130	55	5,5	-82,3
Ouverture parachute fusée	6,5	200	70	10	9,8	-2,6
Impact fusée sous para.	24	~0	-20 159	11	9,8	-

Pliage du parachute :

Le parachute a été plié en accordéon pour permettre un déploiement efficace avec le minimum de risque d'emmêlement et une très bonne optimisation de l'espace qui était assez restreint dans notre cas.



III. Description électronique et informatique



L'ensemble des données des capteurs installés dans le corps de la fusée a été enregistré dans un fichier .csv et sauvegardé sur une carte SD. Le traitement des données a été réalisé sous Python, avec les bibliothèques Numpy et Pandas.

Les composants retenus sont :

Une carte Arduino Mega 2560 pro mini, un module de carte micro sd, un capteur de pression (BMP388), un accéléromètre (LSM6DSO32), un servo moteur, un convertisseur de tension 5v (L7805) et trois leds.

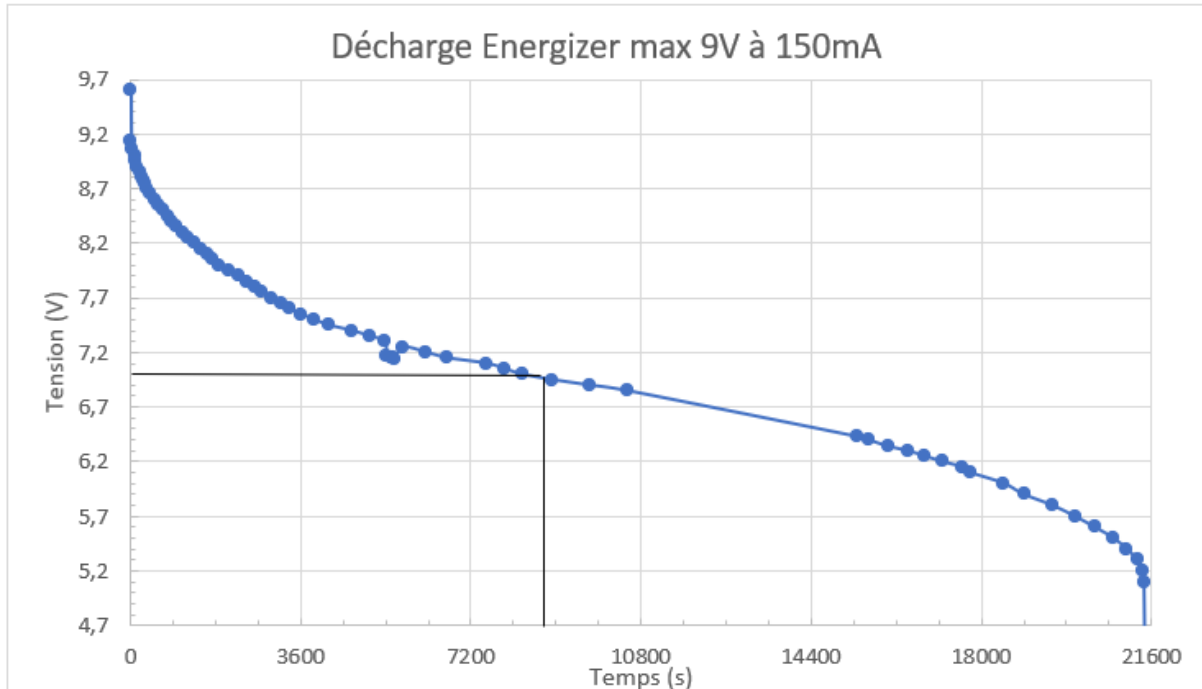
Un simple Arduino nano ne suffisait pas car les bibliothèques utiles au fonctionnement de la carte SD et ces capteurs prenaient trop de place en mémoire, provoquant des problèmes d'instabilité de la carte.

Les capteurs communiquent en I2C avec le microcontrôleur et la carte SD en SPI.

Le système est alimenté avec une pile alcaline 9v classique très avantageuse de par son prix, sa petite taille et son autonomie suffisante.

Autonomie :

Pour délivrer une tension de 5v le convertisseur de tension nécessite une tension supérieure à 7v en entrée. Pour obtenir l'autonomie il a fallu alors déterminer dans le pire cas le temps pour lequel la tension devenait inférieure à 7v :



L'autonomie est d'environ 2h30, largement suffisant et respectant le cahier des charges.



IV. Expériences

À travers notre projet nous avons eu deux expériences en parallèle.

Une première étant l'utilisation de l'impression 3D, l'objectif étant d'imaginer et de concevoir un maximum de pièces en impression 3D. Nous avons eu plusieurs études à réaliser.

