



CERES - Conceptual and Educational Rocket Experimented by Students

Dossier de clôture



Table des matières

Introduction – contexte du projet.....	3
Objectifs du projet.....	3
Equipes participantes	4
Expériences embarquées	5
Parafoil piloté	5
Contrôle de roulis par gaz froid.....	5
Charge utile	6
Antenne de télémessure.....	7
Ailerons en éco-conception.....	8
Architecture de la fusée	9
Conception mécanique de la fusée	12
Parafoil	13
Système de Parachutes	16
Contrôle de roulis	17
Electronique	19
Séquenceur.....	19
OBC.....	20
Interface	22
Problèmes rencontrés	23
C'space 2022.....	27
Bilan du vol	31
Le vol	31
Récupération	33
Analyse des résultats et explications	34
Contrôle de roulis	34
Charge utile	35
Conclusion	37
Annexe.....	38

Introduction – contexte du projet

Dans un contexte d'innovation disruptive, PERSEUS (Projet Étudiant de Recherche Spatiale Européen Universitaire et Scientifique), projet de la Direction des Lanceurs du CNES, a pour objectif, à travers des projets ambitieux et des démonstrateurs sol et vol, de susciter l'intérêt et la vocation de la nouvelle génération pour le monde du spatial, en les projetant dans un avenir de découvertes, de sciences et de technologies mais en les sensibilisant également aux dimensions économique, stratégique et politique du spatial qui sont plus importantes que jamais.

La fusée C'Space PERSEUS 2021-2022 est la première fusée de première de la nouvelle filière C'Space du projet PERSEUS qui représente le retour à la campagne de lancement C'Space pour des fusées PERSEUS. Entre 2007 et 2016, des fusées de la filière ARES ont été lancées au C'Space. Les fusées C'Space PERSEUS se veulent être une plateforme de développement et d'essais rapides pour les technologies utilisées sur les projets de grande envergure futurs de PERSEUS : ROAR (Reusable Oxygen methAne Rocket), ASTREOS et DREAM-ON (Disruptive Reusable Experimental Advanced Methane-Oxygen Nanolauncher). Le projet est nommé CERES : Conceptual and Educational Rocket Experimented by Students.

Objectifs du projet

Le but du projet de cette année est de tester un système de contrôle de roulis par gaz froid, éjecter une charge utile de prises de mesures de pollution de l'air, et le déploiement d'une voile de type parafoil pilotée pendant la descente. S'ajoute à cela la volonté d'intégrer des ailerons en éco-conception de façon à tester la résistance mécanique d'un nouveau matériau et procédé de fabrication.

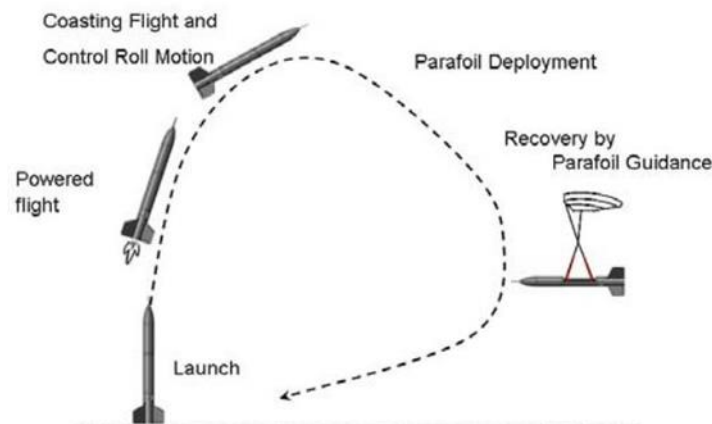


Figure 1 : schémas décrivant le vol espéré de la fusée, extrait du rapport de vol des fusées japonaises de 2006/2010

Le tout est de tester ces systèmes pour les intégrer dans ASTREOS 1 qui doit être lancée en 2023 à Kiruna. Aussi il s'agit de lancer une fusée pour la première fois depuis 2017 pour Perseus dont les équipes ont changé et qui n'a pas lancé de fusée depuis lors, ce afin de relancer la machine.

Le projet n'a pas d'antécédents et démarre fin 2021 avec de nouvelles équipes, lançant une nouvelle génération de lanceurs appelés CERES.

Equipes participantes

Le projet étant du CNES, il est un des projets en développement de Perseus organisé de manière différente. Il est constitué d'un chef de projet à temps plein, qui s'occupe de gérer les équipes d'étudiants qui travaillent chacune sur une partie de la fusée. Au total des étudiants de 8 écoles ont participé à ce projet.

Le projet est fait de la façon suivante : le cahier des charges est établi par Perseus, puis le chef de projet s'occupe de concevoir l'architecture de la fusée, répartir le travail entre les équipes, assurer le support technique, gérer les commandes et le budget du projet, compléter le travail manquant et trouver les solutions aux différents problèmes qui se poseront sur le projet.

Equipes participantes :

- **CESI Nanterre** : Christopher ZENON et Cyril THILOU-TRIEP
- **SIGMA Clermont** : Léo JURIE, Adrien LEPOULTIER, Stevan BRIZARD et Tom BARALLE, Hugo BESANÇON, Solenn Le DANTEC, Leo MIALOT, Mathis FUKUCHI Paul ROSAZ, Léo PIERRON, Alex LAMADON-PERIE, Khalid BEN DRISS et Bilal BISTA
- **ECAM Lyon** : Rohit TANTIYA, Arthur SPIRE, Maxime GREGOT, Mayalen de JAUREGUIBERRY, Ashwanth VIVAKANATH, Nikolas VEILLET et Ludovic BOGNON
- **SUPAERO** : Florian COURTEVILLE et Enrico Mario GIOVANARDI
- **Université Paris-Saclay** : Lucas DOUR, Wojciech-Jan WACHOWIAK, Robin CAGLIARIS, Sarah MARIE, Jeanne VILLAR, Arthur ERBACHER et Pauline COUSIN.
- **ENSEA Cergy** : Yacine AZI
- **ESIGELEC** : Henri Le BARBENCHON, Matthieu FAURE-DE-KERSAUSON et Victor HENRY
- **ESISAR** : Nathan GARNIER

Responsable technique et chef de projet : Timothée Grosbois-Favreau

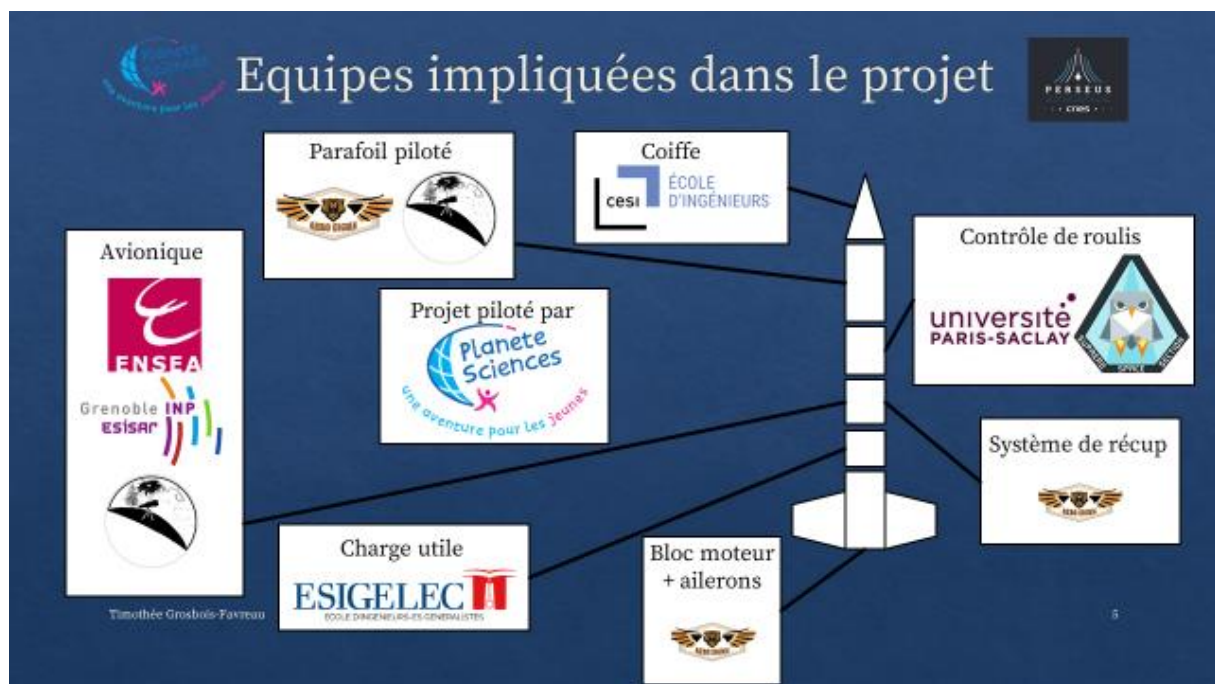


Figure 2 : architecture de la fusée et répartition des équipes sur chaque partie

Expériences embarquées

Le projet embarque 2 expériences ainsi qu'une charge utile : une expérience de contrôle de roulis par gaz froid (air comprimé), déploiement et contrôle de parafoil lors de la descente, et largage d'une charge utile légèrement plus petit qu'un satellite 1U. De plus la fusée doit aussi tester un nouveau type d'antenne de télémétrie spécialement adaptée pour un diamètre de 250mm.

Parafoil piloté

Expérience en vogue depuis quelques temps, le but est de déployer une voile de parafoil au lieu d'un parachute classique, puis de tirer sur les suspentes de contrôles dans un sens ou l'autre pour amener la fusée où on le souhaite, avec pour objectif de pouvoir réutiliser la fusée.

Nous ne partons pas de rien, 2 écoles ayant travaillé sur le sujet l'année précédente (IPSA et ECAM Strasbourg) en ayant lancé une fusée avec parafoil en utilisant deux procédés différents : déploiement par trappe latérale pour l'ECAM et déploiement par la coiffe l'IPSA.

Nous faisons le choix de déployer par la coiffe, de façon à éviter que le corps de la fusée et ses ailerons ne gênent la descente lors de rafales de vent. L'autre raison est que plusieurs équipes ont déployé par le passé par trappe latérale et que le déploiement n'est pas bon.

L'IPSA et l'ECAM Strasbourg font également une fusée avec parafoil cette année en reprenant leur précédent projet, sont participantes au projet Perseus sur cette expérience, c'est pourquoi nous décidons de choisir un système d'éjection par la coiffe, mais avec ouverture de la coiffe en 2 morceaux afin de tester la 3^{ème} possibilité de déploiement entre les 3 projets et en comparer les résultats.

Contrôle de roulis par gaz froid

Le but est de d'arrêter le roulis de la fusée en utilisant un système haute pression avec de l'air comprimé, avec pour objectif d'arrêter le contrôle de roulis de la fusée pendant son ascension. L'activation a lieu 5 secondes après le décollage et l'arrêt juste avant l'apogée. Pendant la descente, l'air restant dans le réservoir est purgé de façon à récupérer une fusée sans risque de décompression violente, notamment en cas de balistique.

Pour garantir le contrôle de roulis, la bague contenant les tuyères du contrôle de roulis a été conçue de façon à avoir 4 sorties d'air, couplées 2 à 2 pour avoir 2 sorties qui éjectent l'air vers l'extérieur de la fusée de façon à faire tourner la fusée dans le sens antihoraire (en bleu sur le schémas ci-dessous) et les 2 autres sorties dans le sens horaire (en orange).

Il y a également les sorties de purge (flèches jaunes) dont l'actionnement peut être fait au sol par la connexion d'un jack relié à une batterie pour forcer l'ouverture de la vanne de purge. Les flèches autour de la bague indiquent le sens d'éjection de l'air, les flèches semi-circulaires la rotation induite par l'éjection d'un couple de tuyères.

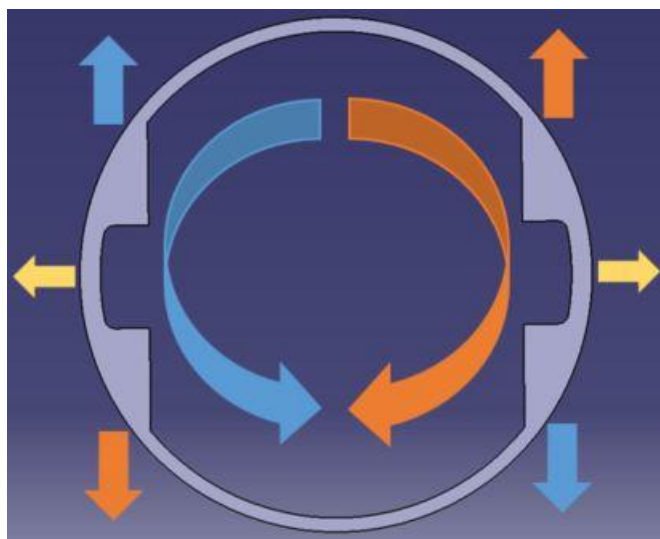


Figure 3 : schémas d'explication du système de contrôle de roulis

Charge utile

« L'équipe ESIGELEC a la charge du développement de la charge utile intelligente permettant de faire des relevés de la qualité de l'air en haute altitude. La charge utile sera composée d'un système d'éjection et des sondes permettant de faire la mesure de gaz.

Les objectifs de réalisation sont multiples. Le premier objectif est la conception et la réalisation de l'électronique permettant de réaliser des mesures fiables de l'atmosphère.

La pollution de l'air est la contamination de l'environnement intérieur ou extérieur par un agent chimique, physique ou biologique qui modifie les caractéristiques naturelles de l'atmosphère. Les appareils utilisés pour la combustion au sein des foyers, les véhicules automobiles, les établissements industriels et les feux de forêt sont des sources fréquentes de pollution atmosphérique. La pollution de l'air à l'extérieur comme à l'intérieur par des polluants nocifs peuvent entraîner des conséquences sur la santé humaine comme des maladies respiratoires potentiellement mortelles.

Les principaux polluants primaires issus des activités humaines que nous allons étudier sont :

- Des particules (PM10 et PM2.5).
- Des oxydes de carbone.
- Des oxydes de soufre.
- Des oxydes d'azote.
- Des composés organiques volatils.
- Des métaux lourds (plomb, mercure).

Les polluants secondaires qui ne sont pas directement rejetés dans l'atmosphère mais qui résultent d'une réaction chimique de gaz entre polluants primaires sont les suivants :

- De l'ozone.
- Méthane.

Cette liste, non exhaustive, va nous permettre, après une étude approfondie, d'adapter la conception de notre charge utile aux différentes caractéristiques techniques des principaux polluants.

Le second objectif est de concevoir et de réaliser le module électronique de mesure dédié aux paramètres de vol (altitude, GPS, IMU).

Le troisième objectif est de développer l'enregistrement et la transmission radio de données, avec la réalisation d'un transmetteur et d'un récepteur radio HF dédiés.

Enfin, nous allons concevoir un système de réception au sol avec interface de visualisation des données. Le système permettra de visualiser les données relevées et de les analyser en temps réel.

L'étage d'éjection sera conçu en parallèle de ces objectifs par notre équipe et la base du lanceur expérimental sera fournie par Perseus/CNES. » Extrait du rapport de l'équipe fait au CNES.

A la différence du reste du projet, la charge utile avait déjà bien démarré son développement, en tant que projet de fin d'études pour les étudiants concernés, ce qui fait que celle-ci était déjà prête en février, permettant à l'équipe de se concentrer pleinement sur le système d'éjection depuis la fusée.

