

Dossier post-vol FX26

AJACS

I. Généralités

AJACS est un projet de fusée expérimentale conçue intégralement par les étudiants du Pôle Espace du CACS, le Cercle Aéronautique de CentraleSupélec. Ce projet s'inscrit dans le cadre de la campagne de lancement C'Space organisée par Planète Sciences et le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales).

AJACS est un projet né l'année dernière (année scolaire 2020-2021) : ce projet est ainsi en cours depuis deux ans, avec des avancées significatives durant l'année scolaire 2021-2022. Les étudiants ont peu d'expérience dans ce domaine et se forment par l'intermédiaire de l'atelier de l'école (La Fabrique) et l'expérimentation. Ce projet demande 4 heures de travail par semaine (le jeudi après-midi), suivi d'une réunion d'avancement pour faire le point sur ce qui a été fait, ce qui n'a pas été fait et ce qu'il reste à faire.

Le projet AJACS est découpé en trois équipes :

- ✓ Une équipe **Mécanique** responsable de la conception du tube (enveloppe extérieur de la fusée), étude de stabilité de la fusée, étude de la trajectoire de la fusée en vol, réalisation de tous les plans SolidWorks de la fusée, conception et réalisation du parachute,
- ✓ Une équipe **Electronique** responsable du circuit de commande d'ouverture de la trappe parachute, du circuit expérience (accéléromètre, GPS, capteurs pression-température ...), de la communication fusée-sol au cours du vol, ainsi que de l'alimentation en électricité des systèmes embarqués,
- ✓ Une équipe **Mécanique/Electronique** responsable de l'intégration des systèmes électroniques, de récupération et de communication à l'intérieur de la fusée (structure interne de la fusée).

Nous sommes enfin 13 membres passionnés par l'espace et la conception de fusées.

✓ **Fondateur et responsable**



Paul-Emile GIACOMELLI, fondateur du projet
(ancien responsable du projet, année scolaire 2020-2021)

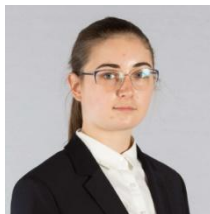


Thomas BOQUET, responsable du projet actuel

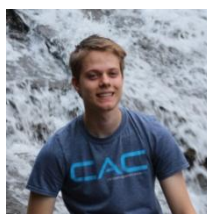
✓ **Equipe Mécanique**



Elio DARRICARRERE
Responsable Mécanique



Claire HELLEISEN



Clément DAVID



Harry GILLINGHAM



Thomas BOQUET

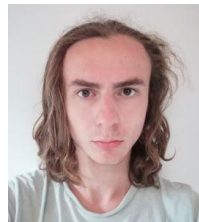
✓ **Equipe Electronique**



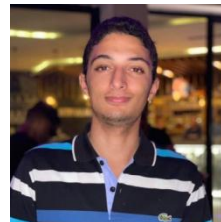
Paul DE LA SAYETTE
Responsable Electronique



Clément POUILLY



Melvin MATHE

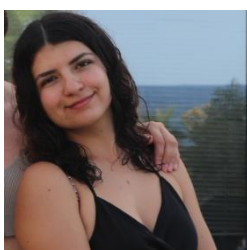


Yecine KTARI



Stephen PAULET

✓ **Equipe Mécanique / Electronique**



Luisa MAZZONZELLI
Responsable Méca/Elec



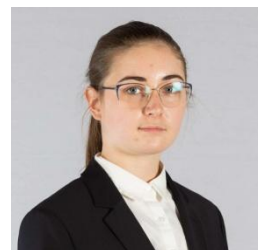
Paul-Emile GIACOMELLI



Pierre Basin



Thomas BOQUET



Claire HELLEISEN

AJACS est avant tout l'occasion pour les membres du Pôle Espace de CentraleSupélec de **se former** aux savoir-faire, connaissances et méthodes de fabrication dans le domaine des fusées expérimentales. Ensuite, le projet étant jeune, notre objectif principal reste le lancement à proprement parler : concevoir et construire une fusée expérimentale dont le lancement s'effectue dans de bonnes conditions (trajectoire et stabilité nominales, ouverture de la trappe parachute, redescente sous parachute et récupération de la fusée). En conséquence, l'expérience proposée pour cette fusée est relativement simple : **établir un modèle de pression-température de l'atmosphère** (sur une distance de 2kms environ). Il

serait illusoire de se lancer dès le premier lancement dans une expérience complexe alors que nous n'avons aucune certitude sur la fiabilité de notre fusée. Cependant, l'équipe d'électronique a décidé de réaliser une deuxième expérience en parallèle : **reconstruire la trajectoire à partir des données d'accélération et obtenir la position en temps réel de la fusée**. Les données seront acquises via un module GPS et deux centrales inertielles, traitées au cours du vol et transmises au sol par télémétrie (module LoRa). Ces données seront également sauvegardées à bord de la fusée sur une carte SD. Nous pourrons alors ensuite comparer la position d'impact réelle de la fusée avec celle calculée, ainsi que les données du GPS avec la trajectoire reconstruite avec les accéléromètres. Ainsi, nous étudierons l'efficacité des calculs effectués à bord de la fusée, la précision associée à la calibration des appareils ...

Ces deux expériences nécessitent l'utilisation d'une fusée expérimentale pour deux raisons : l'altitude importante atteinte par la fusée (2km d'après StabTraj) et les conditions très particulières qu'impose la fusée, rendant ainsi le calcul de sa position en temps réel à partir des centrales inertielles particulièrement formateur.