Tout d'abord le choix du matériau d'impression, ce dernier doit être assez résistant pour résister aux chocs de l'atterrissage mais il doit aussi être léger et peu coûteux. Le PLA nous a semblé être le meilleur compromis.

Le remplissage a aussi été étudié, nous sommes partis sur un remplissage de 30% qui est assez élevé permettant une très bonne résistance à l'effort. Cette méthode de conception nous a permis une très grande liberté dans la forme structurelle de la minif. Elle nous impose toutefois une très bonne optimisation de la répartition des efforts car le PLA est moins rigide et résistant que l'aluminium ou l'acier.

La seconde est une expérience installée à l'intérieur de la mini fusée ayant pour objectif principal d'effectuer des relevés de mesures de la dynamique de vol de l'engin, et d'exploiter ces données pour permettre le déploiement optimal du parachute, que nous avons défini à l'apogée de la trajectoire de la fusée.

Si nous avions le temps pour développer la théorie et les calculs nécessaires, l'objectif était d'utiliser les mesures effectuées pour réaliser une trajectographie 3D du vol complet de la fusée.

V. Déroulement du vol :

Chronologie choisie :

Chronologie Astreos

Afin de garantir le bon déroulement de l'opération de lancement, une chronologie est établie, de la préparation du lancement sous la tente, à l'atterrissage. Pour chaque étape, il faut définir la date à laquelle l'opération doit être effectuée, où, par qui et avec quel outil.

Quand	Quoi	Qui	Où	Avec Quoi
H-40min	Test Ouverture	Tous	Tente Minif	cable
H-35min	Changement Pile	François	Tente Minif	Pile Neuve
H-35min	Pliage parachute	Louis et Arslene	Tente Minif	Astreos
H-30min	Test bon fonctionnement de la pile+fusée off	François	Tente Minif	Astreos
H-25min	Remontage	Tous	Tente Minif	Caisse à outil
H-15min	Mise en place du cable	François	Tente Minif	cable
H-10min	Installation fusée sur Rampe	Louis et Arslene	Rampe de Lancement	Astréos
H-5min	Mise sous tension du système électronique	François	Rampe de Lancement	Astréos
H-2min	Fixation moteur	Pyrotechnicien	Rampe de Lancement	
H-10s	Décompte final	Tous	Tente de lancement	
H+0s	Allumage du moteur à distance	Louis	Tente de lancement	

Le vol a été nominal et réalisé le matin du 16/07 sans problème technique apparent.

Conditions climatiques :

Ciel bleu parsemé de quelques nuages, une température de 23°C avec une légère brise d'été ne dérangeant en aucun cas le déroulement du vol.



VI. Résultats

Niveau structurel pour l'expérience impression 3D nous sommes très satisfaits des résultats. La résistance de la fusée est très élevée pour un poids de 1,87Kg, elle a résisté avec succès au choc de l'atterrissage avec une éjection et une ouverture de parachute attendu. Le pliage de ce dernier, en accordéon, été le bon choix ainsi que le système d'éjection avec servo-moteur.

L'expérience installée à l'intérieur de la mini fusée avait pour objectif principal d'effectuer des relevés de mesures de la dynamique de vol de l'engin, et d'exploiter ces données pour permettre le déploiement optimal du parachute, que nous avons défini à l'apogée de la trajectoire de la fusée.

Dans un second temps, si nous avions le temps pour développer la théorie et les calculs nécessaires, l'objectif était d'utiliser les mesures effectuées pour réaliser une trajectographie 3D du vol complet de la fusée.

L'ensemble des données des capteurs installés dans le corps de la fusée a été enregistré dans un fichier .csv et sauvegardé sur une carte SD. Le traitement des données décrit ci-dessous a été réalisé sous Python, avec les bibliothèques Numpy et Pandas.

La première étape du traitement des résultats est la conversion du fichier .csv dans un format de lecture plus adapté, en l'occurrence un tableau de données. Cette étape permet de consulter les valeurs obtenues et de s'assurer que les données ont été correctement relevées. Pour le vol d'Astréos, il n'y a eu aucun souci dans l'enregistrement des mesures.

	Temps	Phase	Altitude	Ax	Ay	Az	Gx	Gy	Gz
0	0.000	1.0	425.60	2.13	2.25	104.60	0.10	-0.00	0.40
1	0.043	1.0	425.60	0.66	0.89	102.14	0.04	0.01	0.65
2	0.078	1.0	425.81	-5.27	-3.39	100.73	-0.25	0.09	1.17
3	0.110	1.0	425.81	6.71	2.07	97.08	0.01	0.05	1.80
4	0.141	1.0	426.20	0.09	-1.00	96.41	0.03	-0.06	0.79

Ayant enregistré dans notre fichier de relevés les différentes phases de vol décrites dans notre programme Arduino, nous pouvons distinguer les relevés correspondant aux différentes étapes de vol.