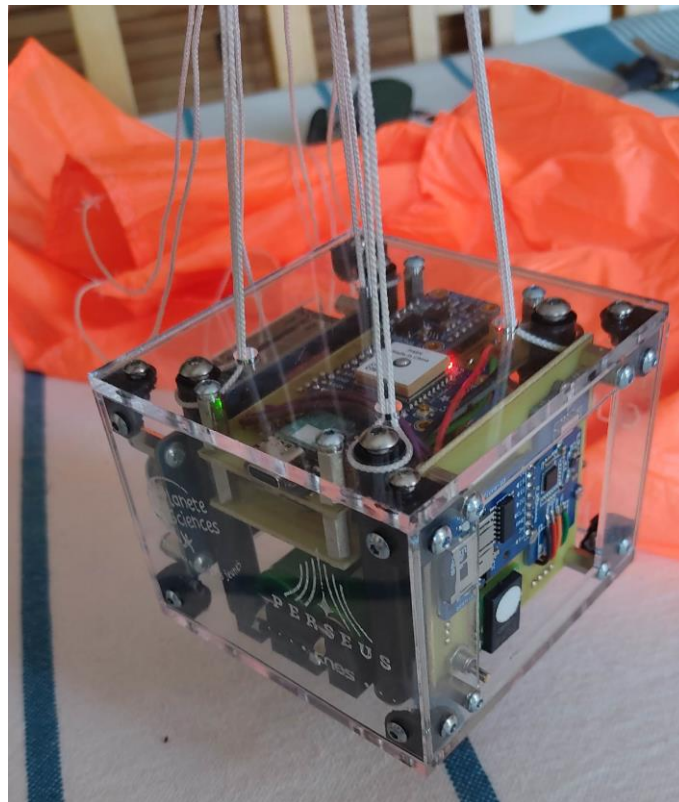


Figure : la charge utile finie

Antenne de télémesure

Au démarrage du projet, l'ENSEA était en pleine étude pour l'antenne d'ASTREOS, mais rien n'avait été fabriqué. C'est pourquoi il a été décidé d'utiliser leur prochain prototype d'antenne en adaptant la fréquence (2280 MHz pour ASTREOS) pour que l'antenne soit dans les fréquences légales, sans avoir à refaire la conception entière de l'antenne. Le plus simple était de passer sur une fréquence d'émission de 2400 MHz, ce qui implique de petites modifications pour l'ENSEA et permet d'être dans la légalité.

Le problème de cette fréquence est la portée du signal qui est faible. Par chance, en ayant une fusée lourde, celle-ci n'ira pas loin, mais malgré tout on ne trouve principalement des xbee comme émetteurs et ceux-ci ont une puissance faible permettant de couvrir une maison, mais pas la distance

sol fusée en vol. C'est pourquoi un émetteur trouvé sur amazon a été sélectionné : le WayinTop NRF24L01, programmable avec Arduino, pour faciliter les choses. La portée théorique est de 1km, même si au vu de l'équipement, les doutes sont permis.

« L'antenne de télémétrie est de type wraparound (enveloppante). Ce type d'antenne nécessite donc un certain nombre de points d'alimentations pour un fonctionnement optimal. Mais le signal radio modulé nous arrive sur 1 voie. Il faut donc concevoir un réseau d'alimentation permettant de diviser le signal radio sur plusieurs voies afin de les appliquer à l'antenne. Afin de permettre cela, on doit concevoir un circuit imprimé passif qui, en entrée, capte le signal modulé à la fréquence porteuse de 2400 MHz et doit le transmettre à 8 ports coaxiaux sans en modifier la forme (conservation de l'intégrité du signal) et en répartissant la puissance de façon égale.

La connexion entre la carte et l'antenne se fera par l'intermédiaire de câbles SMA semi-rigides. Les connecteurs SMA doivent être soudés sur la couche inférieure de la carte ou bien en bord de carte.

L'objectif de l'ensemble réseau d'alimentation + antenne est de transmettre le maximum de puissance. On veillera donc à limiter les pertes de puissances liées au réseau d'alimentation. L'adaptation d'impédance en entrée et sortie se fera par l'intermédiaire de tronçons quart d'onde. L'adaptation en entrée doit permettre une transmission d'au moins 90 % de la puissance. Le paramètre de réflexion en entrée doit être inférieur à -10 dB. » Extrait du rapport de Yacine AZI : Réalisation d'un réseau d'alimentation et d'une antenne de télémétrie en bande S.

Ailerons en éco-conception

Les ailerons sont habituellement réalisés en fibre de carbone avec remplissage de mousse expansive chez Perseus, ici il a été décidé de tester un nouveau processus et matériau avec pour optique d'utiliser des matériaux moins polluants dans la réalisation des fusées. Difficile de faire quelque chose de non polluant et propre dans les fusées, mais le but est déjà de diminuer l'impact sur l'environnement sur les parties de fusée ou c'est possible.

On peut jouer sur 2 choses : le matériau et la résine. La résine restera quelque chose de mauvais pour l'environnement, mais il existe des résines faites en partie avec du carbone d'origine végétale, en tout cas d'après le fournisseur. La démarche est lancée, mais difficile de savoir si les produits utilisés sont réellement moins négatifs pour l'environnement. Nous avons sélectionné Sicomin qui vendait à la fois une résine « plus propre » et de la fibre de lin, en utilisant leur résine SR GreenPoxy 56, constituée à 56% de molécules d'origine végétale. Pour la structure, la fibre de lin UD a été choisie, de façon à pouvoir placer la fibre comme on le souhaite et obtenir une résistance mécanique optimale.

Il est vrai que les ailerons d'une fusée sont les éléments qui subissent beaucoup de contraintes mécanique, mais la fusée étant lourde, elle n'ira pas très vite et ne subira pas de grosses contraintes, ce qui permet de valider le processus de conception et fabrication dans un premier temps.

La technique visée est similaire à celle que Perseus a pour habitude de faire avec du carbone, mais avec de la fibre de lin à la place du carbone.

Architecture de la fusée

Le CDC de perseus demande une fusée de diamètre 250mm, subissant une accélération axiale de 15g minimum et ayant une vitesse de 316 m/s minimum. Ce diamètre n'est pas un format C'Space, mais il est demandé pour que toute technologie développée puisse être facilement transposée à la fusée ASTREOS qui aura le même diamètre. Cela impose une fusée de minimum 2.5m de long pour respecter la finesse minimum imposée par planète sciences, à savoir un rapport diamètre/longueur de 10. En souhaitant réaliser une expérience de type parafoil, il doit également y avoir un deuxième système de récupération par sécurité en cas de dysfonctionnement de celui-ci. Cela nous permet d'obtenir un schéma de la fusée qui est constituée de la sorte :

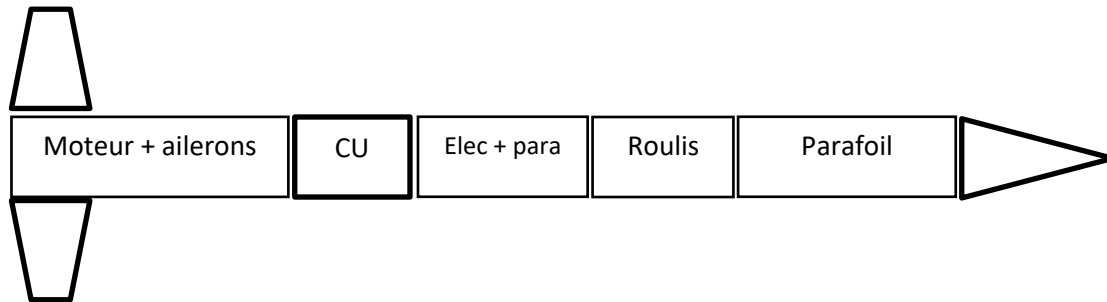


Figure 4 : présentation de la fusée initialement prévue

Le projet est conçu par planète sciences avec le travail réparti aux équipes participantes. Dans un premier temps la fusée est conçue avec OpenRocket, de façon à avoir plus d'options et réglages possibles que stabtraj.

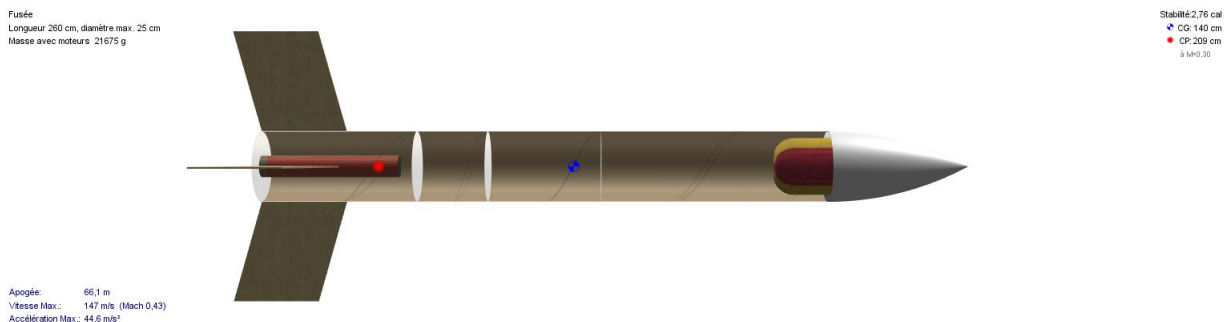


Figure 5 : fusée représentée avec OpenRocket

Chaque étage apparaît vide, mais il y a été associé une masse qui permet d'obtenir un centre de gravité en bleu et le centre de poussée en rouge. Le centre de poussée est le point d'application des forces aérodynamiques qui s'appliquent sur la fusée. Tout en haut se trouve le parachute qui représente la position où sera placée le parafoil. La fusée représentée fait 2.5m de long, et embarque le moteur pour une masse totale d'environ 21 kg. Dans ces conditions, nous obtenons en performance de vol :

Simulation 12

Personnalisé

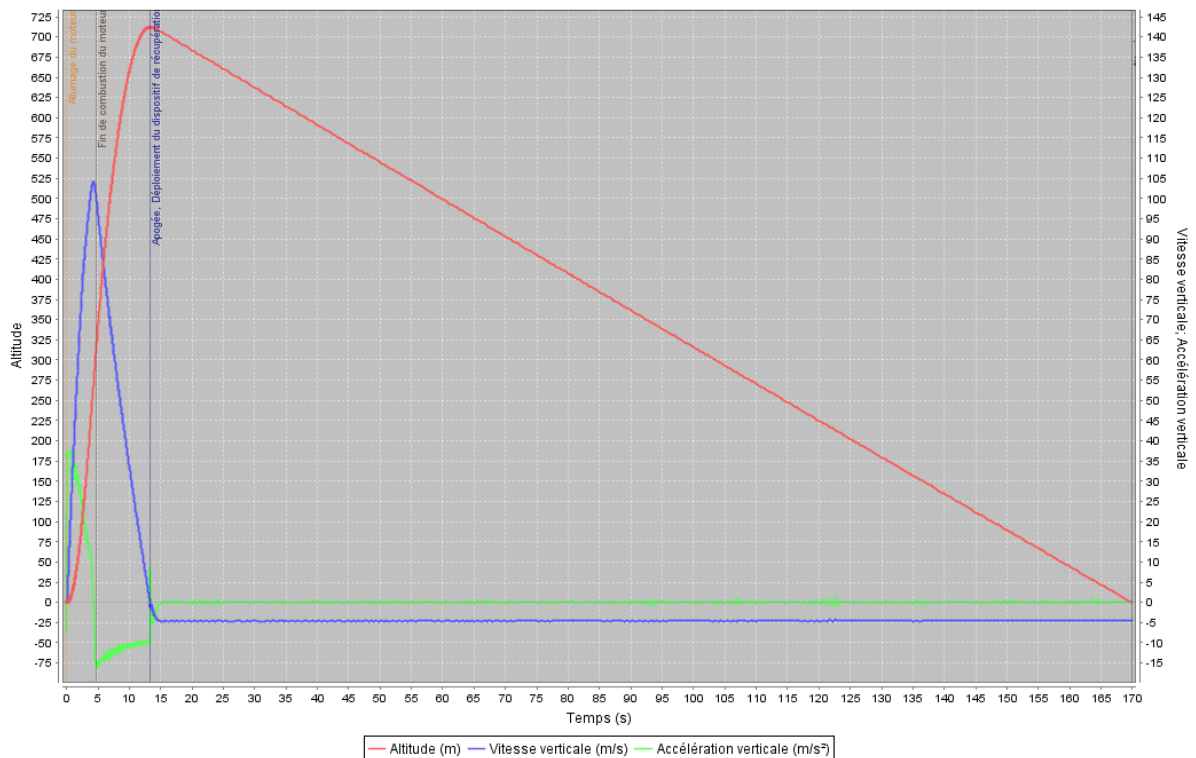


Figure 6 : estimation des performances de la fusée

D'après Open Rocket dans cette configuration nous atteindrons 712 m d'altitude, ce qui n'est pas satisfaisant au regard des demandes, mais le vol ne peut se passer autrement avec un pro75 du fait du diamètre 250. L'accélération subie par la fusée est de +3.5g et -1.5g, soit 5g, là aussi en dessous des attentes, cela à cause du moteur disponible au c'space (pro75 3G). Il faut ensuite vérifier que cela respecte les règles de planète sciences pour voler au c'space avec stabtraj.

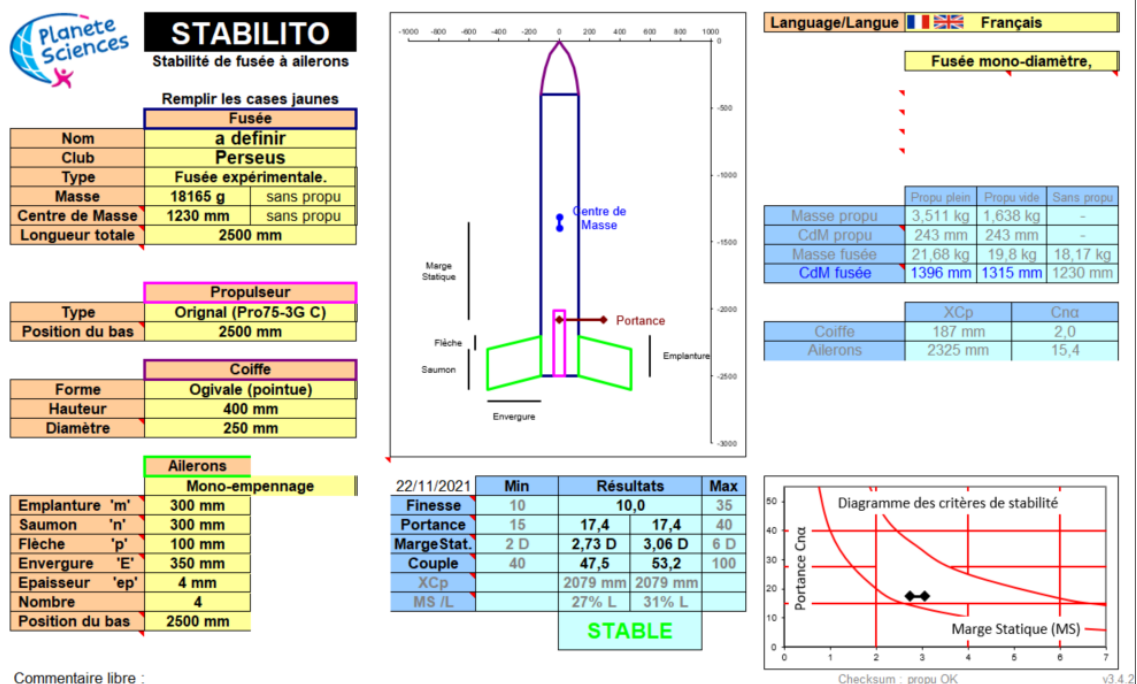


Figure 7 : présentation de la fusée dans stabtraj



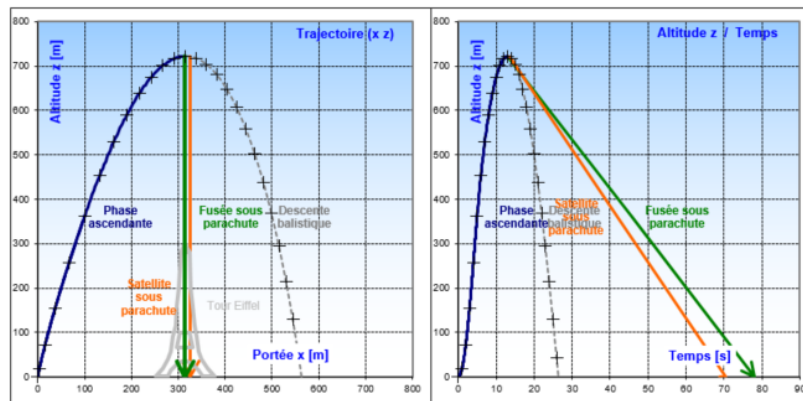
TRAJECTO

Trajectographie de fusée

Remplir les cases jaunes

Fusée	
Nom	a définir
Club	Perseus
Masse totale	21,676 kg
Propulseur	Original (Pro75-3G C)
Trainée Aérodynamique	
Surface Réf.	0,054687 m²
Cx	0,5
Rampe de Lancement	
Longueur	6 m
Élévation	80 °
Altitude	0 m