Les données acquises seront enfin analysées au cours du lancement (notamment pour obtenir la position d'impact de la fusée en vue de sa récupération) et après le vol. Nous établirons alors le tracé des courbes de pression et température en fonction de l'altitude, que nous comparerons avec les modèles théoriques. La courbe de trajectoire de la fusée sera également réalisée. Toutes nos analyses et conclusions sont détaillées dans ce rapport post-vol.

IV. La réalisation mécanique de la fusée

La fusée AJACS est une fusée expérimentale mesurant 1m60 de haut, ayant un diamètre intérieur de 96mm et un diamètre extérieur de 100mm. Elle est composée d'un tube, formant le corps de la fusée, d'une coiffe, de 4 ailerons et d'une structure interne permettant de contenir le moteur, le parachute ainsi que l'électronique.

La première étape de conception fut la réalisation du modèle SolidWorks de la fusée.



Figure n°2 : Modèle SW de la fusée

Cette étape de conception sur ordinateur terminée, nous nous sommes attaqués à la construction de la fusée. Détaillons-en chaque élément.

A. Le tube

Le tube initial était en PVC. Cependant, nous étions peu satisfaits des propriétés mécaniques de celui-ci. Par conséquent, nous avons décidé courant mars 2022 de nous lancer dans la conception de notre premier tube en fibre de carbone. Après plusieurs tentatives et avec l'aide d'ingénieurs matériaux composites à Dassault Aviation, nous avons réussi à obtenir un tube propre.



Figure n°3 : Tube en carbone

Deux demi-coques ont été réalisées. Nous les avons recollées au moyen de deux plis de carbone (interne et externe). Le tout fut poncé pour obtenir un état de surface lisse. Une

couche supplémentaire de résine fut appliquée afin de gommer toutes les aspérités du tube. La fusée est enfin passée en peinture pour être vernie.

Le tube réalisé a une importante flèche statique (très proche de la tolérance). Il n'y a pas de flèche dynamique. Il n'est de plus pas parfaitement rond (les deux demi-coques se sont « refermées » lors du séchage). Nous retravaillerons l'année prochaine sur ces deux points.



Figure n°4 : Tube final peint

B. La coiffe

La coiffe a été imprimée en 3D en ABS à partir du modèle SolidWorks. Celle-ci n'était tenue que par une seule vis sur quatre lors de la récupération de la fusée. Nous ne savons pas si les ruptures au niveau des vis de fixation ont eu lieu pendant le vol ou lors du choc à l'atterrissage.

C. Les ailerons

Les ailerons sont au nombre de 4. Ils ont été découpés dans des plaques d'aluminium de 3mm d'épaisseur, et sont fixés aux bagues d'aluminium (voir partie D.) grâce à 16

équerres en acier que nous avons faites sur mesure. A l'issue du vol, seul un aileron fut tordu au niveau des équerres de fixation, probablement dû au choc lors de l'atterrissage.