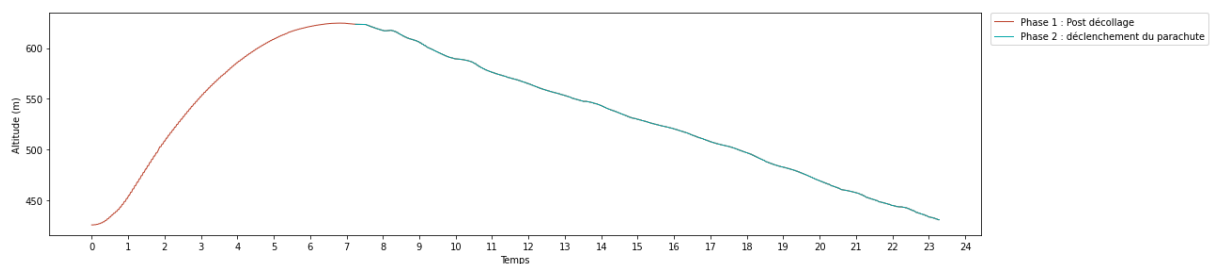
On réalise alors une première série de graphes contenant les données brutes relevées tout au long du vol, présentée sur la page ci-après.



On peut alors faire une première analyse des données recueillies :

- La mesure d'altitude par l'altimètre semble valide tout au long de la phase de vol : on constate que l'intervalle de temps séparant le décollage de la mini-fusée et l'apogée de sa trajectoire est inférieur à l'intervalle correspondant à la phase descendante, après ouverture du parachute.

Aussi, l'écart entre l'altitude mesurée sur la rampe de lancement et l'altitude mesurée au moment de l'impact était de l'ordre du mètre. Cet écart semble convenable du fait de la topographie du terrain.



Evolution temporelle de l'altitude mesurés par l'altimètre

- Le déclenchement du parachute s'est effectué moins de 5 dixièmes de seconde après que la fusée atteigne l'apogée. La condition de déploiement du parachute dans notre programme Arduino était la détection d'une perte d'altitude d'un mètre par rapport à l'apogée mesurée. L'écart temporel entre l'instant où cette condition a été remplie et l'instant où l'ouverture de la trappe du compartiment parachute s'est déclenché est de 300 ms. Nous pouvons valider le choix de cette condition de déploiement du parachute.

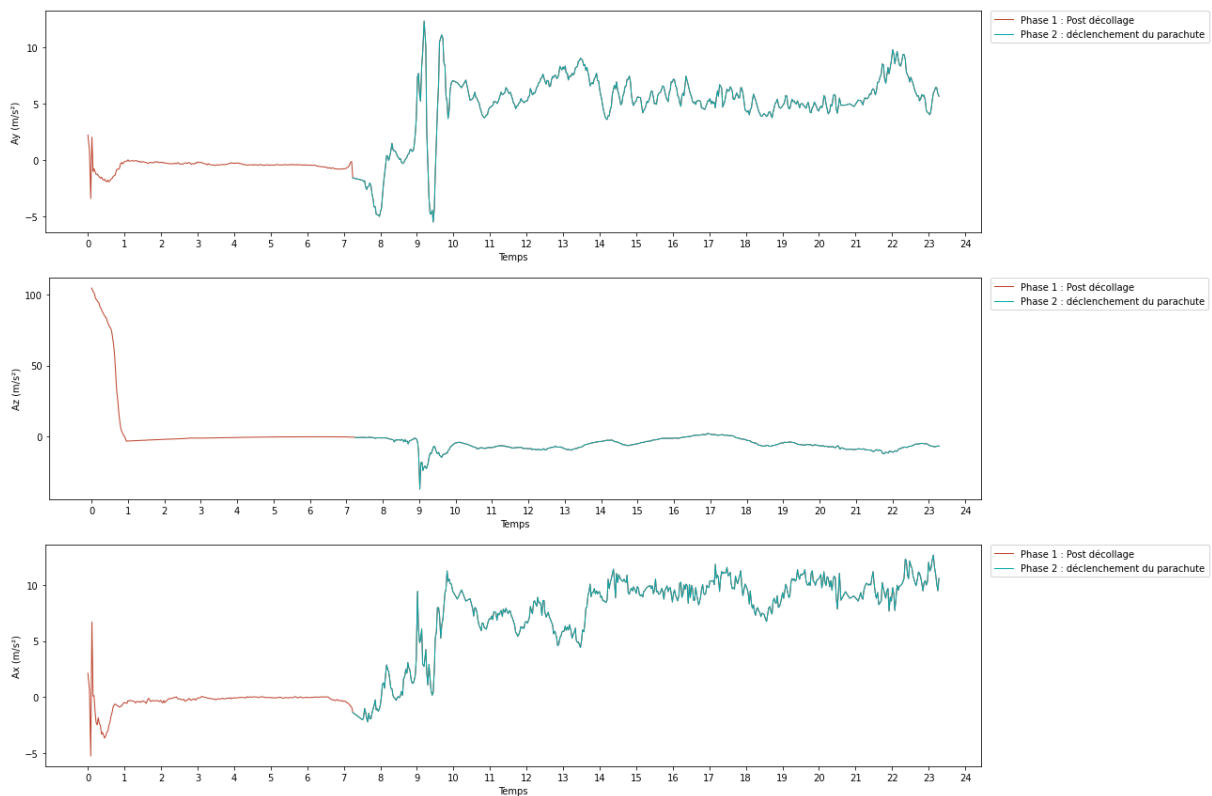
	Temps	Phase	Altitude (m)
230	6.761	1.0	624.63
231	6.787	1.0	624.63
232	6.819	1.0	624.65
233	6.845	1.0	624.65
234	6.880	1.0	624.57
235	6.906	1.0	624.57
236	6.938	1.0	624.54
237	6.963	1.0	624.54
238	6.995	1.0	624.33
239	7.022	1.0	624.33
240	7.053	1.0	624.11
241	7.079	1.0	624.11
242	7.111	1.0	623.93
243	7.136	1.0	623.93
244	7.188	1.0	623.68
245	7.215	1.0	623.68
246	7.247	2.0	623.51
247	7.512	2.0	623.29
248	7.538	2.0	623.29
249	7.569	2.0	622.53

