



## RAPPORT DE PROJET MROM – FX-05



Image 1: Équipe de lancement du projet MROM et APEX

PIGOT BRICE

ORGER - - BLEUET MAXENCE



## Table des matières

• Introduction .....	3
• CATIA.....	4
• Structure .....	5
• SYSTEME DE RECUPERATION, SEQUENCEUR .....	8
• AILERONS/TUBE PROPU/ REPRISE PROPU .....	10
• EXPERIENCE.....	12
○ EOLE-NEXT .....	12
○ Nept'1.....	14
• C-SPACE.....	16
○ RECUPERATION DE LA FUSEE .....	18
• ANALYSE DES DONNEES .....	20
• CONCLUSION.....	22
• REMERCIMENTS .....	23
• ANNEXES .....	25
○ CHRONOLOGIE .....	25
○ Schéma Electrique & Circuits Imprimés .....	31
▪ Interface .....	31
▪ Séquenceur.....	31
▪ Eole-Next .....	32
▪ Nept-1.....	32
○ APEX LEGENDS .....	32



## ● Introduction

Le projet Mrom est né à la suite du projet Eole, en reprenant l'idée de la turbine ainsi que la production d'énergie avec celle-ci.

Les objectifs du projet MROM sont donc les suivants :

- Production triphasé grâce à la turbine, stockage de l'électricité et alimentation d'un module Bluetooth avec celle-ci
- En parallèle, analyse de la production, courant et voltage des trois phases reliées.
- Module Nept'1 d'analyse d'un fluide grâce à des caméras durant différentes phases de vol
- Caméra extérieure pour comparer la vue intérieure avec celle de l'extérieur
- Capteur d'accélération, gyroskopique, température, pression, altitude
- Il inclut aussi un module expérimentale porté par AMARANTI Malo et PAILLARD Alexis nommé APEX et ayant pour objectif la mesure, le stockage, le calcul et la retransmission par télémesure de données en temps réel

Ce projet est porté par PIGOT Brice en qualité de chef de projet ainsi que ORGER - - BLEUET Maxence en tant que co-chef de projet.

C'est un projet de l'association AéroIpsa engagé pour la campagne 2024-2025 du C'Space.

La fusée finale faisait 1m87 pour 6.7kg et a volé avec un pro-54-5G White Thunder (K1200) de Cesaroni Technology Incorporated (CTI).

- CATIA

La conception du Catia a commencé dès le mois de septembre et c'est terminé quasiment au mois de juillet.

Notre problème avec le Catia a été l'intégration de la partie électronique avec une volonté de trop optimiser les bagues ce qui a rendu des cartes électroniques très optimiser mais dur à intégrer.

Nous avons eu aussi des problèmes avec le module Nept'1 ou nous voulions intégrer une batterie LiPo, le tube contenant le liquide a étudié, une Raspberry pi et les distances de mise au point des deux caméras.

Cela a demandé beaucoup d'études et de tests d'intégration pour être sûr qu'aucun câble ne gêne la prise de vue des caméras.