Descente Sous Parachute		
	Fusée	1 satellite
Masse	18,803 kg	1 kg
Dépotage	N/A	
Ouverture para	13 s	13,5 s
Surface para	2,45 m²	0,1 m²
Cx parachute	1	1
Vitesse du vent	5 m/s	5 m/s
Vitesse descente	11,1 m/s	12,7 m/s
Durée descente	65 s	57 s
Durée du vol	78 s	70 s
Déport latéral	± 326 m	± 285 m



22/11/2021	Temps	Altitude z	Portée x	Vitesse	Accélération	Efforts
Sortie de Rampe				21,6 m/s		
Vit max & Acc max				115 m/s	49 m/s²	
Largage du satellite	13,5 s	721 m	326 m	24 m/s		33,9 N
Culmination, Apogée	13,0 s	722 m	314 m	23 m/s		
Ouverture parachute fusée	13,0 s	722 m	314 m	23 m/s		818,6 N
Impact balistique	26,5 s	~0 m	565 m	91,4 m/s		78614 J

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

Commentaire libre :

propu OK
v3.4.2

Figure 8 : estimation des performances de la fusée avec stabtraj

A été ajouté dans stabtraj la charge utile, prévue pour se déployer après l'apogée.

Le choix de 4 ailerons est dû à la portance générée par ceux-ci, avec 3 ailerons il faudrait que les ailerons aient une envergure plus grande qu'avec 4 pour maintenir la fusée stable. Plus d'envergure rendait incertain l'insertion de la fusée dans les rampes disponibles au c'space, impliquant de réduire au minimum celle-ci quand bien même il s'agisse du paramètre le plus influent sur la portance des ailerons. De plus ASTREOS sera équipée de 4 ailerons, donc cela permet de refléter des ailerons à dimensions et efforts comparables.

Conception mécanique de la fusée

Etant donné l'important diamètre de la fusée, le gain de masse a été la préoccupation majeure de la conception de la fusée. Sachant que chaque bague, et pièce pèserait lourd, nous avons eu à cœur de faire le mieux possible dans chaque partie.

L'expérience de contrôle de roulis par gaz froid, nous impose d'avoir un réservoir d'air comprimé à bord de la fusée que l'on doit pouvoir entrer et sortir de la fusée pour y remettre l'air entre les tests et surtout avant le vol.

Autrement il faudrait pouvoir brancher la source d'air comprimé à la fusée. Ce qui implique la confection d'un flexible pour accéder au réservoir à l'intérieur. De plus, il faudrait pouvoir y glisser une main pour connecter et déconnecter le flexible. Cela nous a paru compliqué, c'est pourquoi il a été préféré de sortir entièrement le système pneumatique à chaque utilisation pour simplifier la manœuvre (ce qui n'est pas si simple en fait).

Ce besoin implique l'utilisation de 2 tubes et non un seul, de façon à sortir le système de roulis sans démonter tous les autres systèmes de la fusée à chaque manipulation.



Figure : l'équipe et la fusée aux contrôles lors d'un test du contrôle de roulis

Afin de travailler facilement, il a été décidé que la fusée serait une peau porteuse de façon à ce que chaque équipe travaille sur son module indépendamment et qu'il n'y ait qu'à visser les différents segments à l'arrivée. La gestion de l'ensemble est assurée par le chef de projet qui fait en sorte que les interfaces soient bonnes.

Perseus possède des tubes en carbone déjà fabriqués, par un sous-traitant, ce qui retire du travail à réaliser. Il ne restait qu'à contacter le sous-traitant, lui fournir la position de tous les trous de fixation

pour usinage, et cela garantissait un assemblage plus rapide (du moins en théorie), mais cela impose une conception finie assez tôt dans l'année.

Le dessin initial de la fusée prévoyait que le parachute se situe en dessous du contrôle de roulis, mais en réfléchissant au comportement de la fusée lors de sa descente, il est préférable de déployer les parachutes vers le haut de la fusée, de façon à ne pas provoquer de comportement imprévisible si le parafoil est déployé mais qu'il faut ensuite les parachutes, on veut conserver la fusée coiffe vers le haut, de façon à ne pas emmêler les suspentes de tous les parachutes. Cela implique de placer le bloc parachutes au-dessus du centre de masse et non pas dessus ou dessous. On peut donc replacer les éléments de la fusée :

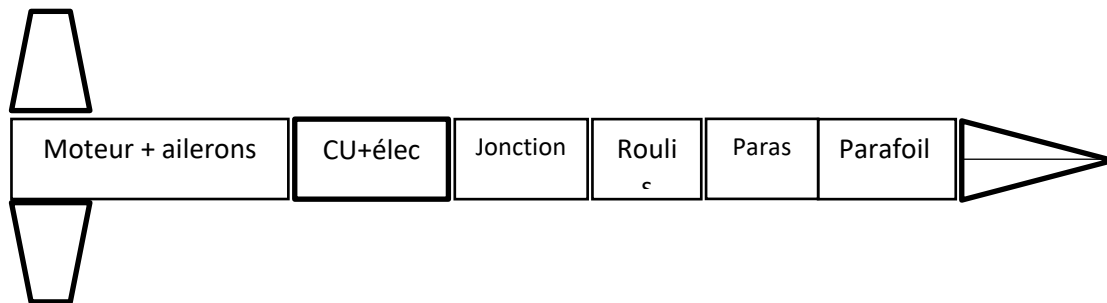


Figure : présentation de l'architecture développée

Concentrer l'électronique et la charge utile permet d'éviter d'ajouter de nouvelles bagues de fusée spécifiquement pour les cartes. Le diamètre étant important, nous pouvons facilement ajouter des éléments sur une bague, ce qui permet de les rendre multitâches et peut éviter l'ajout d'autres bagues pour limiter la masse de la fusée.

Parafoil

Afin de contrôler les suspentes de contrôle, on a décidé d'utiliser 2 servomoteurs, 1 par suspente de contrôle, pour tirer sur la droite ou sur la gauche. Le guidage est lui assuré par GPS de façon à surveiller et assurer le maintien dans la zone de descente autorisée par le CNES. Il n'y a pas de risque de coupure avec le GPS car l'accélération subie par la fusée risque de ne pas dépasser les 5g, voir d'être à 4g (limite acceptée par le gps).

Le choix de la voile est simple puisqu'il n'existe qu'une seule voile capable de supporter 20 kg : Opale Paramodel Hybrid 5.2. D'autres modèles existent mais se limitent à 10 kg ou moins, ce qui est trop juste pour notre projet. Il s'agit de voiles faites pour l'aéromodélisme, ce qui va rendre compliqué le contrôle depuis la fusée, mais il s'agit déjà de voir comment la voile se déploie de la fusée, autrement il faudrait développer une voile sur mesure, ce qui est compliqué dans les délais impartis.

Le système est constitué d'une bague en aluminium, à laquelle sont attachés toutes les suspentes du parafoil via un anneau de levage vissé dans la bague, excepté les suspentes de contrôles, toutes deux reliées à un servomoteur par l'ajout d'un bras de servomoteur imprimé pour enrouler le fil autour. En dessous est accroché une plaque en plexiglass qui sert de support à l'électronique nécessaire au fonctionnement de l'expérience.

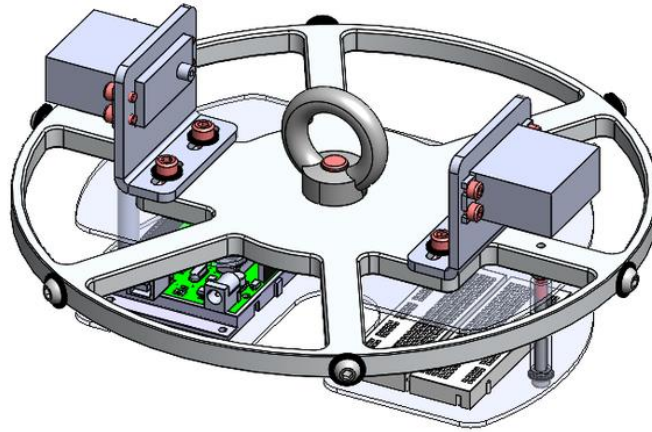


Figure 3 : support du système de parafoil

La voile est pliée dans un sac de tissu posé par-dessus la bague en aluminium, sac entouré de tuyaux en pvc pour guider le sac droit et vers le haut de la fusée. Afin d'éjecter le parafoil, un deuxième parachute est nécessaire : l'extracteur. Il s'agit d'un petit parachute attaché au parafoil, qui doit sortir en premier pour qu'une fois bien tendu, il tire le parafoil en dehors de la fusée. Son rôle est aussi de ralentir la fusée et la stabiliser pour que le parafoil ait le maximum de chances de bien se déployer.

Ainsi, l'un des tubes en PVC est plus gros que les autres et sert à stocker l'extracteur. En fait ce tube est un canon à parachute, puisque l'extraction se fait via un système pneumatique actionné par cartouche de CO2 telle qu'utilisé en cuisine ou en airsoft. Entre la cartouche et le tube se trouve une électrovanne fermée, qui n'est activée qu'en étant alimentée en 24V. ainsi il faut visser la cartouche de CO2, qui est alors percée dont le contenu se vide dans le système. Un manomètre permet de vérifier la pression à l'intérieur, et une valve de purge est accessible manuellement depuis l'extérieur.

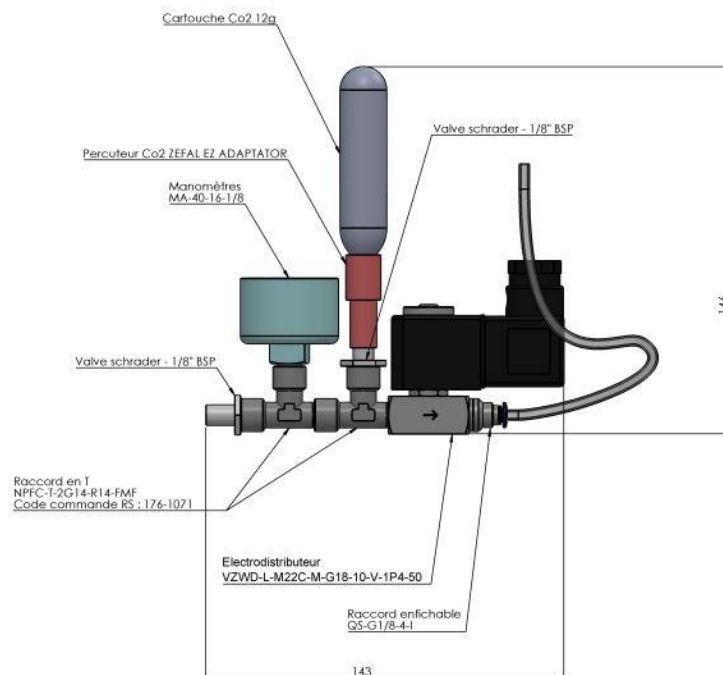


Figure : CAO du système pneumatique d'éjection de l'extracteur

Le tuyau est relié au tube par en dessous, le parachute extracteur plié dedans, le tout maintenu fermé par un bouchon amovible qui saute lorsque le CO2 est libéré dans le tube. Cela fait sortir le parachute avec force pour que celui-ci tende la sangle qui le relie au parafoil et le tire dehors.



Figure : CAO du système de parafoil piloté

Afin d'assurer l'ouverture, la coiffe est réalisée en 2 parties, chacune étant fixée au tube par une charnière en acier, plaquée à chaque demi-coiffe par une demi-bague en aluminium. Côté tube une bague en aluminium assure le maintien des charnières plaquées au tubes mais permettant de garder assez d'angle d'ouverture.

Pour maintenir l'ensemble fermé, une serrure de porte est utilisée. Alimentée en 12V celle-ci se déverrouille, permettant alors à un ressort de d'écarter légèrement les demi-coiffes, le vent se chargeant de poursuivre l'ouverture. C'est à partir de là que le canon à parachute est activé, entraînant l'extracteur puis le parafoil.

Enfin pour assurer que les demi-coiffes puissent pivoter et s'ouvrir, sans percuter le tube, il est décidé d'ajouter une sorte de joint (en jaune sur l'image qui suit) qui permet de combler l'écart entre le tube et la coiffe. Ce « joint » est réalisé en impression 3D stéréo lithographique avec de la résine souple, évite que l'air ne rentre dans la fusée et laisse l'écart nécessaire pour la charnière et le pivot.

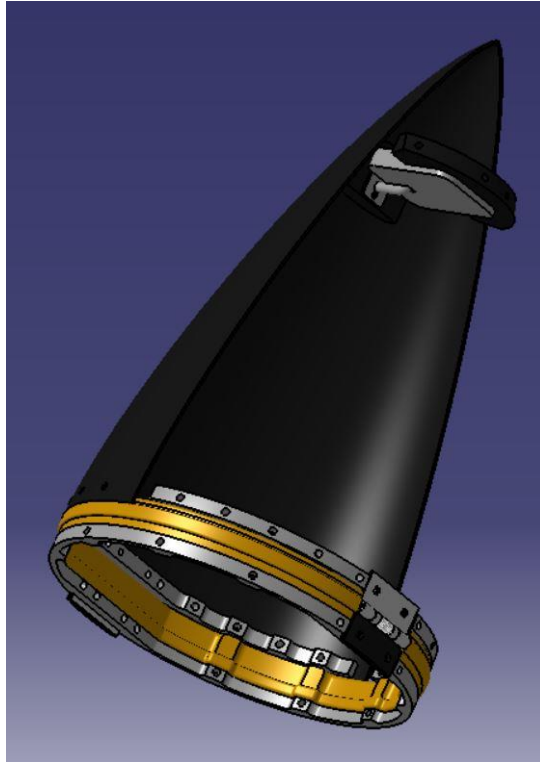


Figure : CAO du système d'ouverture de coiffe

Système de Parachutes

L'équipe d'étudiants travaillant sur le sujet, propose de déployer 3 parachutes au lieu de 1 seul. Est-ce réellement nécessaire et pertinent ? Pas du tout, mais inspirée par les capsules de vol habité, cette idée a le mérite d'être originale au c'space et d'être marrante, c'est pourquoi elle a été validée. Une seule condition nous est imposée : que 2 parachutes suffisent pour ralentir la fusée si l'un des 3 a un problème.