Altitude mesurée dans le titre de la figure



- Les relevés effectués selon les trois axes de l'accéléromètre semblent cohérents, en particulier selon l'axe ascendant z, correspondant à l'axe de la fusée. En étudiant le graphique de l'accélération selon l'axe de la fusée, on discerne aisément que la première seconde du vol correspond à la phase de propulsion de la fusée.

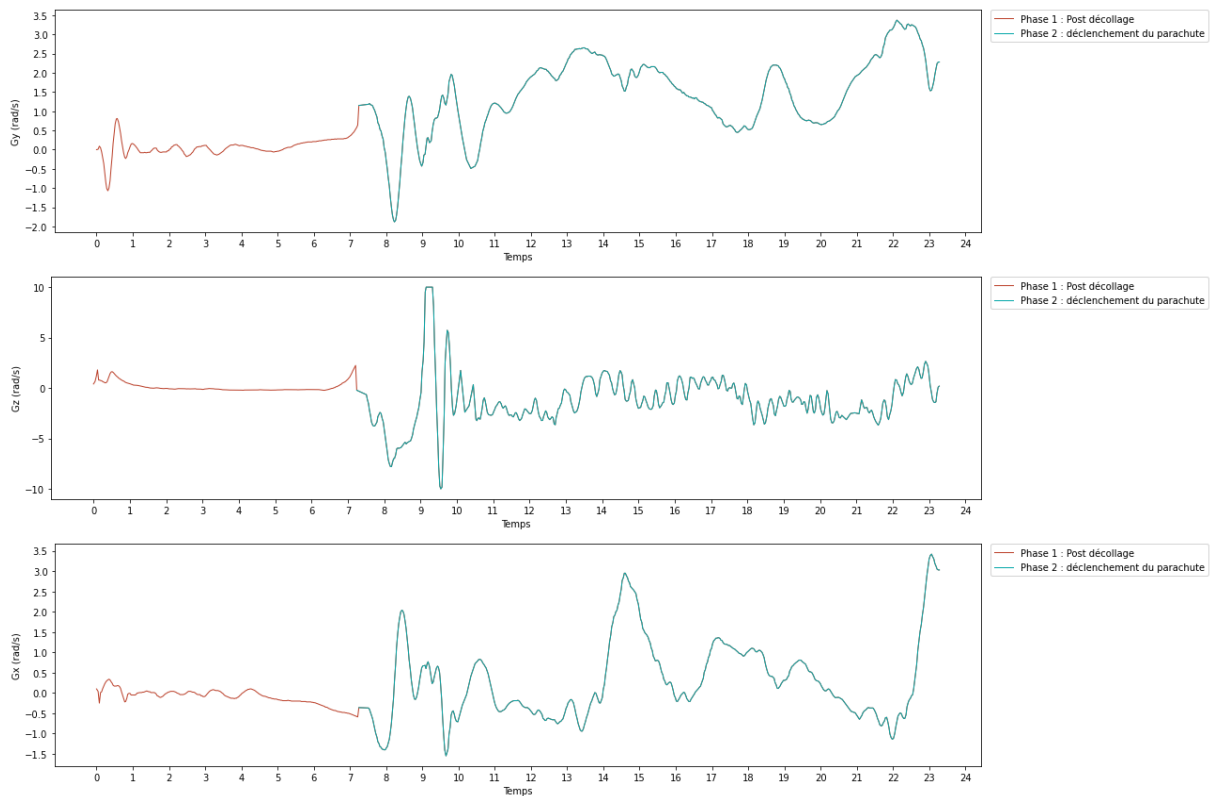
Aussi, les accélérations latérales sont quasi-nulles durant la phase ascendante du vol, hors phase propulsée où un important bruit s'ajoute aux valeurs mesurées. Ces mesures sont en accord avec les observations effectuées par les étudiants présents le jour du lancement, où le déplacement de la fusée était uniquement vertical lors de cette première partie de vol.