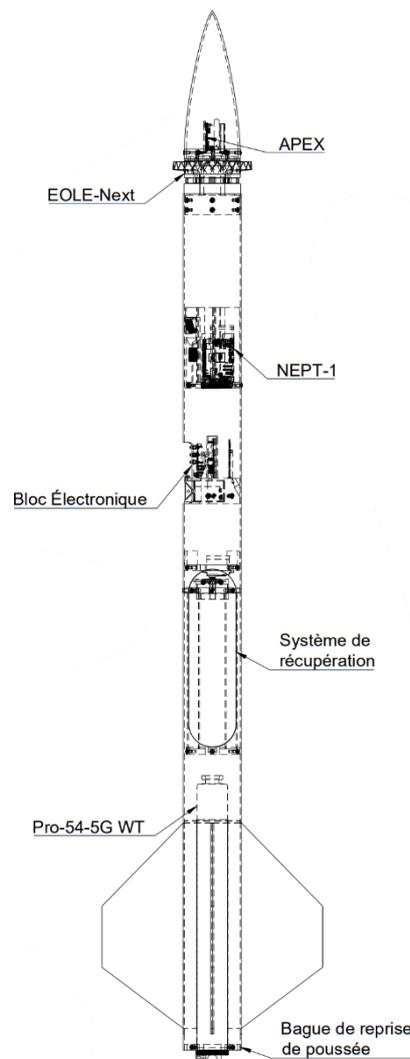


Schéma 1: Assemblage totale de MROM annoté



*Schéma 2: Assemblage de la bague électronique de MROM*

## • Structure

Pour la structure de notre fusée, nous avons décidé d'une peau autoporteuse en fibre de verre, pour la solidité ainsi que pour la simplicité dû au fait que c'est une technologie que nous utilisons fréquemment au sein de notre association.

Nous avons opté pour une fusée faisant un diamètre de 100mm ce qui nous permettait de ne pas trop changer les pièces emprunter à la fusée EOLE pour la turbine, cela nous permettant aussi d'avoir une place raisonnable pour le reste des expériences.

Nous avons donc créé nous même le tube en fibre de verre en le moulant sur un tuyau en PVC, nous avons utilisé de la fibre de verre de 200g/m<sup>2</sup>. Pour fixer chaque couche ensemble (7 couches pour notre fusée) nous avons utilisé une résine auto-cuisante une fois exposé à un durcisseur.

Pour ce projet, nous avons réalisé deux tubes différents.

Le premier a été réalisé en janvier en prévision de la RCE2.



Nous avons utilisé un tuyau de PVC déjà utilisé l'année précédente pour le projet EOLE.

Pour être sûr que le tube en fibre puisse se dissocier du tube en PVC, nous avons appliqué un film transparent de la longueur de notre tube pour lui permettre de sortir plus simplement.

Sur ce film, nous avons appliqué chaque couche de fibre de verre.

A la fin de cette opération, nous avons appliqué un second film transparent de manière à évacuer la résine restante.

Pour sortir ce tube, après l'avoir mis à l'extérieur pour un certain temps, nous avons pu l'extraire du tube en PVC très simplement grâce à la technique du film transparent.

Cependant, nous avons rencontré 2 problèmes, le premier est que la technique du film transparent sur le dessus nous a fait accumuler de la résine tout au long d'une bande de 1cm sur toute la longueur du tube. Cela nous a obligé à la poncer sur toute cette longueur et le peaufiner au mastic.

Le second problème et le plus important est le fait que nous avons utilisé un moule qui a subi les effets de la chaleur due à un mauvais entreposage ce qui a conduit le tube en PVC à faire « une banane » ce qui a conduit notre tube en fibre à suivre et toujours avoir cette effet banane.

Ce problème nous a obligé à refaire un nouveau tube, retardant d'une manière non négligeable le projet.

Pour ce nouveau tube, pour éviter le fait que la résine accroche au moule, nous avons décidé d'utiliser un agent de démoulage semi-permanent.

Pour cela, nous avons appliqué 5 couches au pinceau espacé de 5 minutes chacune.

Après avoir effectué les différentes couches de fibre de verre, nous avons par-dessus mis du tissu d'arrache, c'est un tissu que nous devons appliquer très serré et qui va boire l'excès de résine.

Tissus que nous retirerons une fois la résine sèche.



Sortir ce second tube fut plus dur que le précédent ce qui me renforce dans l'idée que la première idée est mieux (film transparent) cependant, la technique du film dépend de la qualité de celui-ci est peut-être très compliqué à appliquer.

Nous avons donc récupéré un tube plutôt bien, avec une flèche naturelle de 13mm pour 1m60 une fois assemblé ce qui est tolérable.

Nous avons eu quelques traces du au tissu d'arrache qui a rendu bien moins propre que celui du film transparent extérieur mais qui est facilement rattrapable avec du ponçage

## ● SYSTEME DE RECUPERATION, SEQUENCEUR

Pour la conception du séquenceur, comme nous souhaitons un système simple et rapidement effectué, il a été commandé, soudé et testé dès janvier. Nous avons opté pour un Arduino nano every qui gère un servo moteur.