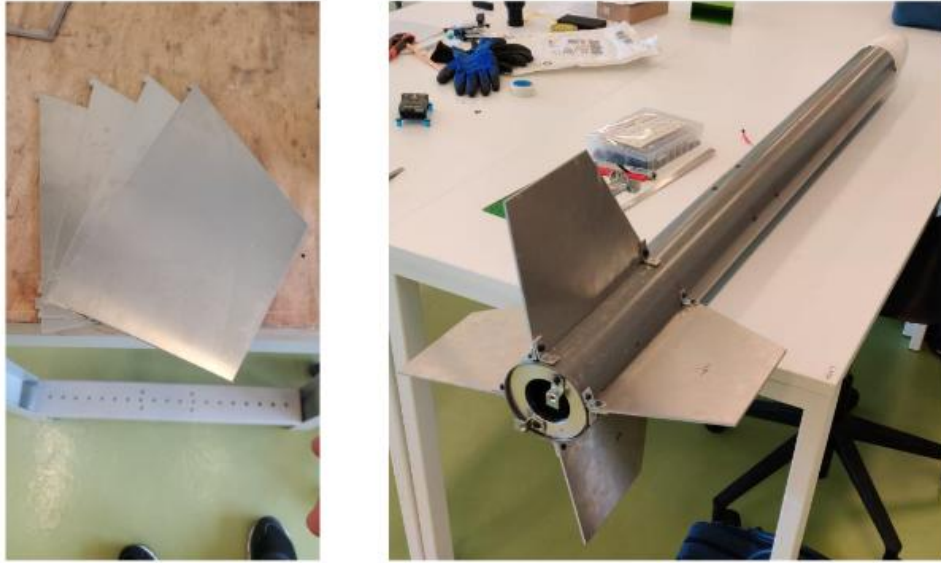


Figure n°5 : Ailerons

D. Structure interne

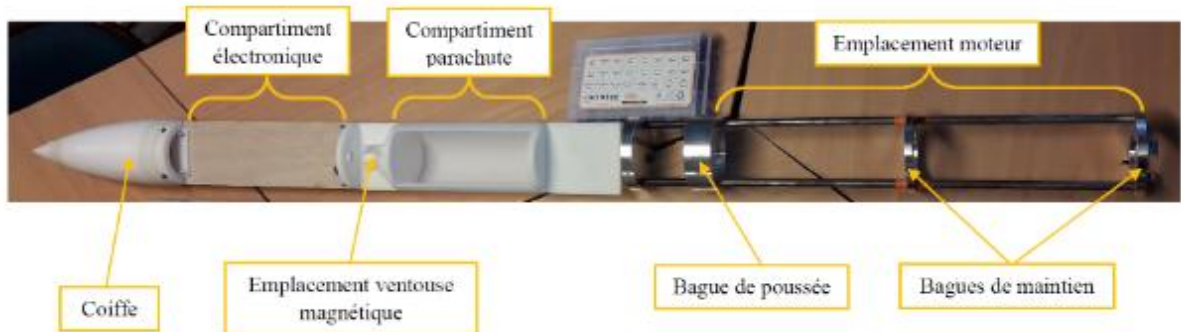


Figure n°6 : Photo de la structure interne

Les bagues de maintien en aluminium permettent de guider le moteur et de l'immobiliser. La bague de poussée est celle avec laquelle le moteur sera en contact. Deux tiges longitudinales permettent de lier les bagues entre elles. Nous sommes bien conscients que ces bagues sont surdimensionnées. Ceci explique en partie la masse importante de la fusée. Pour les futurs projets, il faudra prêter une attention particulière au dimensionnement de ces bagues.

Toutes les parties blanches sur la figure n°5 ont été imprimées en ABS. La trappe du compartiment parachute est commandée par une ventouse magnétique. Des ressorts aident à l'éjection de la porte (voir figure n°6). Une attention particulière a été portée à

l'alignement entre l'axe de l'aimant (solidaire de la trappe) et l'axe de la ventouse. Afin d'assurer cet alignement, la ventouse repose sur un joint torique mou, libérant ainsi deux degrés de liberté (2 rotations, on peut voir cette liaison comme une rotule à doigt).

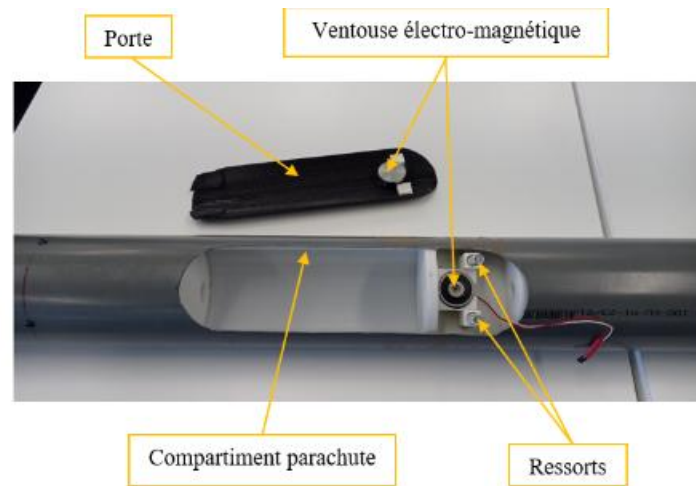


Figure n°7 : Système d'éjection de la porte parachute

La plaque sur laquelle l'électronique est fixée est en bois. Les cartes électroniques reposent sur des entretoises souples. Les modules de télémétrie (antennes) et GPS ont été déportés dans la coiffe de la fusée et fixés sur des supports facilitant le démontage. Le capteur de pression/température se situe sous le compartiment parachute : c'est la position optimale pour l'acquisition des données lors de la redescente de la fusée sous parachute.

La prise jack permettant de déclencher l'électronique au moment du décollage est fixée sur un support solidaire de la structure interne de la fusée avec un angle de 10° par rapport à la verticale. Une ouverture a été réalisée dans le tube. Un interrupteur à actionner manuellement et accessible depuis l'extérieur de la structure permet de couper l'alimentation du circuit expérience et de lancer la séquence de calibration des capteurs juste après la mise en rampe. Cet interrupteur se situe dans la même zone que la prise jack.

Enfin, deux LEDs bleue et jaune ont été ajoutées lors du C'Space afin de connaître l'état dans lequel le circuit parachute est (en attente du lancement, prise Jack arrachée, ventouse magnétique alimentée). Nous avons dû veiller à la visibilité de ces LEDs (en plein soleil, les LEDs ne sont pas forcément visibles).

E. Le parachute

Le parachute est en forme de croix. Il a été dimensionné avec l'aide de l'Excel StabTraj. Les matériaux utilisés pour sa réalisation sont :

- Toile de spi (toile du parachute, en rose),
- Biais de couturier (pour renforcer les coutures du parachute en bordure, et tenir les suspentes, en blanc),
- Emerillon (pour relier les suspentes à la sangle principale),
- Pièce d'attache parachute – structure interne de la fusée (en métal),
- Cordes (suspentes),
- Sangle,
- Anti-torche (fabriquée en 3D).

A l'atterrissage, la vitesse de la fusée est de 10 m/s.



Figure n°8 : Le parachute

La porte est accrochée directement au niveau d'une des boucles des biais de couturier afin de faciliter le déploiement du parachute. Lors de la descente sous parachute, nous avons pu remarquer que la fusée avait un mouvement de balancier de grande amplitude. Nous supposons que ceci est dû à la forme du parachute qui ne permet une évacuation efficace de l'air qui s'engouffre et reste « bloqué » sous la toile : une ouverture centrale ou un parachute de forme plus standard (5 véritables carrés) auraient permis d'obtenir une descente plus « douce et harmonieuse ».

V. L'électronique à bord

L'équipe électronique s'occupe du système d'éjection de la porte, du système de récupération de la fusée et des deux expériences embarquées.

Pour le circuit d'ouverture du parachute, nous utilisons une ventouse magnétique. Le décollage est détecté par arrachement d'un câble Jack (court-circuit). Nous sommes d'abord partis sur un circuit de commande de cette ventouse complètement analogique, qui fonctionnait par la décharge d'un circuit RC et l'utilisation d'un AOP. Suite à de nombreux problèmes de fiabilité de ce dernier, nous avons finalement décidé de passer sur un NE555. Nous avons alors modélisé deux nouveaux circuits de façon indépendante : en effet, nous avions peu de temps avant le lancement et nous voulions être certains qu'au moins l'un des deux circuits fonctionnerait. Les deux circuits se sont avérés opérationnels.