A partir de là, nous allons développer un bloc de parachutes avec des trappes latérales classiques comme effectué généralement au c'space en se basant sur le cahier des charges et les recommandations de planète sciences. Plusieurs autres options existent, mais il a été préféré de rester « simple » sachant beaucoup d'autres éléments sont déjà complexes sur le projet.

Le bloc se compose de 3 cases parachutes, 3 trappes avec un seul actionneur commun aux 3 trappes sur la même bague en aluminium où sont fixés les parachutes. Les conseils de planète sciences indiquent une ouverture de la trappe parachute d'un angle de 120 degrés, nous nous limiterons à 50 degrés pour éviter d'affaiblir le tube au niveau des parachutes.

Le principe est simple : les 3 cases parachutes sont fermées par une trappe maintenue fermée par une pièce en Y à 3 branches chacune à 120 degrés de l'autre qui vient se loger dans une petite pièce en forme de U attachée à la trappe. De l'autre côté de la trappe se trouve une languette qui permet de tenir le tout fermé. La mise en place demande simplement qu'une fois le parachute rangé dans sa case, de glisser la languette du côté opposé à la pièce en Y, puis plaquer la trappe sur l'ouverture et enfin actionner le servomoteur pour que la pièce tourne et verrouille les trappes.

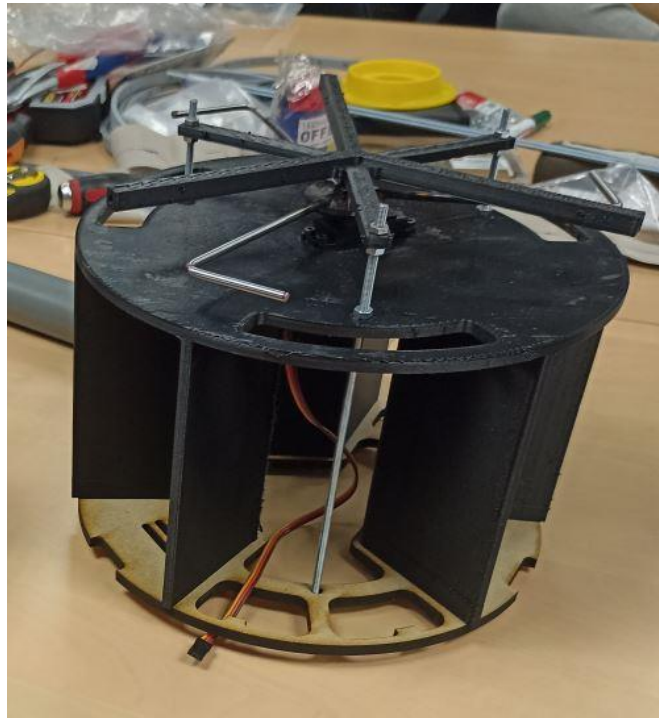


Figure : bloc parachutes de la fusée avant l'usinage de la bague en aluminium

Le dimensionnement des parachutes est relativement simple en utilisant la formule du cahier des charges, nous avons besoin d'une vitesse de descente comprise entre 5 et 15 m/s, ce qui impose une surface parachute minimum 1.7 m^2 . Cependant une descente à 15 m/s provoquera un impact rude, et nous aimerions récupérer la fusée en bon état. C'est pourquoi nous décidons d'augmenter la surface parachute.

De plus, il est décidé d'acheter les parachutes déjà faits, et nous trouvons des parachutes sur le site de eurospace technology où sont vendus bon nombre d'équipements pour fusée. En regardant ce qui est disponible nous trouvons que le parachute le plus adapté est un parachute « Apollo 11 NASA parachute 4 feet ». Sa surface est de 1.49 m^2 , chaque suspente peut tenir 90 kg.

En ayant 2 qui fonctionnent la fusée descend à 11.4 m/s, ce qui est convenable. Si les 3 sont bien déployés, la descente s'effectue à 9.3 m/s et si les choses se passent mal et qu'un seul s'ouvre, la descente se ferait alors à 16.1 m/s (et non pas 15 comme annoncé lors du vol simulé).

Le reste des éléments, est acheté le plus possible dans le commerce, tel que l'émerillon et la sangle. Seuls les anneaux anti-torche ont été usinés dans une plaque en aluminium.

Contrôle de roulis

Le système est composé de d'un réservoir de paintball (ayant une capacité de 1.1L jusqu'à 300 bars : Bouteille CARBONE 1.1L 4500 PSI PI ULTRALITE ARMOTECH) relié à 2 électrovannes fermées en temps normal. En sortie de réservoir se trouve un régulateur de pression de paintball (Ninja pro V2), qui permet de descendre la pression de sortie à 450 PSI (31 bars). Afin de respecter la règle SECU17, un deuxième régulateur (Régulateur LPR HPA BASSE PRESSION VERSION V2 REGLABLE 0-160 PSI OXYGEN) est placé après celui-ci pour descendre la pression de sortie à une pression comprise entre 0 et 160 PSI (11 bars).

L'utilisation du système se fera avec une pression de 5 bars, car éjecter 10 bars rendrait la fabrication des tuyères de sortie compliquée. Cela permet aussi de respecter la règle SECU13 concernant le

coefficient de sécurité de 2 de tous les éléments utilisés dans le système en se limitant à du matériel qui doit supporter 10 bars maximum, là ou tout besoin pour plus devient cher et compliqué à trouver.

Le deuxième régulateur sera alors réglé pour sortir de l'air à la pression de 5 bars. Celui-ci est relié à 2 électrovannes :

- Une pour contrôler le roulis, nous utilisons l'une des deux électrovannes, il s'agit d'une vanne 5/3 (VUVG-L14-P53C-ZT-G18-1R8L (579125) Solenoid valve de FESTO) avec centre fermé, qui est contrôlée par l'Arduino UNO du système. La vanne est toujours fermée, puis lors du contrôle, la vanne est ouverte d'un côté ou de l'autre soit pour éjecter l'air dans le sens horaire soit dans le sens antihoraire. A chaque changement de sens de rotation, la vanne repasse par la position fermée. Une sortie de la vanne est reliée à un couple de tuyères par un T de distribution, l'autre sortie au deuxième couple de tuyères par un T également. Les tuyères sont usinées en aluminium puis fixées dans l'anneau tuyère qui est au milieu de la CAO en figure ci-dessous.
- Une deuxième électrovanne 3/2 (VUVS-L20-M32C-MD-G18-F7-1C1 de FESTO) pour purger le réservoir lors de la descente. Toujours en position fermée, lorsqu'elle est alimentée, la vanne s'ouvre. Son unique sortie est reliée par un T aux deux sorties de purge qui éjectent l'air de façon opposée et normale par rapport au tube.

Au-dessus du système se trouve le support de l'électronique du système. Les vannes et connectiques utilisés sont vissés les uns aux autres qui les relie au premier régulateur vissée au réservoir.

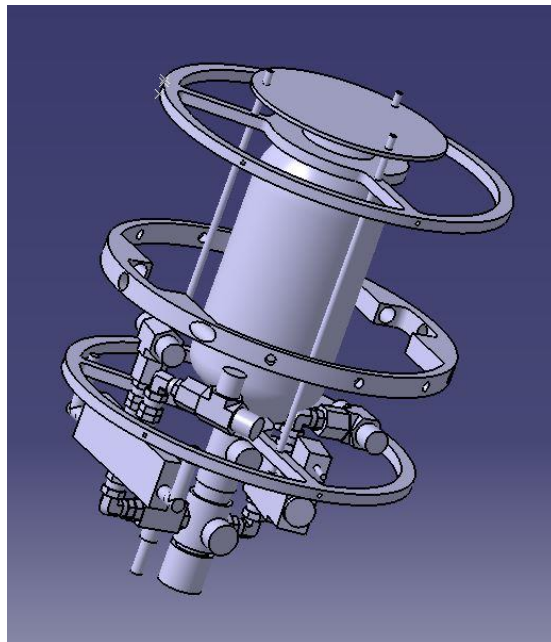


Figure : CAO du système de contrôle de roulis de la fusée

Le régulateur en sortie du réservoir (Ninja Pro V2) possède un manomètre qui peut être orienté à 360 degrés, sa position pour être visible depuis l'extérieur sera facile à positionner en face du trou prévu à la lecture de la pression dans le réservoir.

La paire Contrôleur/IMU suivante a été choisie pour effectuer le contrôle et collecter les données en vol :

- IMU : SparkFun Triple Axis Accelerometer and Gyro Breakout - MPU-6050

- Contrôleur : Arduino UNO

L'IMU permet de récupérer des mesures de vitesse angulaire autour des trois axes grâce au gyromètre et des mesures d'accélération le long des axes.

L'IMU sélectionnée contient des capteurs avec les fréquences d'échantillonnage maximales et les fréquences de filtrage (Low Pass Filter) suivantes :

Gyromètre 8000 Hz → 0.125ms
 LPF (Gyro) 256 Hz → 3.9ms
 Accéléromètres 1000 Hz → 1ms
 LPF (Acc) 260 Hz → 3.8ms

Comme on peut le voir dans le tableau, le temps limite pour les mesures est celui du filtre du gyromètre, environ 3.9 ms, ce qui est un ordre de grandeur plus court que le temps d'ouverture/fermeture des vannes ($\tau = 20$ ms).

Ces mesures sont ensuite traitées et utilisées pour effectuer le contrôle comme expliqué dans la section suivante. Pour ce faire, on utilise une Arduino UNO, qui est capable de sauvegarder les données récupérées des capteurs grâce à un shield pour carte SD.

Le signal d'activation de l'expérience viendra de l'OBC de la fusée, qui activera la carte lors de la fenêtre de contrôle de roulis et arrêtera l'expérience quoiqu'il arrive à l'apogée de la fusée. Si la purge ne fonctionne pas pendant la descente, et/ou qu'il reste de l'air après le vol, un connecteur Jack femelle, relié à la vanne de passivation, permettra en y branchant le Jack mâle de forcer l'ouverture de la vanne de passivation.

Electronique

Afin de pouvoir tester l'électronique telle que souhaitée sur ASTREOS, il faut tester un OBC avec Raspberry Pi0. La fusée est découpée en 2 cartes principales : le séquenceur et l'OBC. Le séquenceur sert pour la récupération de la fusée uniquement, et l'OBC a pour rôle de contrôler les expériences et enregistrer ce qu'il se passe à bord.

Séquenceur

Le séquenceur est réalisé de la façon la plus simple possible : une arduino Nano sert de microcontrôleur pour actionner le déploiement du parafoil à l'apogée. Cela implique de commander le verrou de la coiffe, puis l'électrovanne pour le déploiement du parafoil et enfin le servomoteur de la charge utile.

Le code est une minuterie réalisée avec arduino, qui est ajustée avec les données de stabtraj et les essais, déclenchée par l'arrachage du Jack fixé à la rampe. Le buzzer a pour rôle de biper en continu le temps de retrouver la fusée.

En cas de problème, une 4^{ème} sortie est ajoutée pour déployer les parachutes si le système de parafoil n'est pas prêt à temps et qu'il ne reste que les parachutes pour le lancement. Le système est fait au plus simple de façon à garantir le plus possible le vol même si l'on ne peut pas embarquer toutes les expériences prévues.

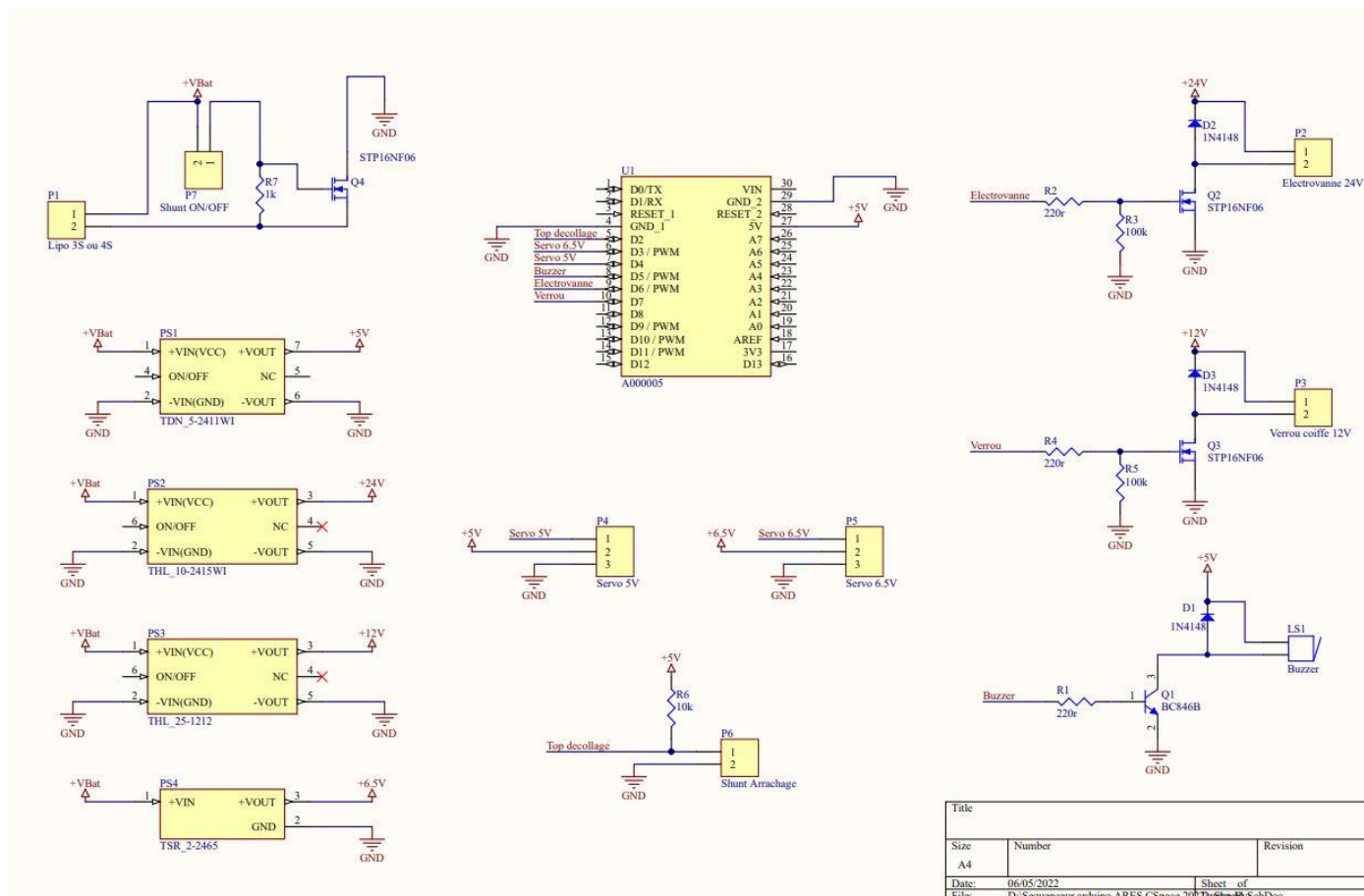


Schéma électrique du séquenceur

OBC

Comme nous voulons utiliser un parafoil piloté, les parachutes ne devraient pas être déployés, mais sans prendre de risque, il faut pouvoir les actionner. Cela est prévu avec l'OBC, qui se sert alors des capteurs pour évaluer si la fusée descend doucement ou accélère.

L'OBC est chargé de donner l'ordre pour l'activation puis l'arrêt des expériences à bord. Ainsi, en plus de l'OBC se trouve une Arduino UNO qui est la carte de commande du contrôle de roulis et un MCU ESP32 pour assurer le contrôle du parafoil.