Pour l'ouverture de celui-ci, nous avons opté pour un système simple, un compteur de temps avec la fonction millis().

Quant au minutage de l'ouverture, nous avons opté pour 16.5s alors que nous avons une apogée de 15.7s, ce qui nous permet d'avoir un peu de temps en micro-gravité (ou ce qui s'en approche) pour notre expérience nept'1.

De plus, nous avons quasiment 0.5s de temps entre l'ordre de la Arduino, l'action du servo moteur et l'ouverture de la trappe.

Quant à la partie système de récupération, nous avons opté pour un parachute en croix fais main qui nous permettait de descendre à 13.7m/s.

L'entièreté de ce parachute tient à l'intérieur de la fusée au sein d'un bloc parachute composé en Pla avec une bague de reprise de parachute usiné en aluminium en bas de bloc.



Image 2: Bague de reprise de parachute vue de côté

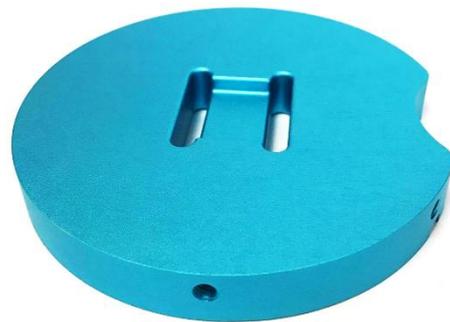


Image 3: Bague de reprise de parachute vue du dessous

Pour ouvrir cette trappe latérale, nous avons opté pour une position de servo où la pale d'ouverture usiné en aluminium est perpendiculaire à l'axe de la fusée, pour résoudre le problème d'Eole, dont la trappe s'était arrachée à l'ouverture, et qui avait une retenue par le servo suivant l'axe de la fusée.

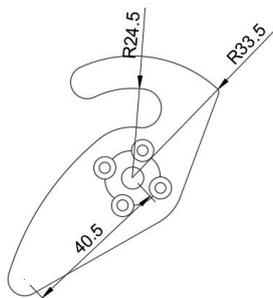


Schéma 2: Pale d'ouverture vue du bas

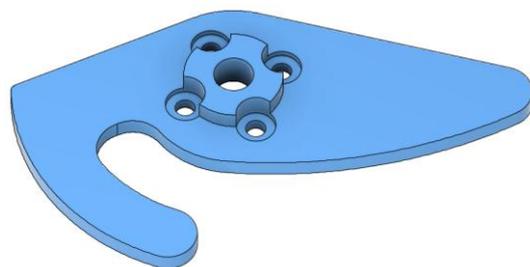
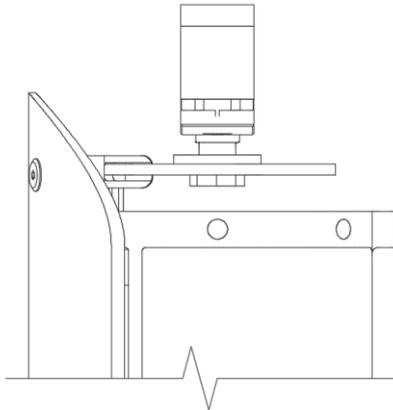


Schéma 3: Vue isométrique de la pale d'ouverture en couleur

Il nous a fallu de multiple répétition pour avoir une bonne distance avec la pièce en Pla visé au tube qui permet à la trappe de ne pas se prendre trop d'air.

Après environ une dizaine de test, nous avons enfin réussi à faire une pièce quasi parfaite.