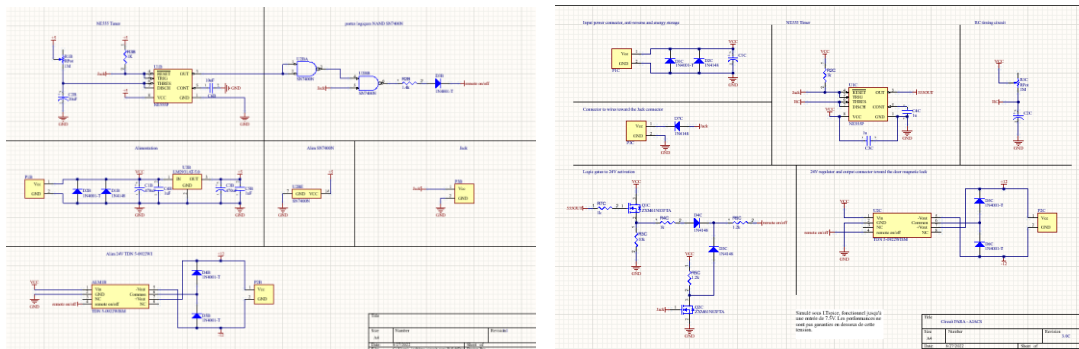


Figure n°9 : Les deux circuits parachute (B et C respectivement)

Le circuit installé fut finalement le circuit C, qui est en majorité analogique. Il fonctionne par charge d'un circuit RC grâce à un NE555. Il y a ensuite quelques portes logiques pour combiner le signal du Jack et celui du Timer. Il était d'abord prévu de le faire fonctionner avec une pile 9V mais nous nous sommes rendus compte que la résistance interne de la pile posait problème dans ce cas. En effet, la bobine de la ventouse magnétique tire beaucoup de courant, ce qui fait chuter la tension de la pile drastiquement. Après une concertation de l'équipe Électronique à minuit dans les couloirs, nous avons décidé de simplement ajouter une deuxième pile en parallèle. Pour les prochains projets, nous utiliserons des batteries au lithium pour éviter ce problème.

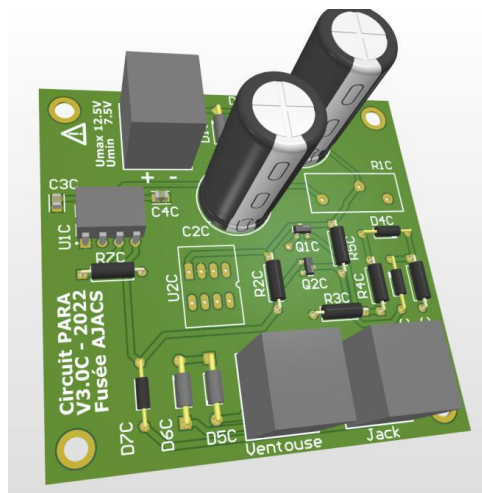


Figure n°10 : Vue du circuit parachute

Le circuit expérience est quant à lui numérique. Il est composé d'un capteur GPS, de deux centrales inertielles, d'une télémétrie LoRa, d'une carte de commande Teensy et d'un capteur pression/température. Les circuits imprimés sont placés sur des entretoises souples (capables d'atténuer les vibrations). Des diodes pour protéger l'électronique contre des inversions de tension ont été utilisées. Les connecteurs sont à ressort. On a par ailleurs ajouté plusieurs condensateurs pour assurer le fonctionnement même en cas de brèves coupures de l'alimentation (vibrations).

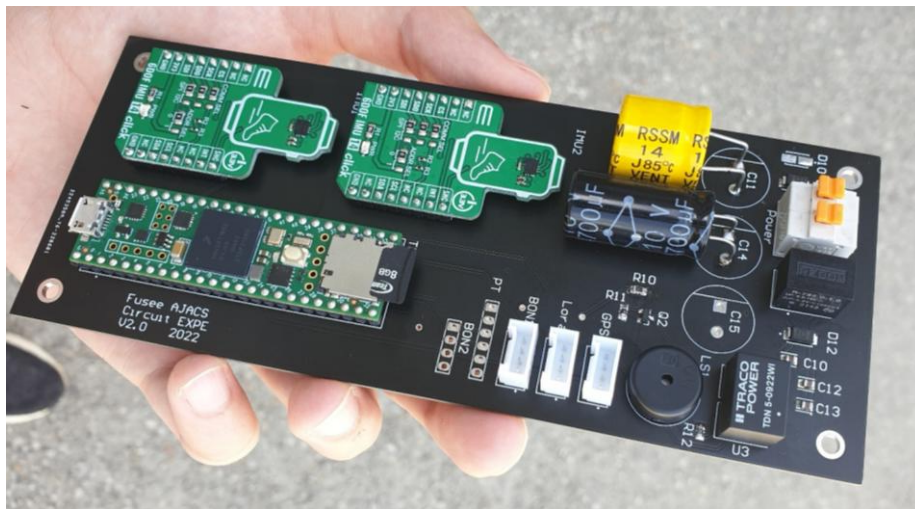


Figure n°11 : Circuit expérience

Peu avant le lancement, lorsque la rampe est déjà levée, nous avons retiré la flamme qui coupait l'alimentation du circuit expérience. La séquence d'allumage du circuit se lance alors, on vérifie la communication avec les capteurs et on calibre les IMUs. Un buzzer indique par de courtes mélodies les problèmes éventuels. Durant cette étape, ni la rampe ni la fusée devaient être déplacées, touchées, pour avoir un bon calibrage des deux IMUs ... La calibration des GPS et capteur pression/température est réalisée en usine. Nous avons cependant vérifié la cohérence des données fournies par ces capteurs au travers d'expériences (tracé pour un tour de stade avec le GPS, coordonnées GPS récupérées,

température et pression indiquées comparées avec des données issues de capteurs calibrés en laboratoire).