Evolution temporelle des accélérations relevées selon les trois axes de l'accéléromètre



- Les relevés de vitesses angulaires effectués par le gyroscope sont également cohérents sur la phase ascendante du vol. La fusée a conservé son orientation verticale et n'est pas entrée en rotation propre.

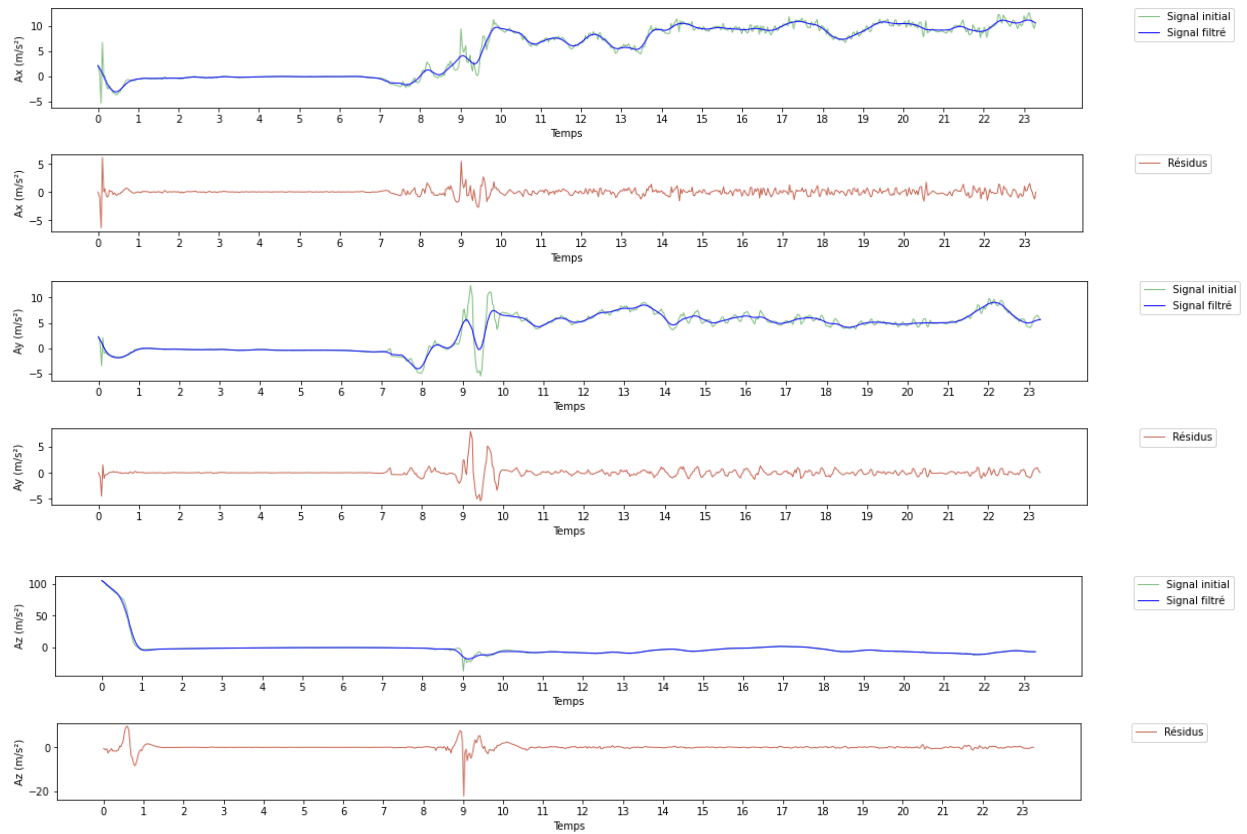


Evolution temporelle des vitesses angulaires relevées selon les trois axes du gyroscope