*Schéma 4: Vue de coté de l'assemblage de verrouillage de la trappe parachute (avec trappe, visses, bague para, pièce de verrouillage pale, pale, moyeu et servo)*



*Schéma 5: Vue isométrique N-E en couleur de l'assemblage de la trappe parachute (avec trappe, bague para, pièce de verrouillage pale, pale, moyeu et servo)*

De plus, afin de former la trappe, nous avons découpé dans le premier tube que nous avons fait. Cependant nous avons eu une petite différence de diamètre ce qui a empêché la trappe d'être parfaitement ajuster ce qui nous as obligé à fixer des pièces en Pla autour de l'ouverture pour assurer la tenue de la trappe ainsi que pour s'assurer qu'aucun air n'entre dans le tube pendant le vol.

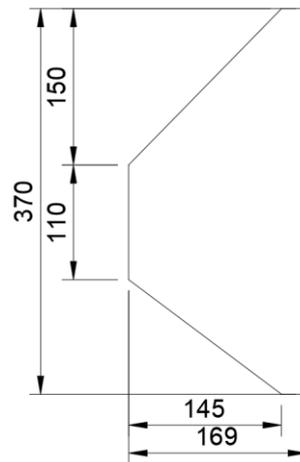
## • AILERONS/TUBE PROPUL/ REPRISE PROPUL

Pour notre bloc de propulseurs, nous avons décidé de faire une technique déjà utilisée pour nos mini-fusées ainsi que sur les fusex Fast Forward et SP-01.

Cette technique est celle des ailerons collés. Ces ailerons seront collés sur un tube qui guide le propulseur et nous allons encoller les 4mm d'épaisseurs des ailerons sur toute la longueur de l'implanture via de la résine que nous utilisons aussi pour coller notre fibre de verre.

Nous avons donc moulé notre tube en fibre de verre sur un casing de pro 54, via la même technique que nos tubes en fibre de verres. Pour cela, nous avons réalisé 7 couches de fibre pour un diamètre d'environ 1.5mm.

Pour les ailerons, nous avons utilisé des plaques de fibre de verre de chez Ahltec Leonhardt.



*Schéma 6: Dimension des ailerons (en mm)*

Après avoir collé les ailerons à l'intérieur du tube de la fusée sur le côté extérieur du tube propulseur ainsi que sur le côté extérieur du tube de la fusée, nous nous sommes occupés de la bague de reprise propulseur.

Nous avons pour cela fait usiner une bague en aluminium qui sera visé en bas de la fusée en contact avec ce fameux tube propulseur.

La technique initiale pour ce système de tube de propulseur est de collée une bague en Delrin ou fibre de verre de la même plaque que les ailerons. En faisant cela, c'est tout le tube propulseur et donc le collage avec la résine rapide qui reprend les forces de la propulsion.

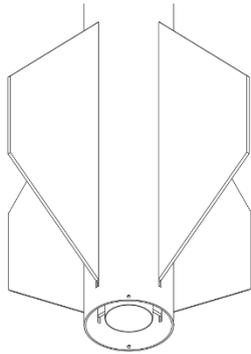


Schéma 7: Assemblage ailerons & tubes propulseur avec peau

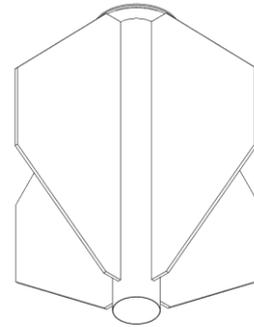


Schéma 8: Assemblage ailerons & tubes propulseur sans peau

Cependant avec cette technique il est compliqué de fixer l'attache de tenue du moteur.

Pour notre système d'attache moteur, nous avons opté pour une pièce en aluminium adapter à la bonne taille qui viens se glisser sous le propulseur et se verrouiller grâce un demi-tour de tournevis à tête plate.