Le GPS est directement intégré sur l'OBC pour servir d'informateur directement à la Raspberry concernant la vitesse de la fusée et sa position. Cela sert de sécurité pour les actions à mener avec le parafoil. Le GPS est un SparkFun ZED-F9R, sélectionné par le passé pour être utilisé sur ASTREOS, mais pas encore testé. De plus un baromètre est également intégré pour avoir une altitude précise en temps réel en permanence, car on ne sait pas si le GPS ne coupera pas au décollage du fait de l'accélération.

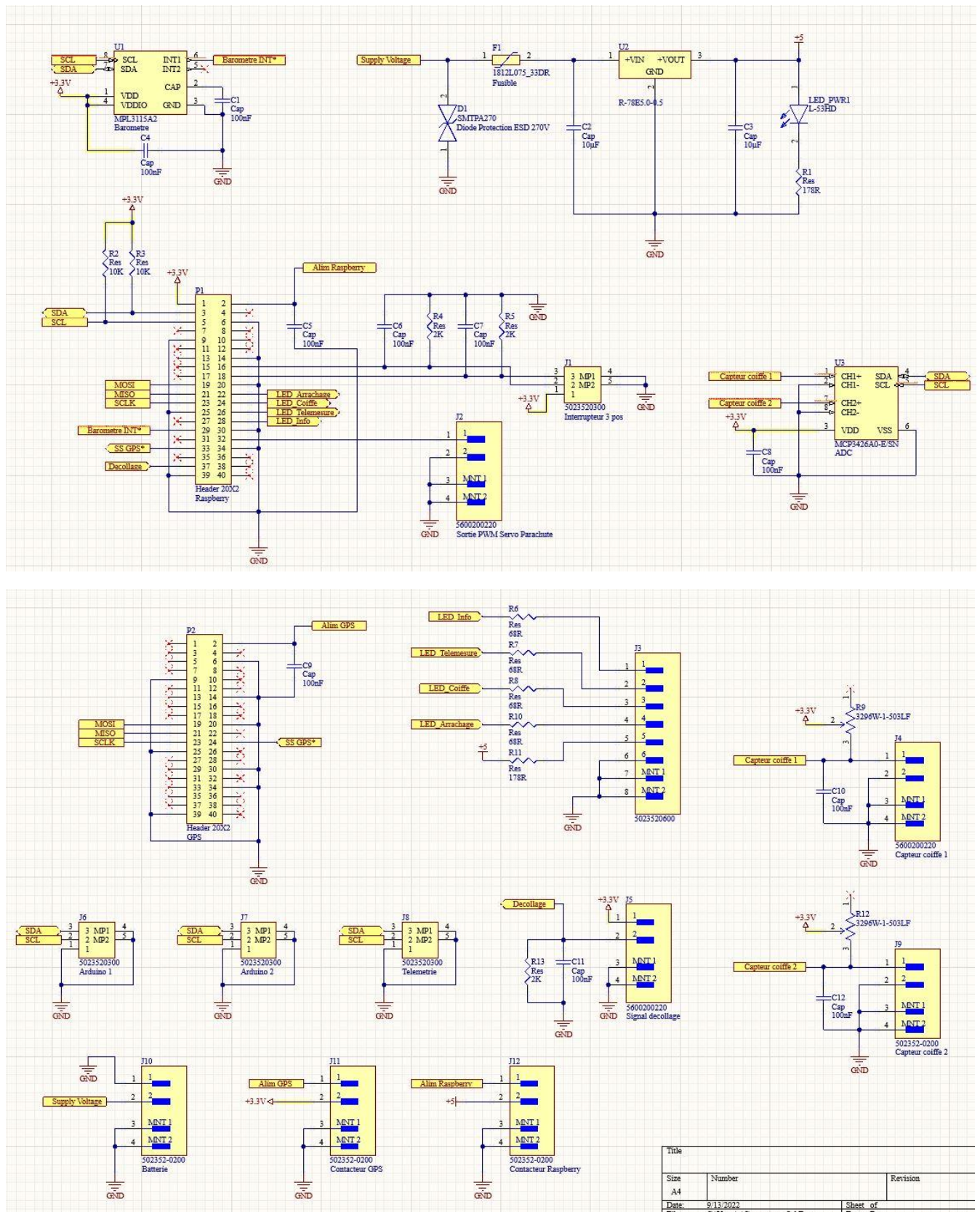


Figure : schéma électronique de l'OBC

La présence de résistances variables est liée à la volonté d'essayer le vélostât en guise de capteur. Il s'agit d'une feuille déformable qui est conductrice qui lorsqu'elle est pliée va voir sa résistance baisser ce qui en fait un capteur flexible. L'idée est de l'intégrer au niveau de la coiffe pour détecter

l'angle d'ouverture des demi-coiffe. Cela indique à l'OBC si elle s'est ouverte ou non, permettant à l'OBC de décider de déployer les parachutes.

Interface

Afin de facilement pouvoir mettre en marche la fusée, une carte à interrupteurs et LED est prévue pour faire l'interface entre l'extérieur et l'intérieur de la fusée. Les LED choisies sont toutes bleues, car c'est la couleur qu'on voit le mieux en plein soleil, qu'il y a en général sur le pas de tir à Tarbes.

Le principe est simple : un interrupteur et une LED associée pour une action définie pour la mise en marche de la fusée. La carte est la même pour l'OBC et le séquenceur, tout en gardant les connectiques séquenceur isolées du reste.

Pour cette carte, il n'y avait pas le temps d'en faire le schéma sur logiciel puis de commander un PCB, elle a directement été faite sur un plaque à pastille avec le matériel soudé et adapté au fur et à mesure des évolutions.

La carte est une rangée d'interrupteurs avec une LED placée au-dessus de chaque, dont le fonctionnement du séquenceur est le suivant :

1. Allumage de la carte, la LED associée s'allume et reste allumée dans cet état. On est en phase de préparation et installation des différents équipements à bord.
2. Pour cela, on peut mettre sur ON l'interrupteur charge utile, de façon à ouvrir la trappe et l'y insérer. En mettant sur OFF, le servomoteur se remet en position fermée, et la trappe est maintenue fermée. La LED s'allume tant que l'interrupteur est sur ON, et s'éteint sur OFF.
3. Deux autres interrupteurs suivent, ceux du verrou de coiffe et d'électrovanne du parafoil, avec là aussi la LED allumée quand l'interrupteur est sur ON et éteinte quand il est sur OFF. Le courant est envoyé en premier au verrou puis à la vanne, mais si l'on allume la vanne avant le verrou coiffe, rien ne se passe, car on ne va pas éjecter avec la coiffe fermée. Ce système sert pour tester le déploiement manuellement, mais surtout pour ranger le parafoil ou s'il faut simplement ouvrir la coiffe pour y vérifier ou changer quelque chose.
4. Lors du branchement du Jack, le buzzer émet un bref bip et la LED de l'interrupteur ON/OFF de la carte se met à clignoter par intervalle d'une seconde en continu pour indiquer le branchement et que la carte attend le décollage.
5. Quand le Jack est débranché, la minuterie démarre (apogée à 12 secondes d'après stabtraj) et la LED s'éteint jusqu'à la fin du temps indiqué ou la commande d'actionnement du verrou, puis 1 seconde après celle la vanne sont exécutées. Enfin après 5 secondes, la commande du servomoteur de charge utile est exécutée pour son éjection.
6. Un autre chrono démarre : le temps de descente de la fusée, 70/80 secondes ou la LED d'allumage clignote par intervalle de 2 secondes en continu, puis après 10 minutes le buzzer est activé en bipant par intervalle d'une demi-seconde en continu pour retrouver la fusée plus facilement pendant la récupération.

Pour relancer le tout, il suffit d'éteindre puis rallumer la carte, et tout reprendra à l'étape 1.

Il n'est pas possible que la séquence se déroule d'une autre façon grâce au code utilisé. Dès l'instant où le jack est branché, il n'est plus possible d'agir avec les interrupteurs et ce jusqu'à la fin de la séquence, à part en éteignant et rallumant la carte, ce qui fait reprendre la carte à son état initial.

Problèmes rencontrés

Le projet inscrit au c'space 2022, est lancé assez tardivement. En octobre 2021, Perseus recrutait encore les équipes qui allaient participer au projet. Ainsi, l'architecture de la fusée et la mise en place de toutes les équipes et travail ne s'est fait que courant novembre 2021, pour un début effectif en décembre.

Mais bien que certaines équipes démarrèrent en décembre, certaines n'avaient pas encore rejoint et leur travail n'avait pas démarré. A cela plusieurs raisons : Perseus (du fait d'un recrutement très tardif) proposait le projet trop tardivement aux écoles pour que celui-ci puisse être intégré en projet étudiant. S'ajoute à cela la volonté de n'avoir que de nouvelles équipes d'écoles n'ayant jamais fait de spatial. Enfin, certains étudiants étaient bien motivés, mais n'avaient pas d'association existante pour rejoindre Perseus, ce qui ajoutait des délais administratifs longs avant d'avoir accès aux outils de communications et de travail de Perseus.

Bien que l'architecture de la fusée soit établi, l'ensemble des équipes n'a réellement démarré qu'en janvier 2022.

Le problème est ensuite venu de la distance entre les différents participants. Le siège de Perseus est à Paris, mais la plupart des écoles ne se situent pas en île-de-France. 5 des 8 écoles participantes étaient dans d'autres régions, toutes différentes. Difficile donc de bien suivre et faire correspondre les différentes parties de la fusée malgré la séparation de chaque bloc de façon indépendante, puisqu'en réalité, plusieurs blocs finissent par devoir travailler ensemble.

La conception de la fusée, cela peut se faire car il suffit alors d'une bonne communication. Mais malgré tout, les emplois du temps décalés de chacune des équipes, la difficulté de réunir les équipes en réunion régulièrement n'ont pas aidé et ont même créé des problèmes et retards. A cela il faut ajouter une communication des équipes pas toujours bonne, parfois au sein de la même école.

C'est ainsi que le projet avançait avec beaucoup de retard sur le planning prévisionnel mais aussi sur un planning classique de ce type de projet (qui démarre en septembre avec une seule équipe au même endroit).

Pour ajouter aux problèmes déjà existants, les étudiants travaillant sur les ailerons ont eu toutes les difficultés à en fabriquer un. Pire, lors du démoulage il a été impossible de le sortir de son moule les obligeant à casser le moule autour pour « démouler » le premier aileron.



Figure : extraction difficile de l'aileron en fibres de lin

Nous avons eu 1 seul aileron en composites, ce qui rend le vol assez compliqué. Devant le délai et coût pour refaire un moule dans les temps, il a été décidé de commander des plaques en aluminium de 3mm d'épaisseur afin d'avoir des ailerons, qui seront gardés rectangulaires jusqu'à ce qu'on connaisse la stabilité réelle de la fusée. Le problème lors du démoulage provient d'une mauvaise application du démoulant en une zone de l'aileron, ce qui a collé le moule à l'aileron.

De plus, la carte OBC prenait également un certain retard, car il était compliqué d'intégrer la Raspberry pi0 prévue et de faire fonctionner le GPS avec celle-ci. Nous n'avions simplement pas le temps de la tester pour vérifier son fonctionnement et l'utiliser.

A chaque RCE, le projet avait une longueur de retard sur les autres clubs avec peu de chances de réussir à le réduire. C'est ainsi qu'à la 3^{ème} RCE, le projet possède un système de récupération fonctionnel et une charge utile avec système d'éjection intégrés, mais rien d'autre. Impossible d'assembler les 2 sections de tube, de fixer les ailerons, ou d'intégrer les expériences.



Figure : la fusée en montage lors de la 3^{ème} RCE

Heureusement, le système de contrôle de roulis, bien que non intégré, était déjà fonctionnel. Il y avait en effet la structure et la tuyauterie jusqu'aux vannes du système et l'électronique associée. Nous avons pu effectuer une démonstration de ce système aux contrôleurs.

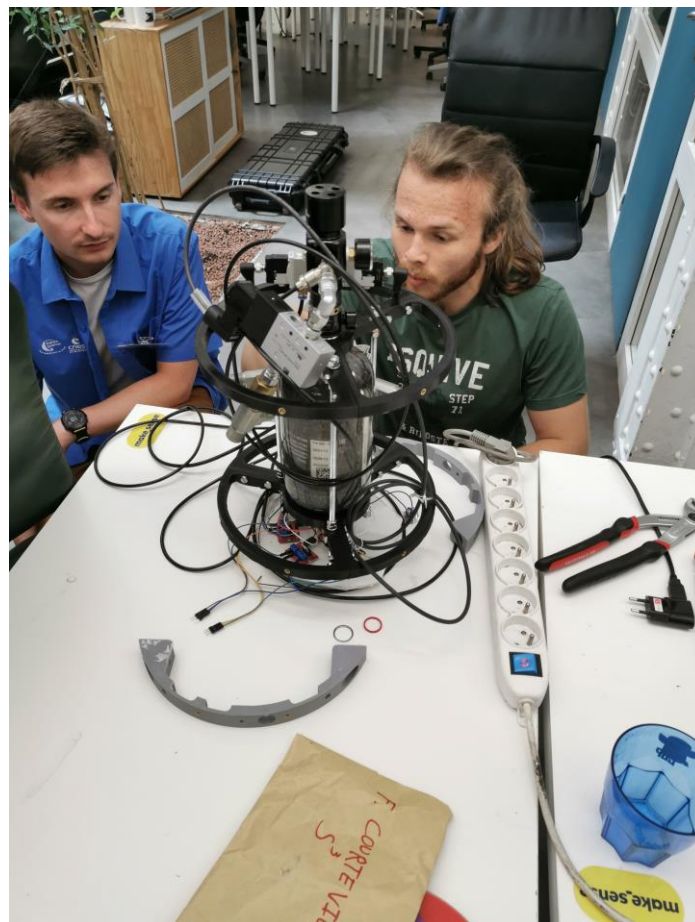


Figure : Flavien et Florian Courteville regardant le système de contrôle de roulis

Après délibérations des contrôleurs, le droit d'aller au c'space nous a été accordé sous conditions :

- Réunir une fois de plus l'équipe avant le c'space pour monter le plus de choses avant d'y aller
- Laisser tomber l'expérience de parafoil qui n'était pas prête

Ces conditions nous mettent d'accord, finir le parafoil était trop compliqué, et cet assemblage en équipe était nécessaire pour maximiser nos chances. L'abandon du parafoil entraîne l'abandon du GPS, ce qui supprime la carte OBC de la fusée. Pour simplifier les choses, on décide d'utiliser l'Arduino UNO du contrôle de roulis en guise d'OBC puisqu'il ne reste que cette expérience et qu'une UNO peut largement faire ce dont nous avons besoin.

Le séquenceur est ainsi simplifié puisqu'il ne faut que 2 sorties PWM pour activer les servomoteurs parachutes et de la charge utile. Cela retire aussi un bon nombre d'interrupteurs et de LED sur l'interface extérieure.