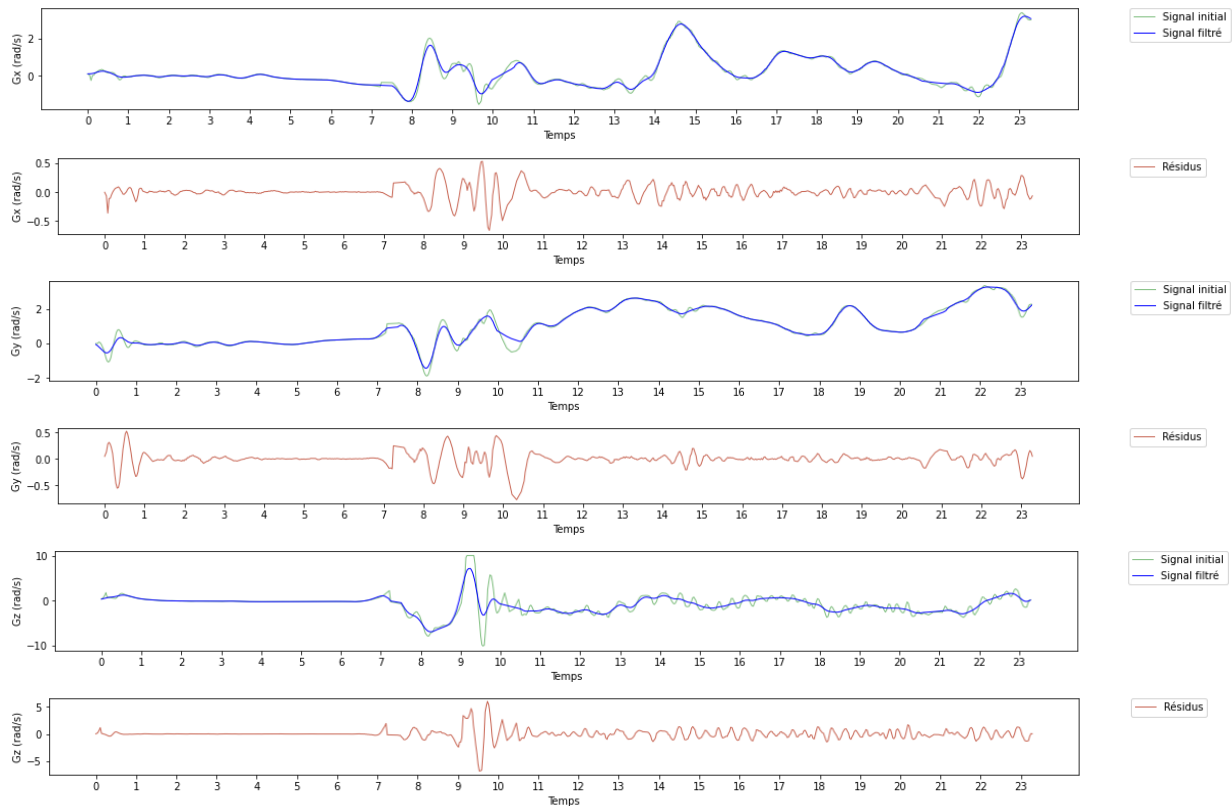
Cependant, on constate la présence de bruit sur les relevés de mesures de l'accéléromètre et du gyroscope lors de la phase descendante du vol de la fusée. Afin d'effectuer la trajectographie de la fusée, il faut donc au préalable filtrer les résultats issus de ces capteurs. Pour cela, nous avons utilisé un filtre de Butterworth, ce dernier étant déjà implémenté dans une librairie Python.



Les graphes des données filtrées sont représentés ci-dessous :



Graphes des mesures filtrés des accélérations relevées selon les trois axes de l'accéléromètre, avec les résidus associés



Graphes des mesures filtrés des vitesses angulaires relevées selon les trois axes du gyroscope, avec les résidus associés