Lors du vol, nous enregistrons les données sur une carte SD. Chaque fichier contient 30s des données. Les données sont écrites dans la ram et sont envoyées sur la carte SD au bout des 30 secondes. A cause du choc de l'atterrissage, nous avons perdu quelques dizaines de secondes de données de vol. Une mémoire flash soudée sera préférée pour les prochains projets.

Les données brutes et intégrées des deux IMUs sont enregistrées environ 9000 fois par seconde. Malheureusement, nous n'avons enregistré que deux décimales à cause d'une erreur de programmation. Il y eut également de brèves coupures de quelques millisecondes régulièrement car le processeur était occupé par d'autres tâches. De ce fait, notre intégration des données pour reconstruire une trajectoire diverge assez vite. De plus, par manque de temps, nous n'avons pas mis en place le code remettant à zéro les vitesses et la position lors du décollage. Les données intégrées sont finalement inutilisables. Nous ne pouvons pas non plus intégrer les données brutes car elles manquent de précision.

Après le vol, nous mettons la Teensy et tous les capteurs en veille prolongée et nous la réveillons pour activer le buzzer toutes les 30 secondes et l'antenne Lora toutes les 5 minutes pour envoyer quelques paquets contenant les coordonnées GPS.

Nous retrouvons finalement la fusée grâce à la position GPS envoyée via le système de télémétrie.

VI. Analyse des données issues du vol

Nous présentons dans cette partie les données qui nous semblent pertinentes et qui ont du sens. Comme annoncé précédemment, les données pour la trajectographie sont inutilisables (nous obtenons des résultats absurdes qui divergent très rapidement). Les courbes présentées sont ainsi les courbes d'accélération de la fusée sur les trois axes, vitesse de la fusée sur son axe vertical, orientation (angles) de la fusée dans l'espace et de pression et température en fonction de l'altitude de la fusée.

Le repère utilisé est le suivant :

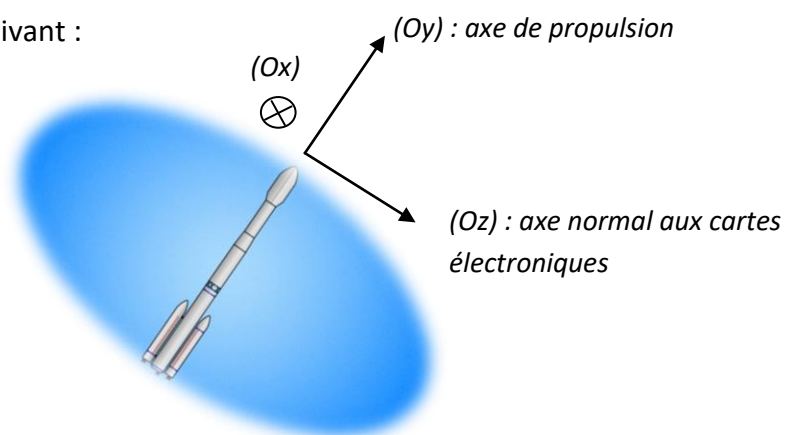


Figure n°12 : Repère utilisé

- Accélérations de la fusée sur les trois axes

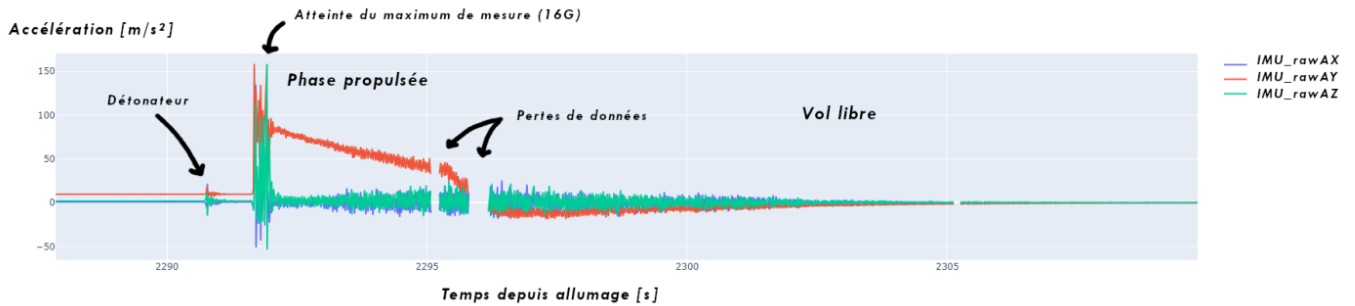


Figure n°13 : Courbes d'accélération de la fusée en fonction du temps

Les vibrations en début de vol (juste après le pic d'accélération) peuvent être considérées comme représentatives des vibrations dues au moteur. En effet, la vitesse de la fusée étant relativement faible, les vibrations dues aux frottements de l'air peuvent être négligées devant celles du moteur. Après cette première phase de propulsion, les vibrations restantes sont celles des turbulences de l'écoulement de l'air sur la fusée, aléatoires et centrées. Nous relevons une valeur maximale de 2,5G.