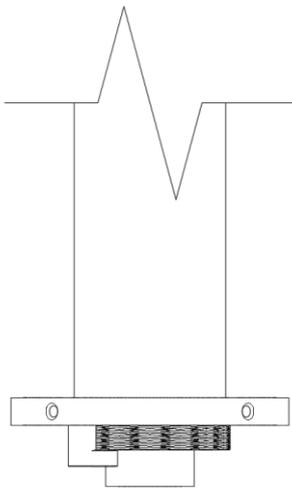


Schéma 9: Assemblage propulseur, bague de reprise de poussée et système d'attache propulseur

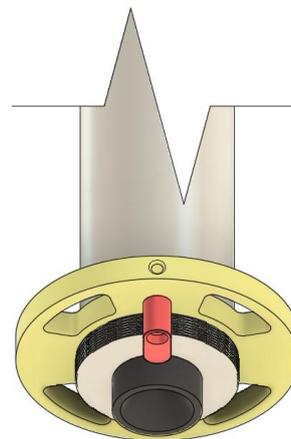
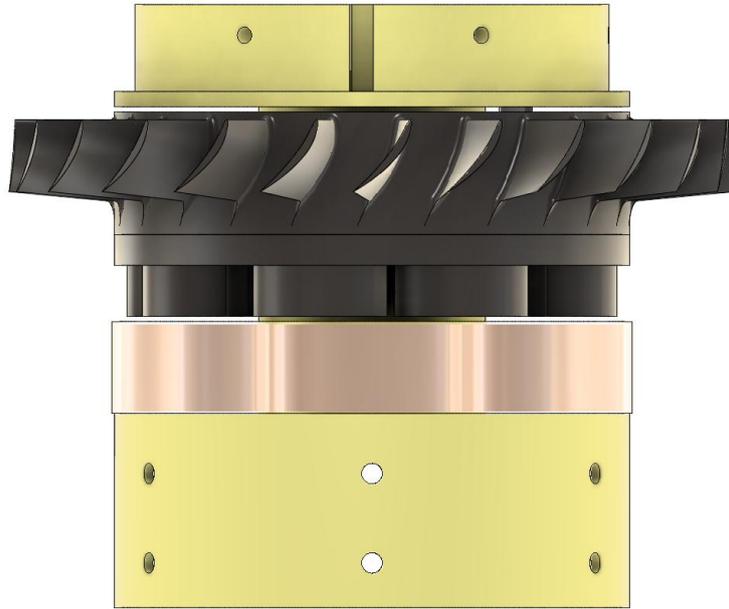


Schéma 10: Vue isométrique S-E en couleur de l'assemblage propulseur, bague de reprise de poussée et système d'attache propulseur

## ● EXPERIENCE

### ○ EOLE-NEXT

Pour l'expérience d'alimentation du module Bluetooth grâce à la turbine, nous avons réalisé énormément de chose.



*Schéma 11: Vue de côté en couleur de Eole-Next*

Premièrement, nous avons repris le module de turbine de la fusée EOLE d'Aerolpsa, (voir son rapport pour plus de questions), cette turbine est composée de 24 ailettes aérodynamique, étudié pour tourner de manière la plus efficace possible. Sur cette turbine était aussi réalisé une petite extrusion sur le dessus pour passer au travers d'une diode optronique ce qui permet de compter les tours

Le montage était le suivant, sur la turbine était fixé une bague imprimée en PLA sur lequel est fixé 8 aimants Néodyme N42 qui tiennent 11.5kg chacun.

La turbine était glissée en friction autour d'un roulement à billes céramique hybride, céramique, dans le but de réduire la friction induite par les aimants sur les roulements entièrement métallique.

Ce roulement était glissé et retenu par friction autour de l'arbre en aluminium sur lequel on venait appliquer une pièce par au-dessus pour retenir le tout.

Les aimants créent un champ magnétique passant au-dessus de 6 bobines de cuivre. Nous avons réalisé ces bobines de cuivre à la main avec du fil de 0.2mm de diamètre, fil très fragile ce qui a rendu la faisabilité de ces bobines très compliqué.

Une fois les bobines faites, basé sur une forme parfaite, nous les avons toutes mis dans un moule dans lequel nous avons coulé de la résine afin d'être sûr que les bobines ne bougent pas. Une fois les bobines effectués et intégrés, nous avons dû passer au câblage de celle-ci.