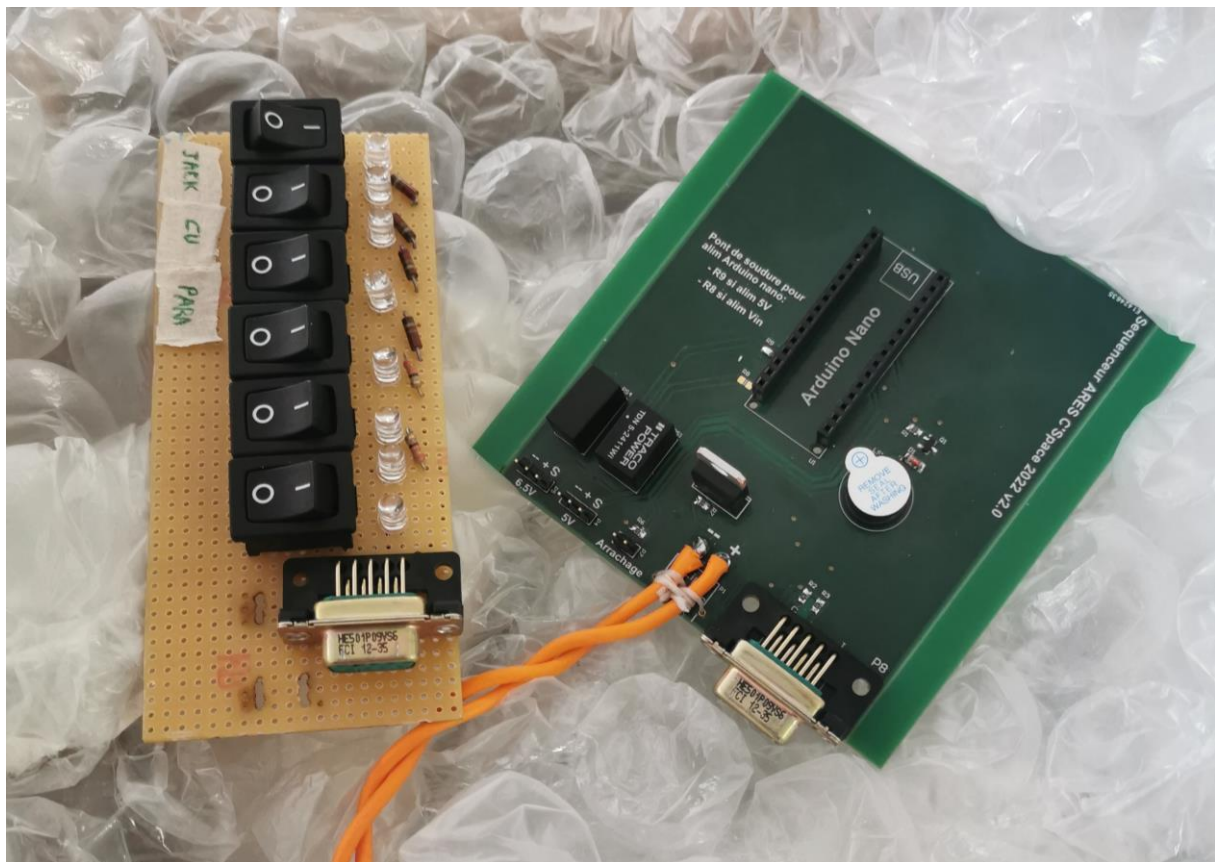


Figure : le séquenceur final et la carte d'interface adaptée

L'un des problèmes avec le parafoil étant le choix d'ouvrir la coiffe en 2 pour son éjection, ce qui a complexifié le système qui était déjà bien complexe à la base. Autre point, l'expérience de parafoil demande de nombreux tests de déploiement que nous n'avions pas pu réaliser, rendant la réussite du déploiement quasi-inexistante si nous l'avions conservé.

C'est ainsi qu'après la dernière réunion avec des étudiants du projet début juillet, la fusée a bien avancé, la majorité des éléments étaient intégrés, mais le manquant nous empêchait de faire une mise en marche complète de la fusée.



Figure : la fusée avant le c'space

C'space 2022

En arrivant au c'space, la fusée n'est pas terminée, mais est en bonne voie pour voler. Il nous reste à pleinement intégrer le contrôle de roulis (relier les vannes aux flexibles et sorties d'air), et ajuster pas mal d'éléments.

Aussi, c'est la première occasion de tester le système de roulis avec la pression voulue en vol puisque nous avons pu louer une bouteille de plongée avec de l'air à 160 bars pour la semaine.

Après avoir réussi à tout tester et intégrer, nous sommes allés aux contrôles, où la surprise a été grande lorsque nous avons découvert le poids de la fusée ainsi que le stabtraj réel. La fusée pèse alors 22.6 kg et est largement instable, bloquant la suite des contrôles.

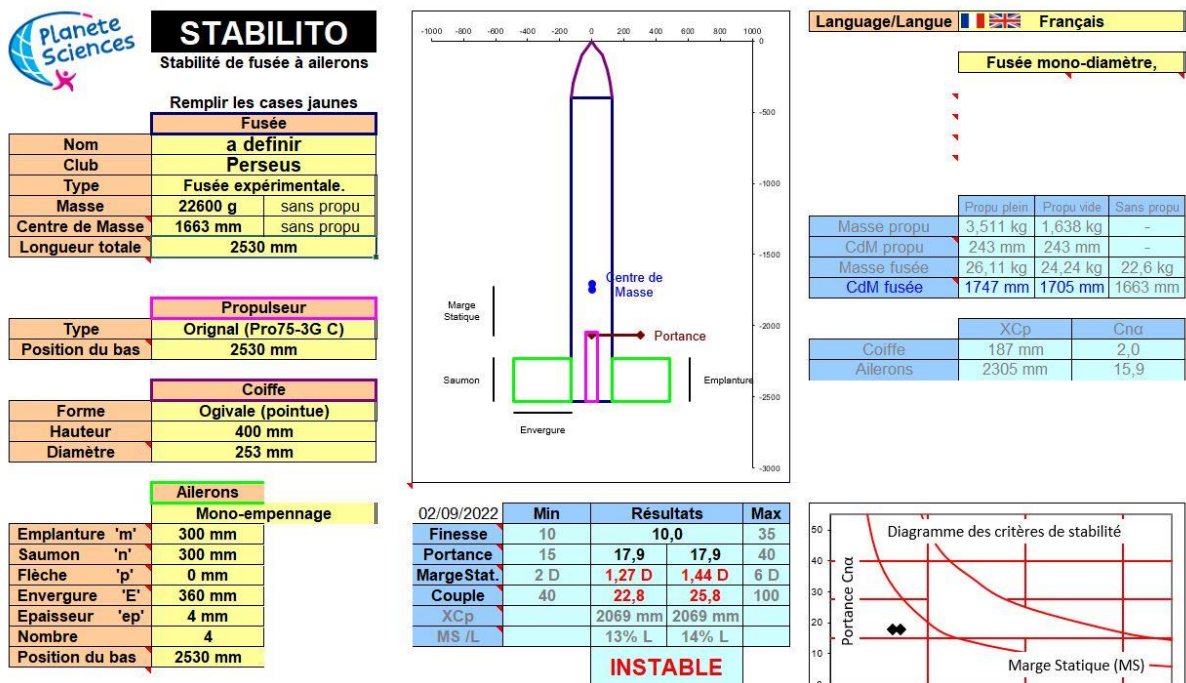


Figure : stabtraj réel de la fusée lors des premiers contrôles



Figure : La fusée aux contrôles avant les modifications

Afin d'y remédier, la solution est de monter le centre de masse vers la coiffe de plus de 30 cm, ce qui est énorme et compliqué à réaliser.

Pour corriger cela, 3 options s'offrent à nous :

- Ajouter de la masse dans la coiffe pour remonter le centre de masse
- Déplacer des éléments dans la fusée pour remonter le centre de masse
- Déporter le centre de portance en changeant la position des ailerons

La fusée est propulsée par un pro75 3G, un moteur puissant au c'space, mais malgré cela, la masse importante de la fusée, pousse le moteur à la limite de ses performances compte tenu des rampes existantes au c'space. Le cahier des charges exige que la fusée aille à 20 m/s en sortie de rampe, et en combinant la masse et la rampe la plus longue disponible (7 mètres), la fusée sortirait à peine à 20,4 m/s. Ceci nous interdit d'ajouter de la masse à la fusée et nous limite donc à 2 options pour obtenir une fusée stable, les moins faciles et pratiques à mettre en œuvre compte tenu des délais pour terminer les contrôles à temps.

Néanmoins, comme exposé précédemment, le parafoil n'est pas intégré à la fusée, ce qui nous laisse beaucoup de place en haut de la fusée. Après pesée des différents éléments, il est apparu que le système le plus lourd était le système de charge utile/batterie/électronique avec une masse de 3.4kg ! Le contrôle de roulis en revanche ne pèse « que » 2kg. De plus le système de roulis est déjà placé un peu au-dessus du centre de masse, son déplacement n'aura qu'un faible impact, alors que le système de charge utile/batteries/électronique est pile dessus. Malgré cela, les calculs montrent que nous ne pourrions pas atteindre le bon centre de masse même en remontant ces 3.4 kg.

La décision est prise de mettre le système charge utile/batteries/électronique tout en haut de la fusée, ce qui le place juste en dessous de la coiffe. Cela entraîne d'importantes modifications, qui vont permettre de remonter le centre de masse de 21 cm. C'est un énorme progrès, mais c'est insuffisant.

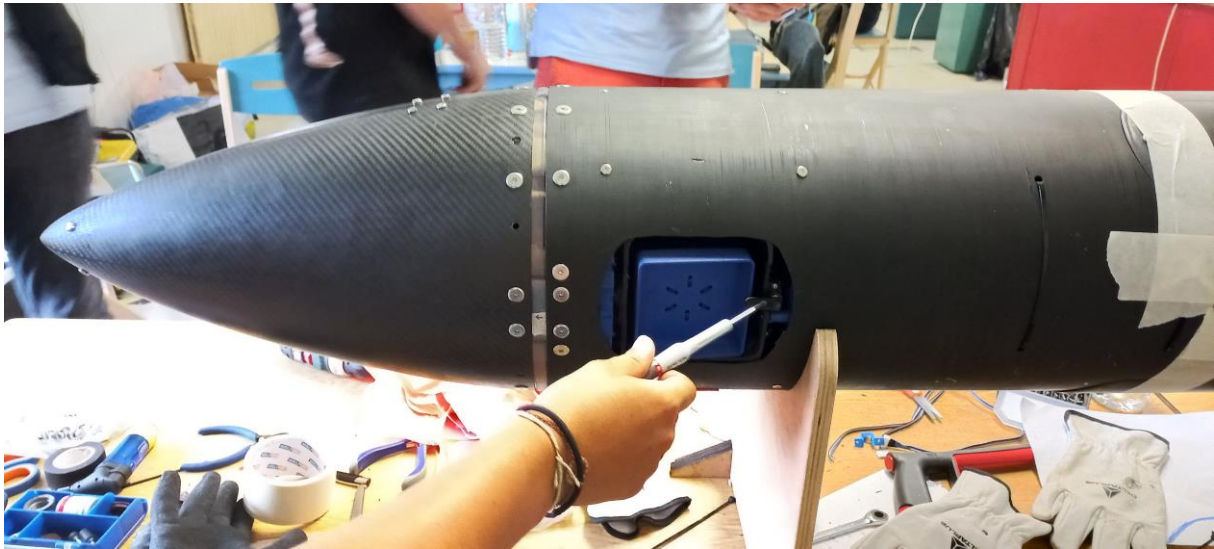


Figure : Nouvelle position du bloc charge utile/batteries/électronique

Finalement, c'est la combinaison des 2 options qui sera la solution. Les ailerons en aluminium bénéficient d'importantes fixations, mais on constate assez vite qu'il est facile de les placer plus bas sur le corps de la fusée sans avoir à percer ou changer d'éléments. Ainsi, nous descendons les ailerons de 16 cm vers le bas, ce qui descend le centre de portance suffisamment pour qu'avec le nouveau centre de masse, on obtienne une fusée stable en vol (et heureusement vu ce qu'il se passera après).

Voici la nouvelle architecture de la fusée :

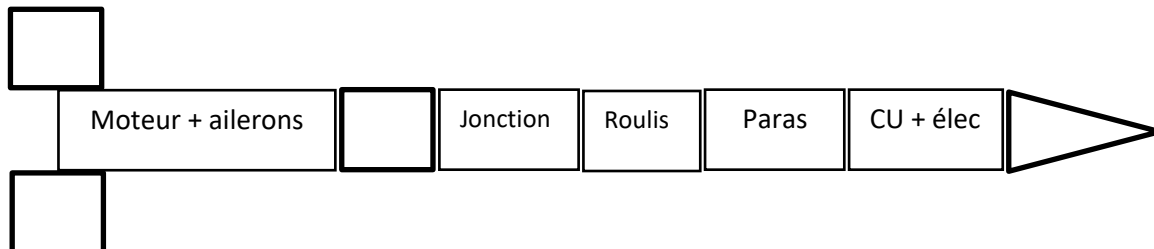


Figure : présentation de la fusée finale

L'erreur est due au retrait du parafoi, le projet était lancé et il fallait tout intégrer avant de pouvoir bien évaluer la situation, ce que nous n'avons pas pu faire avant de partir au c'space. Le retrait de cette expérience a enlevé plusieurs kilos (pour le coup heureusement sinon la fusée ne décollait pas) mais a décalé le centre de masse. Une vérification aurait dû avoir lieu avant de partir, car bien qu'il ait été possible de corriger le problème, cela nous aurait évité beaucoup de travail sur place, d'autant plus que ce n'est pas toujours possible.

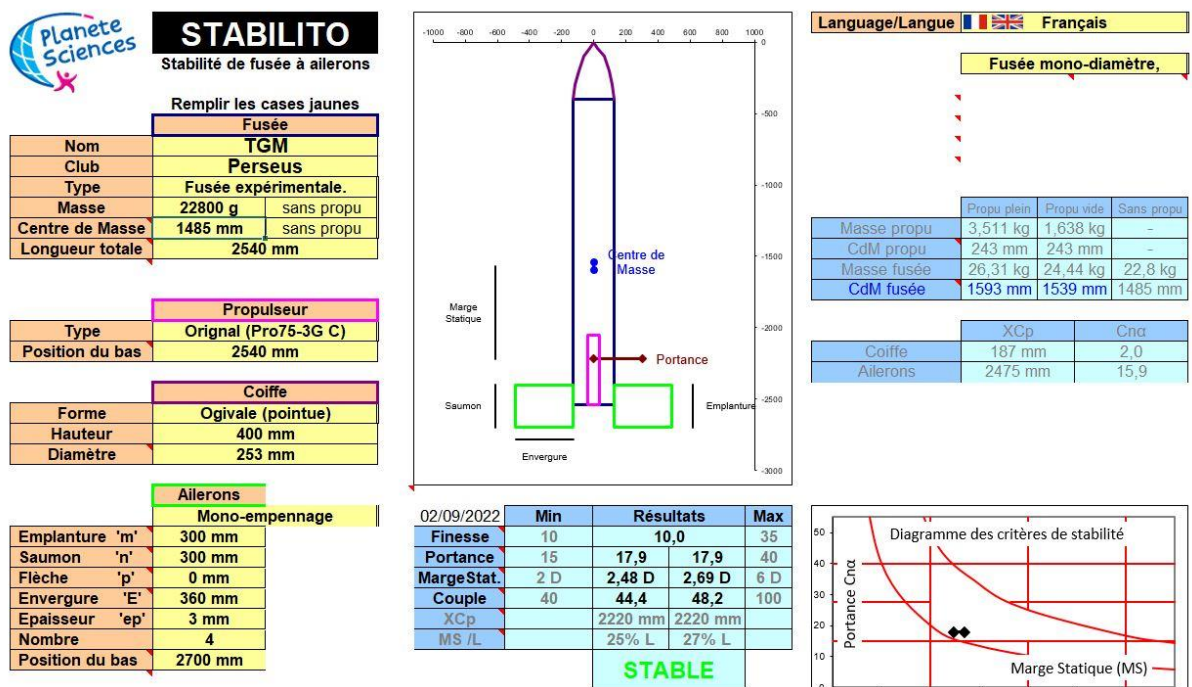


Figure : stabtraj final de la fusée

A partir de là, les petites modifications vont avoir lieu de façon à amener la fusée la plus complète possible aux contrôles. C'est ainsi que nous reprenons les contrôles mercredi soir pour aller au bout.