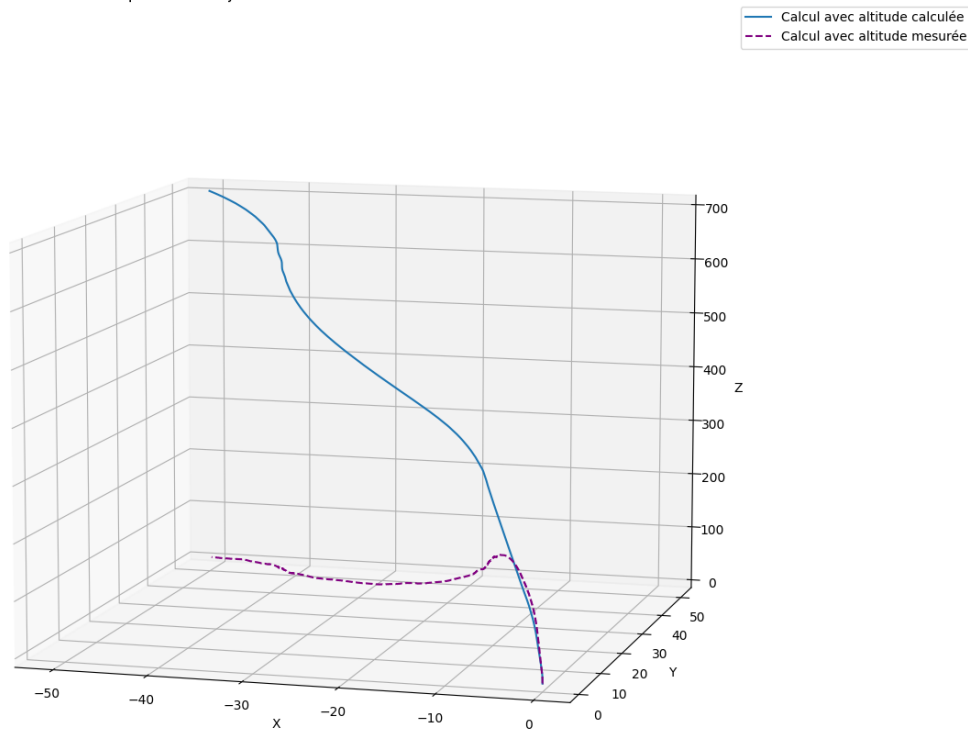
Pour réaliser la trajetographie de la fusée, les différentes recherches que nous avons pu effectuer nous ont orienté sur l'utilisation des matrices de rotation. Une description du raisonnement et du schéma de fonctionnement du programme réalisé est décrite ci-dessous :

- On définit un vecteur unitaire représentant la fusée et dans un repère orthonormé représentant le repère terrestre. Ce vecteur est initialement positionné du repère au point de coordonnées (0,0,0), et est orienté positivement selon l'axe z représentatif de l'altitude.
- Pour chaque ensemble de mesures effectuées à un instant t :
 - On convertit les vitesses angulaires mesurées en une matrice de rotation
 - On oriente le vecteur fusée dans le repère d'après cette rotation
 - Les composantes de l'accélération étant définies dans repère mobile liée à la fusée, on les projette les composantes dans le repère terrestre
 - On intègre doublement chaque composante de l'accélération afin d'obtenir successivement les composantes de la vitesse et les coordonnées de la fusée dans le repère terrestre à un instant t .



Après application de notre programme de traitement, et en réalisant un graphique en trois dimensions de l'ensemble des positions calculées, la trajectoire de la fusée obtenue est la suivante :

Comparatif de trajectoire entre altitude mesurée et altitude calculée

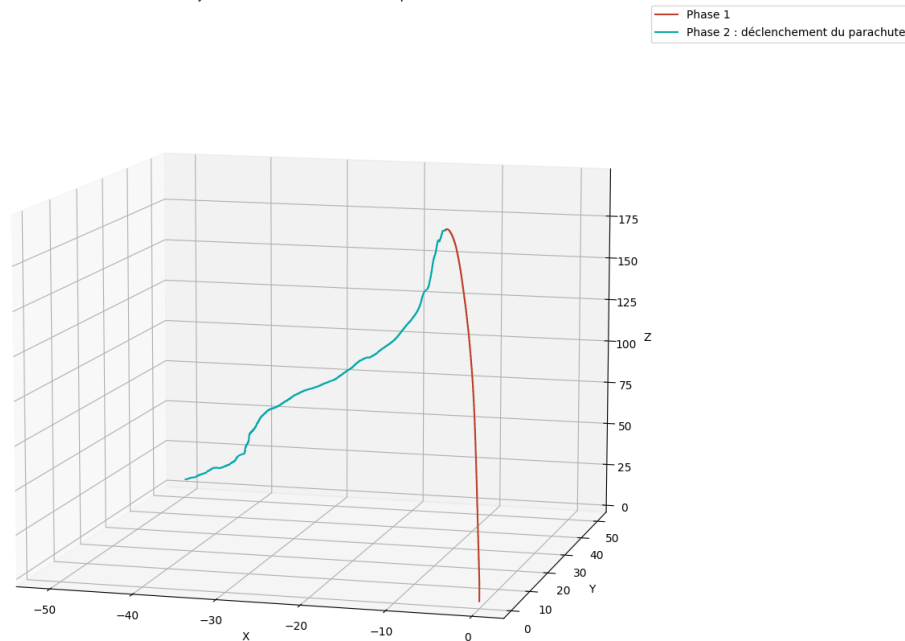


On constate que cette trajectoire est erronée puisque les valeurs de position divergent selon l'axe z . Notre modèle n'est donc pas adapté, ou à minima insuffisant pour réaliser une trajectographie de ce vol.

Lorsque l'on corrige l'altitude calculée en utilisant les valeurs d'altitude relevées par l'altimètre, on constate que la trajectoire calculée semble cohérente avec la trajectoire réelle de la fusée, sur la phase ascendante du vol. Cependant, dès lors que la fusée n'est plus orientée verticalement, le tracé de la trajectoire n'est plus en accord avec la trajectoire réelle de la fusée : les valeurs de déplacement latéral se mettent à diverger.