On observe deux pertes majeures de données. Nous avons identifié deux explications possibles : l'une est que la communication entre la carte SD et le microcontrôleur ait été interrompue par un faux contact (peut-être dû aux vibrations importantes à cette étape du vol) ; une autre possibilité serait que la carte SD ait eu des difficultés d'écriture, et ait donc passé un temps important (320ms pour la coupure la plus longue) à résoudre ce problème avant de reprendre l'écriture.

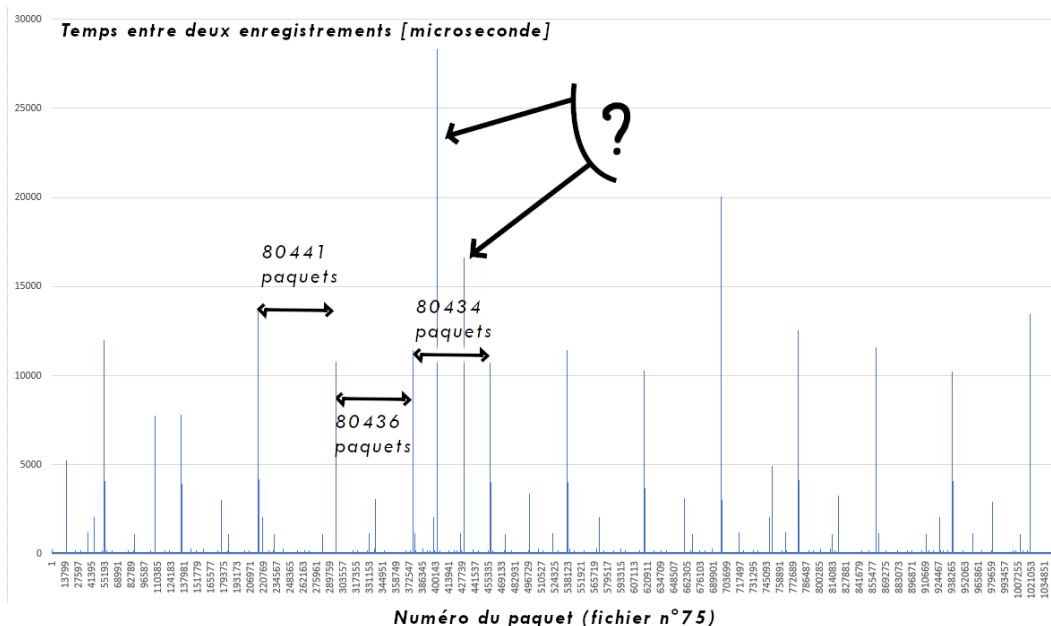


Figure n°14 : Temps entre deux enregistrements en fonction du numéro de paquet

Sur la figure n°14, il est possible d'étudier le temps en microsecondes entre chaque écriture de données. Avant le début du vol (donc sans aucune vibrations), on observe des temps de mise à jour des variables très faibles en majorité (de l'ordre de 100µs). On peut apercevoir aussi des pics à intervalles réguliers de plusieurs millisecondes. Nous pensons que ces pics sont dus aux cycles d'écriture de la carte SD, qui attend qu'un buffer soit rempli avant d'écrire un bloc de données complet. Cependant nous ne disposons d'aucune preuve capable de valider cette théorie. Nous pouvons aussi observer sur cette figure deux pics, eux aussi inexpliqués, qui pourraient être expliqués par des difficultés d'écriture, mais nous ne disposons pas de connaissances assez avancée dans ce domaine pour valider cette hypothèse.

- **Orientation de la fusée dans l'espace**

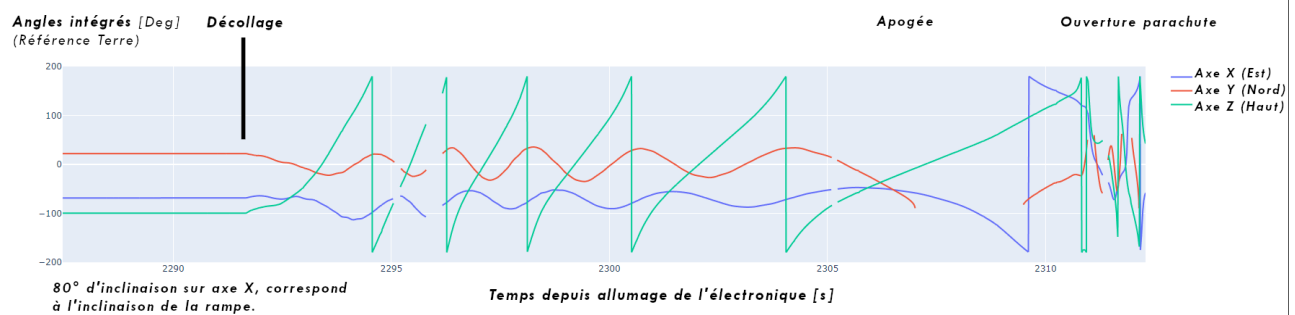


Figure n°15 : Courbes de positions angulaires en fonction du temps

Un autre point intéressant résulte de l'analyse de la rotation. L'intégration embarquée des gyroscopes s'est révélée étonnamment précise et l'erreur visible avant le lancement semble très faible, de l'ordre du degré par rapport aux données que nous ont fournies les responsables de la rampe de lancement (une erreur manuelle sur la définition du Nord s'est glissée dans le code, il faut ajouter 180° aux valeurs lues sur les axes X et Y de la figure pour comparer aux valeurs d'orientation de la rampe : azimuth 210° et élévation 80°).