Pour cela, nous avons choisi un câblage en triangle, nous avons donc relié les bobines face-à-face.



Une fois tout cela effectué, nous allons brancher ces trois phases et trois neutres dans la carte électronique.

La carte électronique aussi appelé carte expérience, ce compose de plusieurs capteurs.

Pour gérer tout cela, nous avons décidé d'utiliser une Teensy 4.1 afin d'avoir une plus grande capacité de calcul qu'une arduino nano every ainsi qu'un lecteur de carte sd intégré.

Pour la partie récupération, analyse et utilisation de l'électricité, nous avons un circuit complexe.

Premièrement, toute les phases arrivent séparément à la carte et sont redressé séparément vie 3 redresseurs acheter dans un le commerce mais qui est simplement un pont diode. Ensuite, les phases sont reliées, ce courant sera ensuite séparé entre l'entrée du régulateur d'un côté, le capteur de courant d'un autre et un circuit RC allant dans un ADS1018 permettant de savoir le voltage produit.

Nous avons dû modifier cette PCB lors du C'Space dû à une mauvaise création de schéma électrique. En effet, à la base nous souhaitions stocker l'énergie produite dans un condensateur, celui choisi était de 2.5Farad pour 18 Volt mais après de longues discussions lors des contrôles, nous avons décidé de le retirer car il y avait un grand risque d'explosion en vol. Nous avons donc relié le régulateur allant au module Bluetooth directement à la sortie des phases redresser de manière à essayer de l'alimenter en vol malgré tout.

Nous avons eu aussi un problème de valeur de résistance qui allait jusqu'au capteur de courant car dans notre configuration initiale, les valeurs que nous aurions obtenues aurait été trop faible et donc indétectable par l'ADS.

Cette carte a donc été bien modifié au C'Space dû au fait que nous nous sommes fiés au schéma d'EOLE qui ne fut pas le meilleur schéma, de plus, certaines imprécisions concernant notre maitrise du condensateur nous ont conduit à devoir le retirer.

Nous avons aussi ajouté des capteurs au sein de cette carte, un accéléromètre et gyroscope ainsi qu'un bmp afin de mesurer la température, pression de manière à déduire l'altitude.

Nous avons aussi ajouté une diode optronique permettant de compter combien de tours faisait la turbine.

## o Nept'1

Nous avons aussi une autre expérience appelée Nept'1 et qui concerne l'étude d'un fluide suivant différentes phases de vol



Image 4: Logo de Nept-1

Pour se faire, nous allons mettre dans le module un tube contenant l'eau pour l'étudier, des composants électroniques afin d'étudier les conditions de vol tels que des gyroscopes, thermomètres et autres composants pour voir les forces et variations qui agissent sur la fusée et le comparez aux mouvements du fluide.

Pour cela, la partie électronique du module sera composée d'une Raspberry pi 5 ainsi que de plusieurs caméras afin d'observer le fluide.

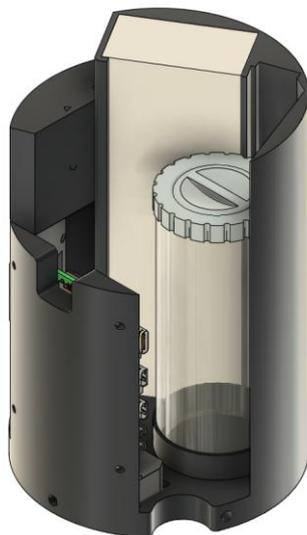


Schéma 12: Vue Isométrique N-O en couleur

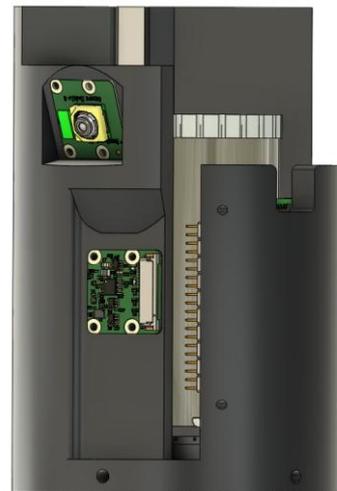


Schéma 13: Vue de côté

Afin d'observer le plus de régime d'accélération différent, l'ouverture du parachute est prévue légèrement plus tardivement que l'apogée (tout en restant dans les limites du cahier de charges FusEx).