Trajectoire de la mini-fusée avec phases



Pour renforcer les informations sur l'orientation de la fusée, une piste d'amélioration est l'utilisation d'un magnétomètre. En ayant un repère spatial défini par l'orientation du champ magnétique terrestre, ces données pourraient permettre de corriger l'orientation calculée d'après les vitesses angulaires. De même, pour consolider les valeurs de déplacement latéral, l'utilisation d'un GPS peut être vraisemblablement envisagée.

De même, pour pallier ces erreurs de mesure et de calcul, la modélisation de la rotation par des quaternions s'avère plus efficace que les matrices de rotations. De même, l'emploi d'un filtre étendu de Kalman sera certainement une étape nécessaire dans la réalisation d'un calcul de trajectoire. Ce filtre permet d'estimer les erreurs sur les paramètres d'un système dynamique à partir d'une série de mesures incomplètes et bruitées, en calculant les corrections à appliquer. Ces deux éléments sont couramment utilisés dans les travaux que nous avons consultés pour la réalisation de notre projet, mais leur fonctionnement a été trop complexe à adapter, dû à un manque de temps.



Aussi, on peut critiquer les hypothèses simplificatrices faites, comme l'absence de prise en compte des efforts extérieurs s'appliquant sur la fusée : effets du vent, efforts exercés par le parachute.

Ces pistes d'améliorations sont autant d'idées pour la mise en place d'une expérience plus poussée de simulation de vol, potentiellement réalisable lors de la création d'une future Fusée.

Malgré le fait de ne pas avoir réussi à aboutir à la réalisation d'une trajectographie du vol de notre fusée, nous sommes malgré tout satisfaits d'avoir pu comprendre le fonctionnement des différents capteurs, et d'avoir réussi à détecter le point optimal de déclenchement du parachute.

VII. Conclusion

Ainsi, Astréos a su remplir le cahier des charges malgré la contrainte de l'impression 3D et accomplir les mesures attendues, tout en assurant une ouverture automatique du parachute. Ces résultats sont satisfaisants et encourageants pour l'équipe qui a su accomplir cette tâche en une année de covid. Il semble important de souligner que c'est la motivation de l'équipe et sa capacité à rester soudée qui a permis à Astréos de voir le jour, c'est cette bonne ambiance de travail dans un domaine qui passionne les étudiants le véritable moteur créatif de l'équipe, du club et de manière plus générale de l'école.

La courbe de trajectoire obtenue avec les capteurs, le déclenchement du parachute par mesure de perte d'altitude et les finitions propres permises par une conception quasi irréprochable et l'impression 3D sont autant de sources de fierté pour l'équipe. Il en va de même pour le parachute qui a su tirer profit du peu de place lui étant réservé. C'est donc surtout dans les domaines de l'électronique, la gestion des capteurs et de la carte sd, ou encore la conception CAO sur catia, l'usinage et l'utilisation d'une imprimante 3D que les membres du projet ont pu s'améliorer et apprendre. D'autant plus que la conception était déjà quasiment achevée lorsque les premiers cours de CAO ont eu lieu à l'école, les élèves ont donc pris de l'avance sur le programme scolaire pour permettre à leur fusée d'être prête au lancement en juillet.

Mais la source de fierté la plus importante pour l'équipe est sans aucun doute l'organisation qui a permis d'avancer malgré l'absence de réunion en présentielle à l'aide d'une réunion générale tous les vendredis et de réunions d'équipe hebdomadaires.

Pour nos prochains projets, si l'utilisation de l'impression 3D est nécessaire, il serait intéressant de réduire un peu l'épaisseur des parois de la fusée, en effet Astréos était très résistante, peut-être même un peu trop, ainsi cela pourra permettre d'atteindre une apogée plus haute par exemple en réduisant le poids.

Pour l'année prochaine, plusieurs idées d'expériences ont déjà émergé, par exemple la réalisation d'une fusée entièrement mécanique, sans présence d'électronique, et dont l'ouverture de la trappe serait déclenchée par un minuteur mécanique déclenché non pas par une prise jack mais par une goupille mécanique. D'autres personnes ont pensé à la réalisation d'une fusée utilisant l'effet Doppler pour mesurer sa vitesse en vol. Mais ces idées doivent encore mûrir avec la rentrée des classes pour permettre un projet ambitieux mais réalisable.

Nous tenions à remercier GOTRONICS pour son partenariat de longue date avec notre club l'ENSMA SPACE PROJECT, qui nous permet d'acquérir du matériel électronique à coût réduit. Nous tenions aussi à remercier Mme CHOCINSKI pour avoir encadré les projets étudiants du club cette année encore.



Equipe chargée du lancement au C'Space