Cette courbe montre aussi que, pendant la phase de propulsion, la vitesse de rotation était en augmentation. Dès que la propulsion cesse, celle-ci diminue. Il semblerait donc que le moteur induise un couple de rotation autour de l'axe de sortie des gaz. Les ailerons auraient par la suite freiné cette rotation sans pour autant l'inverser, indiquant un alignement correct de ces derniers.

- **Vitesse de la fusée sur l'axe (Oy)**

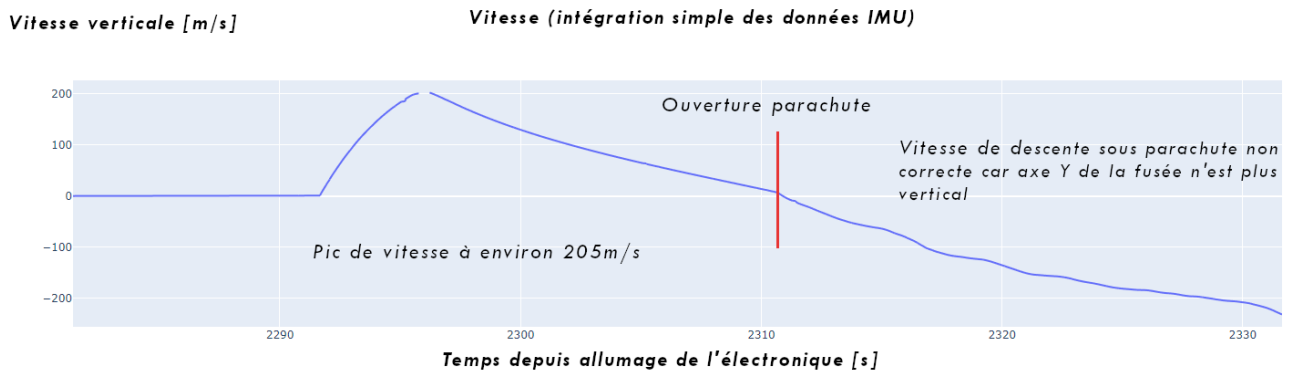


Figure n°16 : Courbe de vitesse sur l'axe (Oy) en fonction du temps

Nous remarquons que la vitesse maximale atteinte par la fusée fut de 205m/s, atteinte à la fin de la phase de propulsion. StabTraj fournissait une valeur de 211m/s : les calculs effectués par StabTraj sont donc bien cohérents avec ce qu'il se passe réellement. On remarque également la vitesse nulle de la fusée sur l'axe (Oy) à l'ouverture du parachute. La phase de descente sous parachute n'a peu de sens, étant donné que l'axe (Oy) n'est plus vertical. Enfin, il est possible de comparer l'allure de cette courbe avec celle fournie par StabTraj : les deux sont parfaitement cohérentes (allure, pentes et position du maximum).