Les performances sont revues à la baisse, avec une altitude maximum de 550 mètres prévue, une accélération subie de 3.9g, une vitesse maximale de 334.6 km/h.

Autre mauvaise nouvelle, l'émetteur de télémessure à bord de la fusée a lâché pendant les tests, rendant le test de l'antenne compromise. Malgré une commande rapide, les nouveaux émetteurs sont arrivés trop tard pour que nous ayons le temps de les intégrer avant d'aller aux contrôles le mercredi soir.

Du fait de nombreuses vérifications à effectuer, les contrôles ont duré longtemps, dépassant la limite du jeudi midi. C'est pourquoi la fusée figurait dans les 3 dernières du c'space aux qualifications. A la fin de la vérification des différents éléments, les contrôleurs nous ont donc donné la possibilité de réaliser un seul vol simulé au lieu des 3 habituels avec la condition de le réussir sans quoi le projet ne serait pas lancé.

Après une chronologie interminable et adaptée à tout instant (bravo aux contrôleurs d'avoir tenu), avant que le premier essai de vol simulé n'ait lieu, un dysfonctionnement s'est produit, mais nous avons eu le droit de reprendre avant l'étape qui bloquait (le vol n'avait pas démarré, mais l'expérience s'était déclenchée). A la suite de quoi tout s'est bien déroulé excepté que l'éjection de charge utile ne fonctionnait pas. Face au choix de lancer dans cette configuration ou de reporter le projet, il a évidemment été décidé de lancer avec ce qui fonctionnait : l'expérience de roulis, le séquenceur et la prise de mesure dans la charge utile, tant pis pour l'éjection.

La fusée a été qualifiée jeudi à 18h avec lancement prévu vendredi matin. Cela nous a empêché de la peindre comme souhaité, mais l'essentiel était fait.



Figure : la fusée qualifiée en attendant le vol

Bilan du vol

Le vol

Le vendredi matin, nous déroulons notre chronologie, puis allons à la ZAS, où nous avons attendu le lancement de Zephyr de TopAero qui rencontrait des difficultés en rampe. Cela réduisait notre fenêtre de tir puisque les lancements se terminent à 12h le vendredi.

Mais par chance nous avons peu d'opérations à réaliser en rampe, ce qui a permis une mise en place rapide de la fusée et de son moteur par les pyrotechniciens.

La fusée a décollé à 11h57 et a réalisé un vol nominal en larguant la charge utile. Le vol est visible sur la vidéo suivante : <https://www.youtube.com/watch?v=CXCWhgXDLug>

Cependant, quelque chose a surpris tout le monde, c'est le changement de direction opéré par la fusée lors de son ascension. Peu après sa sortie de rampe, la fusée s'est inclinée légèrement à droite avant de rebasculer légèrement sur la gauche pour continuer son vol. Ce phénomène est bien visible sur la vidéo.



Le décollage se passe bien, comme montré sur ces images, extraites de la vidéo.





Figure : décollage et oscillations de la fusée

Les images sont dans l'ordre de gauche à droite, et nous montrent bien qu'après 2 mètres de vol à peine, la fusée oscille avant de reprendre plus ou moins sa trajectoire et continuer le vol, même si cela a légèrement incliné la trajectoire en dessous de la parabole prévue. Les rampes sont inclinées à 80 degrés par rapport au sol, s'en suit une demi parabole décrite par la fusée jusqu'à l'apogée celle-ci déploie son parachute (normalement). Notre parabole a un angle de départ de moins de 80 degrés, du fait de cette déviation, ce qui a provoqué le déploiement parachute au début de la redescente et non à l'apogée comme prévu.

D'après les calculs l'apogée avait lieu 12.1 secondes après le décollage, l'ouverture parachute se faisant après 11.8 secondes de vol. C'est ce qui a eu pour effet de retourner la fusée.

La raison de cette déviation est simple, l'équipe d'étude de sauvegarde du CNES avait déterminé que 6.6 mètres de rampe suffisaient, ce qui a donné une vitesse de sortie de rampe 19.8 m/s. Ce ne sont pas quelques dixièmes qui changent tout (entre 19.8 et 20 m/s), mais l'effet est direct : la fusée était trop lourde compte tenu de la longueur de la rampe, pour avoir une vitesse de sortie convenable. Le jour du lancement il y avait pas mal de vent, ainsi à peine sortie elle a pris le vent qui l'a légèrement déstabilisée, avant que les ailerons ne jouent leur rôle et que la fusée accélère assez pour être stable. On comprend mieux la règle des 20 m/s, et on pourrait dire que c'est un peu juste.

Les 3 parachutes sont correctement sortis et ont bien ralenti la fusée, permettant une descente et un atterrissage doux.

Récupération

La récupération a été facile, la fusée n'allant pas bien haut ni loin. Le fort vent ce jour a même ramené la fusée et la charge utile pendant leur descente sous parachute.

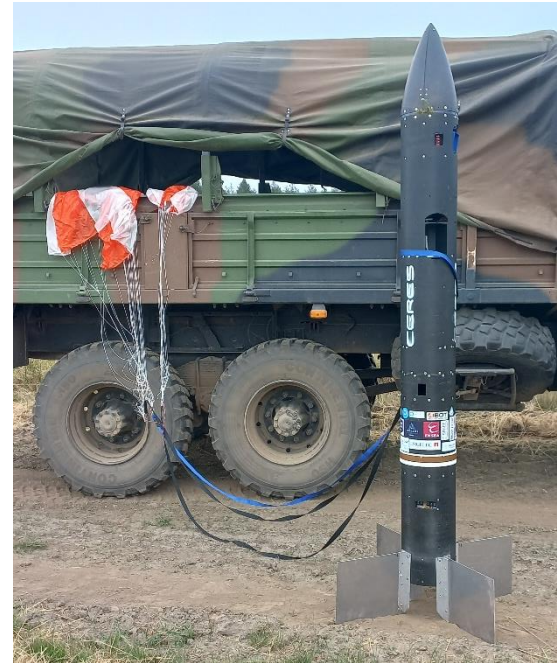


Figure : fusée lors de la récupération

Lors de la récupération nous avons voulu vérifier s'il restait de l'air dans le réservoir à bord, il restait même toute la réserve prévue lors du vol. Nous l'avons compris car la purge a mis plus d'une minute à s'écouler. L'expérience de roulis ne s'est malheureusement pas activée.

Un peu plus loin se trouvait la charge utile, depuis laquelle nous avons pu extraire la carte SD. A l'inverse du contrôle de roulis, tout a fonctionné puisque tous les capteurs embarqués ont pris des mesures qui ont bien été sauvegardées.

Autre point, les trappes des parachutes ont été arrachées à l'ouverture et n'ont pas été retrouvées.

Analyse des résultats et explications

Contrôle de roulis

Nous n'avons aucune donnée, même de la centrale inertielle embarquée qui aurait pu nous indiquer le roulis que la fusée a subi. Nous ne savons pas pourquoi l'expérience ne s'est pas déclenchée, mais nous avons 3 théories à ce sujet : soit la carte SD n'était connectée, soit la prise Jack n'était pas branchée, de l'extérieur ou de l'intérieur.

- L'hypothèse d'une mauvaise connexion en rampe, paraît peu probable puisque le branchement des deux Jack a été fait et vérifié sur la rampe. Les prises Jack étant de même type pour le séquenceur et l'expérience, Si le Jack s'était connecté puis déconnecté avant ou pendant que la rampe ait été levée, le système aurait activé l'expérience puis la purge comme prévu. Cela aurait résulté en un long pschitt continu que les pyro auraient entendus et nous n'aurions pas eu d'air en effectuant la purge après vol.
- Le problème de branchement peut aussi être à l'intérieur de la fusée lorsque l'assemblage de la fusée a été réalisé après le remplissage du réservoir d'air comprimé le matin même. En remontant la fusée, il faut remettre la pièce qui tient les 2 Jack et brancher les 2 câbles, il est possible que l'un des deux n'ait pas été connecté ou mal connecté (par chance pas celui du séquenceur). Mais là aussi, cela paraît peu probable, car il s'agit des dernières étapes de montage, que c'était mentionné sur la chronologie et qu'on insistait lourdement dessus.

- Concernant la carte SD, c'est l'hypothèse avancée par Enrico qui a codé l'expérience, car il a codé l'expérience pour que la séquence de vol de l'expérience ne se déclenche que si la carte SD est connectée. Si celle-ci n'est pas bien insérée, le programme ne déclenche aucune action. Il est fort possible qu'il s'agisse de ce problème car l'intégration de la carte SD et sa vérification n'est pas mentionnée dans la chronologie.

Nous penchons pour une mauvaise insertion de la carte SD qui a bloqué le programme de vol. Il faut ajouter que contrairement au séquenceur, l'interface de l'extérieure ne permettait pas de connaître les états de la carte expérience. Nous avons bien une LED, mais celle-ci n'avait qu'un seul état : allumée. Le séquenceur utilisait une LED bleue qui était soit allumée, soit éteinte, soit clignotait pour indiquer quel était son état (allumé, jack branché, jack débranché, etc) et nous permettait facilement de comprendre quelle allait être sa prochaine action. Cet oubli de programmation nous a induit en erreur, nous empêchant de savoir si tout était en ordre. Cela est dû à un manque de temps pour bien vérifier la séquence de mise en marche.

Dans tous les cas, le seul effet de l'expérience aurait été de souffler de l'air, et elle n'aurait pas pu contrer le roulis que la fusée a eu pendant le vol, sauf si l'on considère que l'important roulis de la fusée pendant son vol était le contrôle souhaité. Là aussi une grosse amélioration est à faire pour avoir un débit d'air suffisant en sortie de tuyère.

Nous pensons que le débit était limité par le premier régulateur du système qui est un appareil grand public de paintball, ce qui induit des limitations de performances sur lesquelles il est impossible d'agir. Il est possible de régler la pression de sortie, mais pas le débit, ce qui nous retire un paramètre de réglages. Nous avons sélectionné un régulateur fourni de manière générale avec les équipements de paintball par simplicité mais aussi manque de temps pour développer le système, cela garantissant le fonctionnement de l'expérience en toute sécurité.

Charge utile

Heureusement, nous avons la charge utile qui s'est bien éjectée lors du vol, qui a collecté les données comme prévu.



Figure : La charge utile après son vol

Le premier point est de comprendre pourquoi la charge utile s'est éjectée en vol à l'inverse de la veille lors du vol simulé. Les pièces du bloc charge utile sont réalisées en impression 3D, qui sont sensibles à la chaleur. Pour ne rien arranger, la fusée est entièrement en carbone, ce qui fait que la fusée chauffait facilement au soleil. Nous pensons que lors du vol simulé en plein soleil le jeudi après-

midi, la chaleur a pu jouer sur les différentes pièces, bloquant le loquet de la trappe. Le vendredi matin, le temps était nuageux et il faisait 24 degrés, bien loin des 33 de la veille avec un grand soleil.

Mais il est aussi possible que le choc à l'ouverture des parachutes ait provoqué l'éjection, car de base la charge utile devait être éjectée 1 seconde avant l'ouverture des parachutes, mais la vidéo montre que c'est lorsque la fusée s'est retournée que la charge utile est sortie.

Après avoir ôté le panneau latéral, il a été possible de récupérer la carte micro SD et faire le tableau des données qui est disponible dans les annexes.

Le GPS n'a pas bien fonctionné quand il était entouré de carbone mais il a réussi à transmettre la position de la sonde à son atterrissage ce qui aurait pu aider à la recherche si on l'avait perdue de vue des jumelles.

Le capteur de particules fines et moyennes n'a pas transmis de valeurs, le capteur a dû surchauffer lors de la préparation ou court-circuiter de façon inopinée.

Le reste des résultats ont été transformé en courbes dans le fichier Excel en annexe. Grâce à la centrale inertielle, on peut voir les différents états de la fusée (mise en rampe, mise à la verticale, décollage, éjection de la sonde).

Conclusion

Le projet n'aura pas été au bout de ses objectifs annoncés, mais reste malgré tout une réussite. Le démarrage très tardif combiné à un recrutement massif pour ce projet ont maintenu la fusée constamment à la limite sur tous les plans.

Faire fonctionner tout et tout le monde ensemble n'a pas été facile, mais les étudiants se sont beaucoup investis pour le projet et ont fourni le maximum possible dans les temps impartis.

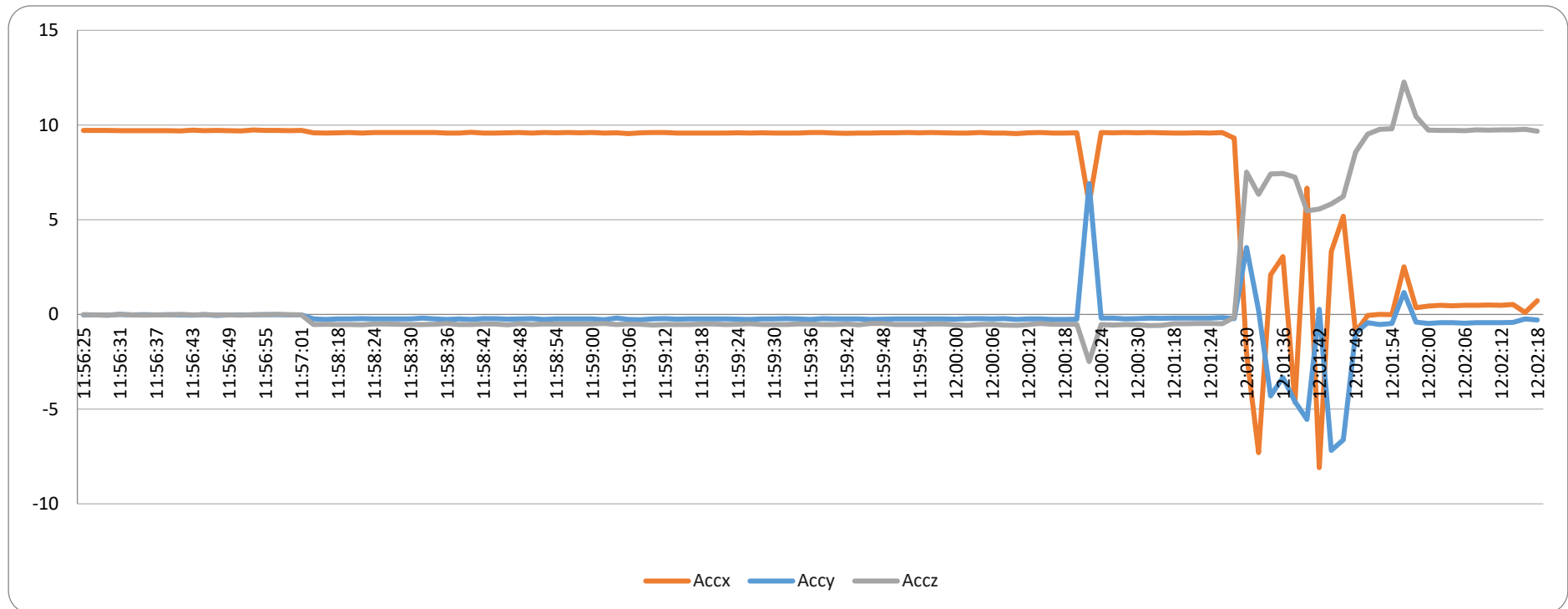
Nous avons une base solide pour poursuivre le projet pour 2023, avec les deux expériences, et en améliorant le projet sur tous ses aspects (nous allons éviter de devoir décaler le centre de masse de 30 cm l'année prochaine par exemple).

La plus belle réussite de ce projet est d'avoir réuni des nouvelles écoles et réussi un lancement, chose qui n'avait plus eu lieu depuis 2018 pour Perseus.