Pour cette expérience, nous avons rencontré un problème de place, en effet, stocké le tube contenant l'eau, les deux caméras, la raspberry pi 5, la batterie Lipo et le ruban led était très compliqué, nous avons donc dû refaire plusieurs fois la pièce afin d'atteindre les dimensions parfaites.

Cependant nous n'avons pas rencontré d'autres problèmes majeurs.

Pour les caméras nous avons utilisé des Raspberry Pi camera module 3 Wide.

Pour le tube contenant l'eau, nous avons pris un tube du commerce de 34 diamètre intérieur et 40 de diamètre extérieur, c'est un tube en plexiglass.

Nous l'avons coupé à environ 10cm.

Pour l'étanchéité, nous avons collé un bouchon de canalisation en PVC de 34 de diamètre. Cependant, cette pièce était trop petite, nous avons donc adapté une pièce en PLA sur lequel nous avons collé le bout statique du bouchon avec de la colle pour tube en PVC. Cet ensemble a ensuite été collé au tube en plexiglass avec cette même colle.

Pour finir, le tube en plexiglass a été collé à la bague en PLA avec de la résine.

Des tests d'étanchéité ont été effectués et nous n'avons vu aucune fuite durant tous les tests.

Même après l'atterrissage rude, aucune fuite n'a été constatée.

Pour mieux voir le liquide lors du vol, nous avons décidé de mettre un ruban led afin de bien voir le tube ainsi que de mettre un colorant dans le liquide (colorant rouge) de manière à mieux voir les déplacements.

De plus, nous avons ajouté un flotteur de canne à pêche afin de mieux voir comment se déplace le liquide.

L'eau était remplie aux deux tiers du tube en plexiglass et la faible quantité d'eau en mouvement n'a pas modifié les caractéristiques de vol de la fusée que ce soit pendant les tests ou pendant le vol en lui-même.



## ● C-SPACE

La fusée MROM c'est présenté au c-space 2025, année où on nous a informé du manque de moteur et que tous les projets risquent de ne pas avoir de moteur.

Nous sommes arrivés au c-space avec une fusée mécaniquement finie à part quelques détails, et quelques retouches de code à effectuer nous n'avons pas de gros problèmes.

Bien qu'après un voyage en voiture compliqué, nous avons pu ramener la fusée vers 20h au camp.

Notre premier objectif sur cette première journée était d'assembler la fusée le plus vite possible de manière à pouvoir se présenter au contrôle.

Nous avons pu confirmer une information que nous avons déjà qui était que le propulseur ne rentrait pas dans le tube prévu pour. Le casing frottait et ne rentrait que à moitié.

Cette partie sera le principal problème de notre semaine.

Nous avons donc continué à poncer l'intérieur de ce propulseur avec l'aide d'un manche à balais.

En parallèle nous avons pu travailler sur le code.

Nous avons modifié nos pcbs, changer quelques parties électroniques de la fusée de manière à avoir une expérience fonctionnelle.

Les jours d'après, nous avons pu passer la majorité des tests mécaniques sans problème avec une variation de flèche nul entre sans poids et avec poids.

Nous avons eu cependant un problème avec le parachute, en effet lors de tests de résistance de chaque suspente, notre parachute à commencer à se déchirer au niveau de l'accroche de la suspente. Cela est dû au fait que les biais de couture n'était pas solidaire au niveau de l'angle droit ou est la suspente ce qui a fait que le tissu commençait à se déchirer à cette endroit-là.