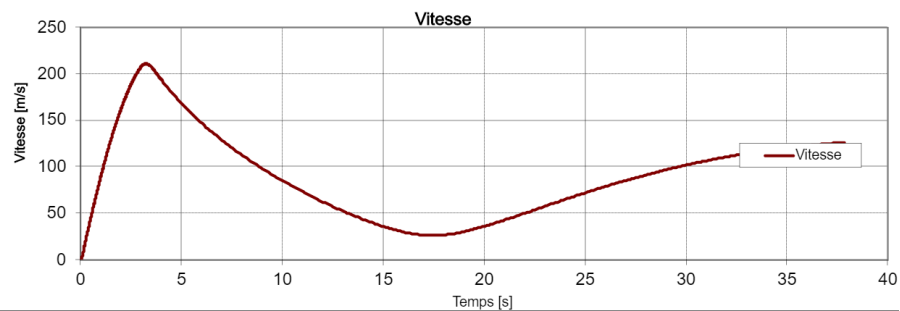


Figure n°17 : Courbe de vitesse de la fusée fournie par StabTraj

- **Courbe de pression**

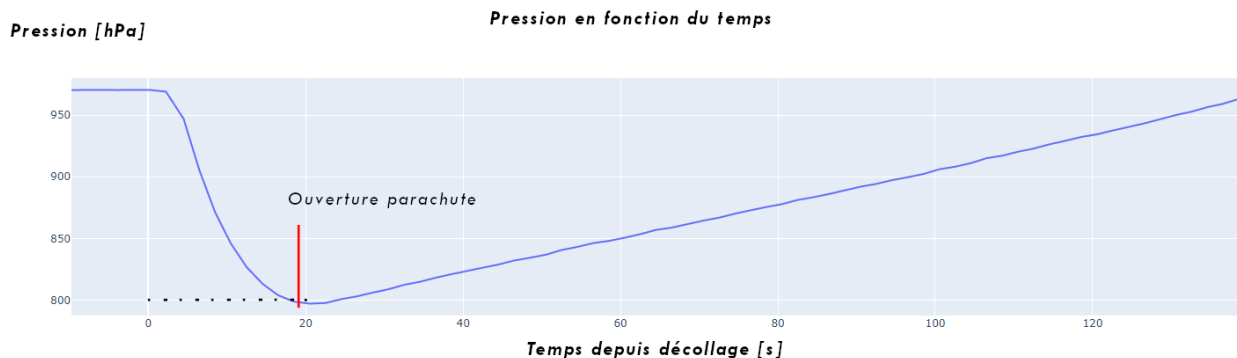


Figure n°18 : Courbe de pression en fonction du temps

Les pressions maximale et minimale relevées par le capteur embarqué dans la fusée sont respectivement 975hPa et 800hPa. La variation maximale de pression au cours du vol est ainsi de 175hPa. Le modèle classique atmosphérique stipule que, dans les basses couches de l'atmosphère, la pression décroît de 1hPa tous les 28ft, soit 1hPa tous les 8,4m. Nous en déduisons une altitude atteinte par la fusée de 1470m. Ce résultat est cohérent avec l'altitude maximale prévue par StabTraj : 1550m ; soit un écart relatif de 5%. L'intégration des données de vitesse lors de la première phase de vol (phase durant laquelle les données nous permettent d'obtenir des résultats plutôt cohérents) nous fournit une altitude maximale supérieure à 1200m. Ces résultats permettent ainsi de valider le modèle de pression atmosphérique usuel.

- **Courbe de température**

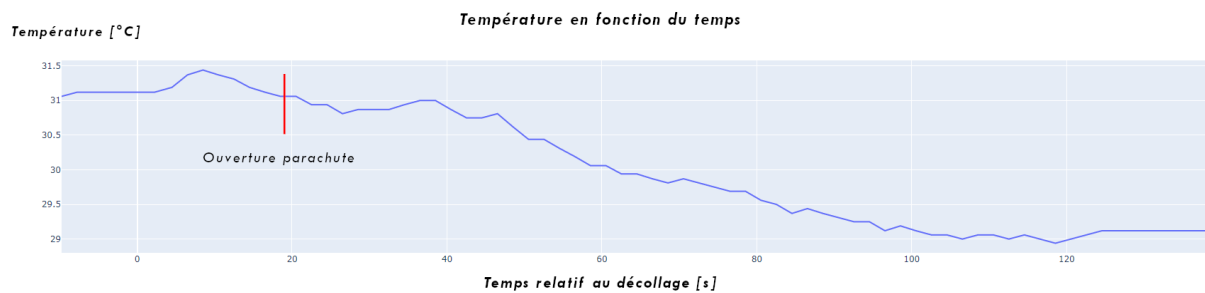


Figure n°19 : Courbe de température en fonction du temps

L'allure de la courbe de température est assez étrange. On remarque une légère hausse de la température dans un premier temps lors de la phase de poussée. Celle-ci diminue ensuite jusqu'à l'impact au sol de la fusée. Ceci est parfaitement incohérent avec le modèle de température de l'atmosphère : une diminution de la température de 2°C tous les 1000ft, soit 300m. Nous expliquons l'absurdité de ces données par l'inertie thermique du capteur : que cela soit durant la phase d'ascension ou de descente, le capteur « n'a pas eu assez de temps » à une altitude donnée pour acquérir la valeur de la température en question.

VII. Retour d'expérience sur la semaine du C'Space

La semaine de lancement du C'Space 2022 fut riche en émotions. Nous n'étions pas véritablement prêts à lancer lors de notre arrivée le samedi sur le camp de Ger. L'électronique n'était pas complètement opérationnelle et quelques modifications étaient à faire en mécanique sur la structure de la fusée. Nous pensions que ces quelques tâches

restantes pouvaient être réalisées en une ou deux journées. Cela ne s'est pas vraiment déroulé ainsi ... Nous nous sommes rendus compte qu'il était difficile de travailler sereinement durant le C'Space. Entre excitation, appréhension et angoisse, la moindre modification peut prendre des proportions démesurées. Nous avons beaucoup souffert de notre manque de préparation en électronique et des effectifs réduits de cette équipe. Mieux anticiper et prioriser davantage les tâches sont deux points sur lesquels nous travaillerons l'année prochaine pour le nouveau projet de fusée. Un grand merci à toute la Débug Team du C'Space sans qui nous n'aurions jamais pu aboutir. La qualification de notre fusée le mercredi soir à 23h00 fut une véritable victoire. Nous étions censés lancer le jeudi matin. Nous lancerons finalement l'après-midi à 16h30. Nous n'avions pas d'interrupteur pour couper l'alimentation du circuit parachute. Par conséquent, nous avons été obligés de monter l'intégralité de la fusée en tente club (intégration, mise sous tension, ...). Ceci sera à revoir l'année prochaine car un tel montage génère du stress, pouvant conduire à des erreurs. La présence d'un interrupteur pour le circuit parachute nous aurait permis de tout monter calmement sur le camp militaire et les opérations en tente club auraient été drastiquement réduites : nous veillerons à cela pour les prochains projets. Toutes les opérations et manipulations sur le pas de tir se sont bien déroulées : la chronologie fut bien respectée. Le vol fut nominal et la fusée récupérée est intacte. Le système de télémétrie fonctionna correctement et une grande partie des données enregistrées à bord de la fusée sur la carte SD furent récupérées.

VIII. Conclusion

Nous sommes fiers du chemin que ce projet nous a fait parcourir. Malgré toutes les difficultés que nous avons pu rencontrer, le projet est finalement un succès : un vol nominal, une fusée intacte et des données expérimentales sauvegardées. Nous avons beaucoup appris à travers ce projet, que ce soient des connaissances, des savoir-faire, mais aussi sur nous-mêmes, nos capacités. Un projet de fusée expérimentale est difficile et complexe : il invite véritablement à rester humble. Nous retiendrons de FX26 tous les bons moments que nous avons pu vivre, mais aussi tout ce qui est à ajouter, améliorer, changer. Nous préparons d'ores-et-déjà le futur projet de fusée, et c'est avec joie que nous vous retrouverons pour le C'Space 2023 ! Merci pour tout !