Annexe

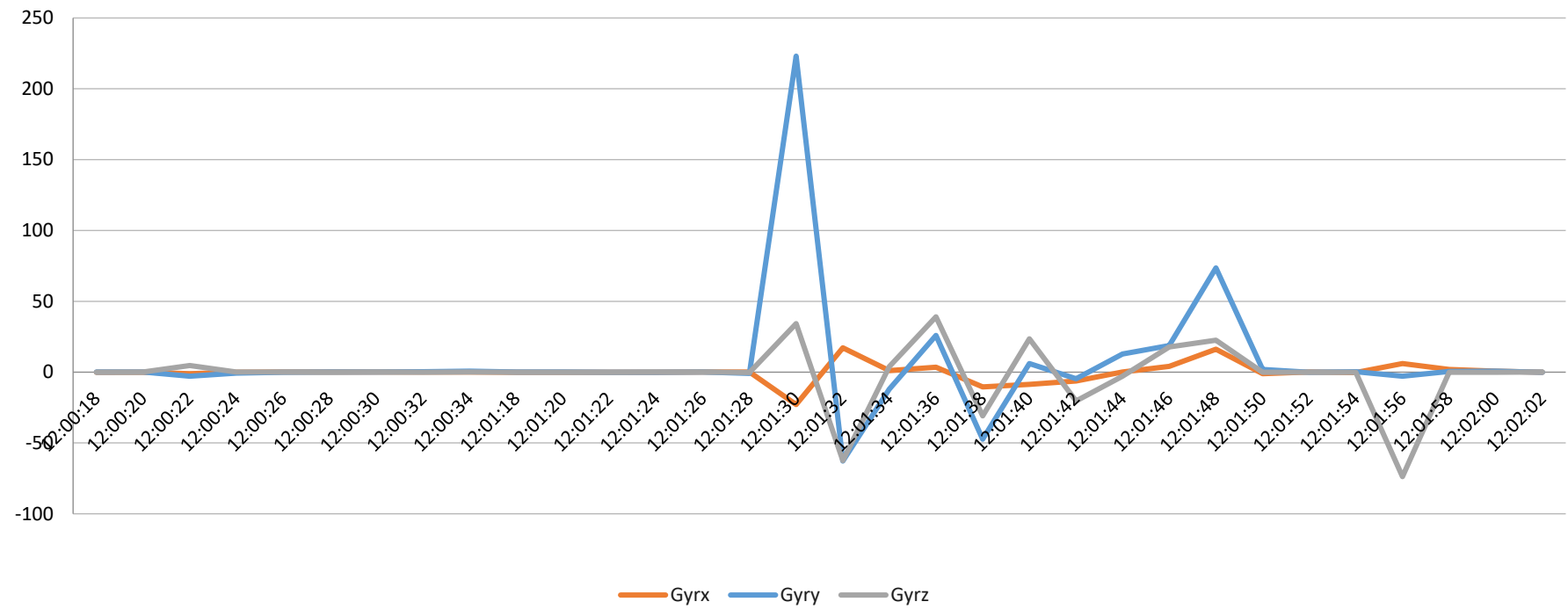
Résultat des mesures de la charge utile

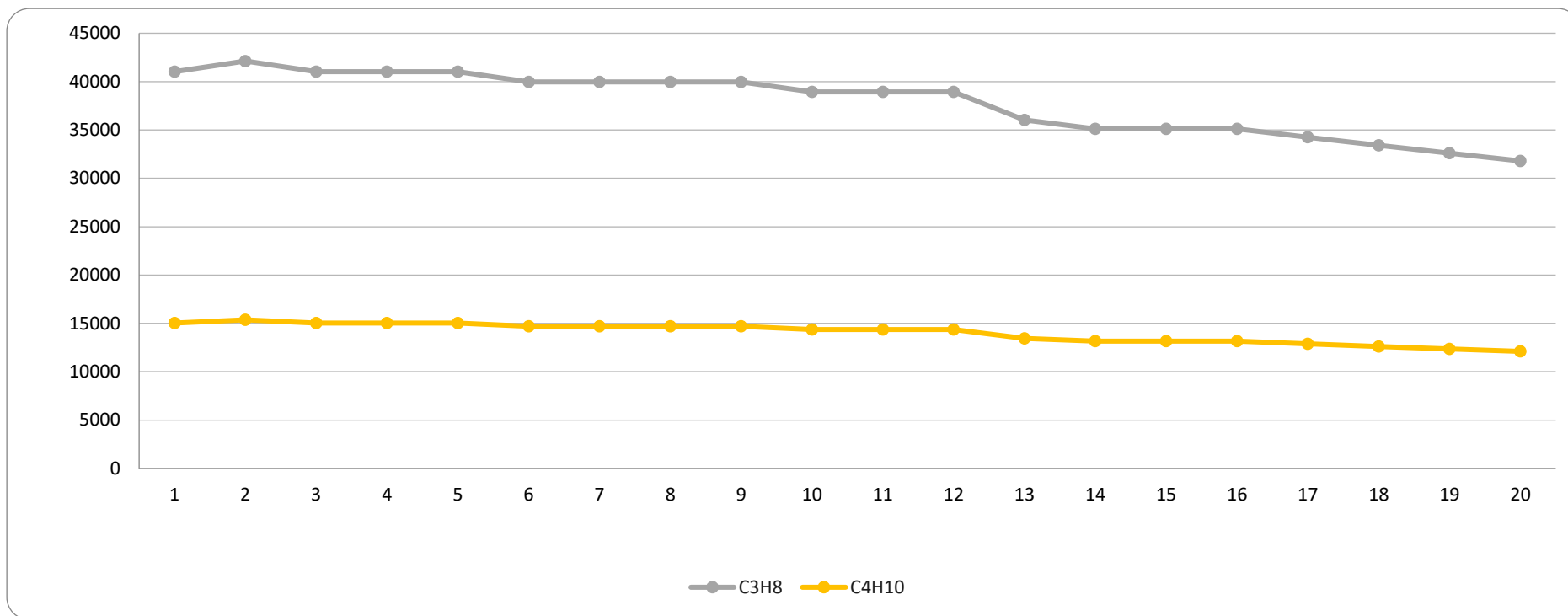


Accélérations subies par la fusée

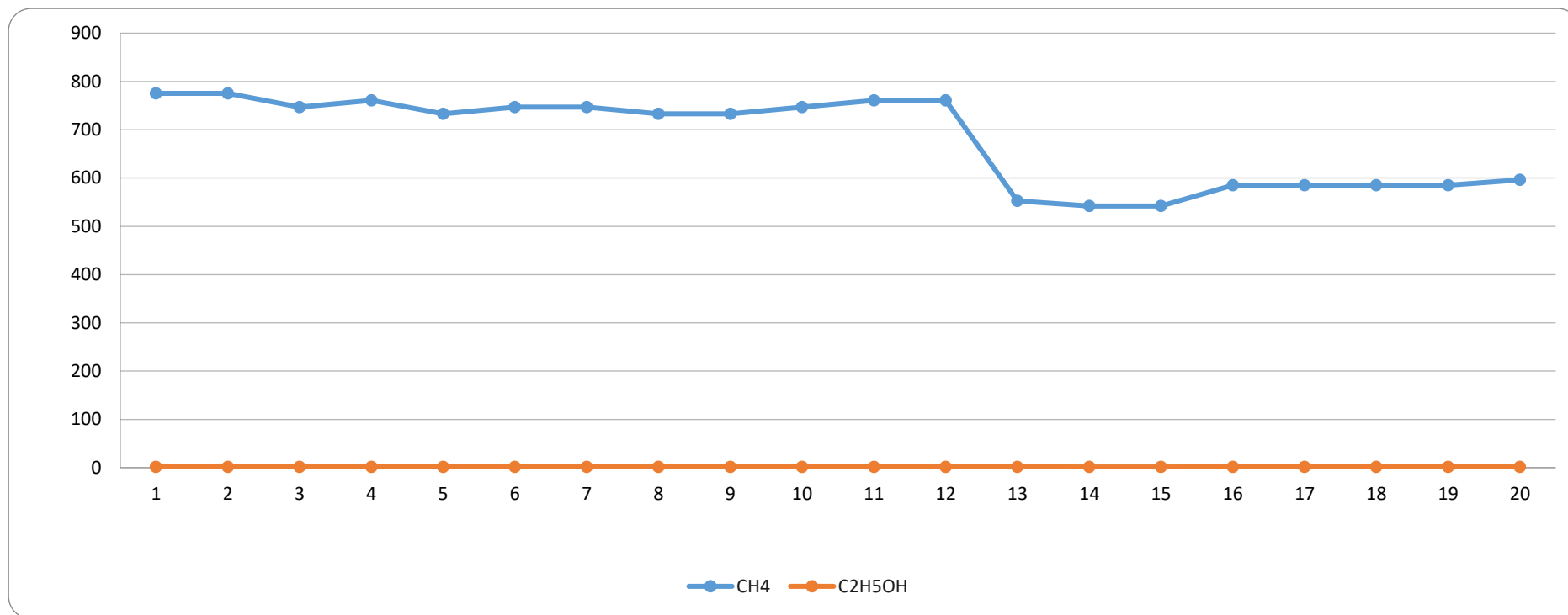


Angles d'Euler

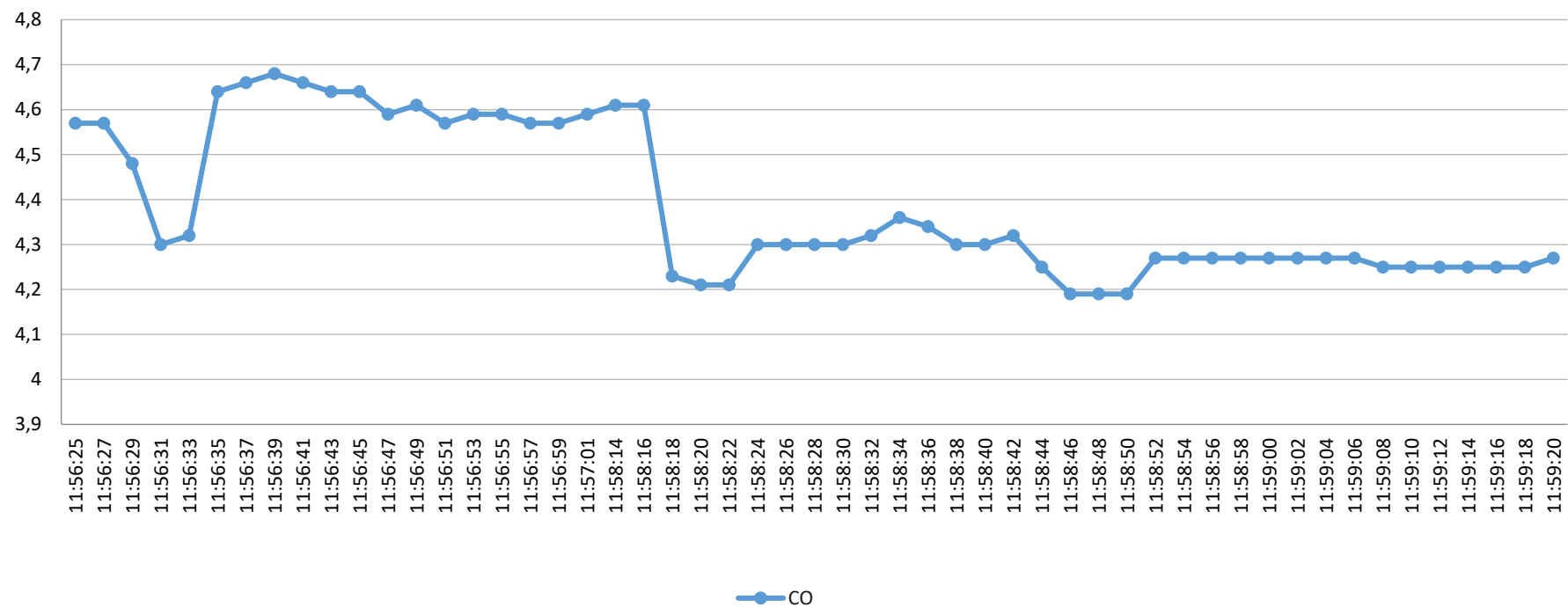




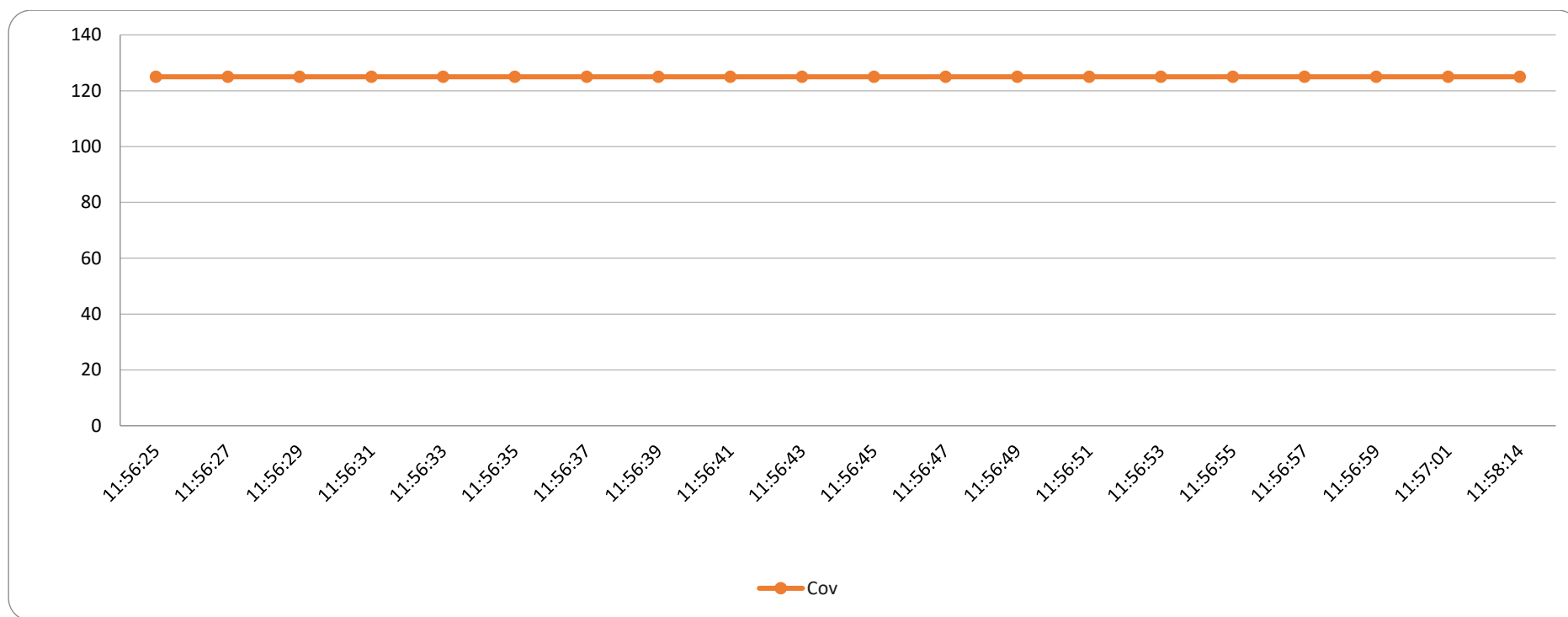
Variation de la concentration de butane (C4H10) et propane (C3H8)



Variation de la quantité de méthane (CH₄) et d'éthanol (C₂H₅OH) pendant le vol



Variation de monoxyde de carbone pendant le vol



Variation (non ici) de la quantité de composés organiques volatiles pendant le vol