Nous avons donc renforcé tous les endroits (les angles de liaisons entre deux biais de couture) avec un second biais de couture afin de rendre plus solidaire les coutures.

Notre mardi/ mercredi a été occupé à modifier notre code expérience afin d'avoir de la redondance au niveau de l'écriture de la sd ainsi que les modifications de la PCB expliqué plus tôt.

Nous avons effectué notre premier et seul vol simulé le mercredi 09 juillet en fin d'après-midi vers 17h45 et le seul problème soulevé ici fut les patins qui frottent sur la rampe, nous avons donc dû les limer un peu pour éviter ces trop grands frottements.

A la suite de cette validation, nous avons été informés que nous devons voler jeudi et de nous tenir prêt dès 10h.

Nous avons donc commencé notre chronologie vers 7h du matin de manière à être prêt. On nous appelé à 12h30 pour nous dire d'arriver en tente vers 13h de manière à lancer en premier dans l'après-midi.

Lors de notre arrivé en tente, on nous a informé que nous pourrions lancer en début d'après-midi mais après le vol de diamant.



Cependant, cette fusée volant avec un pro-98 a eu un problème en rampe (CATO), la fusée c'est enflammé ce qui à causer le sol de lancement à se mettre à bruler aussi.

Une seule fusex a pu voler cette après-midi-là et on nous a donc dis de rentrer et de nous préparer pour demain.

Le soir même, vers 22h30, on nous a appeler afin de nous prévenir qu'il faut qu'on se rendent en tente club à 6h30 du matin afin d'être les premiers à lancer.

Nous avons donc complété notre chronologie à 5h30 du matin, ou nous nous sommes rendus compte d'un problème sur l'alimentation de notre carte expérience, en effet les batteries se déchargeait complètement même sans toucher au switch, nous avons donc pris la décision de les changer en rampe afin de garder le plus d'autonomie possible.

Notre vol était prévu après le vol de la mini fusée bi étage Bibi de l'ESO, fusée qui a fait une séparation nominale mais dont le second propulseur ne s'est pas déclenché, nous avons donc dû attendre 30 minutes afin de pouvoir aller le récupérer.

Cela à grandement augmenter notre temps en rampe et nous avons craint pour l'autonomie de la fusée vu qu'on se rapprochait du temps critique de l'expérience.

Nous avons décidé de lancer la fusée malgré tout et le vendredi 11 juillet, nous avons fait un vol nominal.

Lors de la montée, nous avons pu entendre un bruit de turbine assez impressionnante qui n'était pas présente sur le vol d'EOLE, ce qui veut dire que la turbine a tourné beaucoup plus vite que lors du vol de l'année précédente.

Cela peut être expliqué par le fait que nos améliorations (roulement à billes) ont été très efficace mais cela peut être expliqué aussi par le fait qu'il y avait moins de charge sur les bobines (plus de résistance comparée à EOLE) ce qui a aidé les aimants à tourner plus vite.

## ○ RECUPERATION DE LA FUSEE

A la suite de ce vol, nous sommes partis dans la journée en récupération de la fusée.

Le CNES nous avait communiqué des informations concernant la localisation de la fusée.

Dès la descente du camion, nous avons pu voir notre fusée. En effet, nous avons volontairement laissé le centre de masse bien au-dessus de l'attache du parachute de manière que lors de la redescente, le parachute ne se coupe pas avec les ailettes de la turbine.

Lorsque nous nous sommes trouvés proche de la fusée, nous avons pu voir que le parachute c'est bien déployer mais que la fusée c'est enfoncé de plus de 50cm dans le sol, coiffe la première.



*Image 5: MROM dans son état naturel*

Dès lors que nous nous sommes rapprochés de la fusée, nous avons vu que les suspentes se sont emmêlées entre elle formant une seule corde unie.

Nous pouvons voir sur les photos de l'ouverture du parachute que le dispositifs anti-torche n'est pas descendus jusqu'à l'émerillon déployant entièrement les suspentes, cependant, du fait que nous avons des suspentes suffisamment grandes, le parachutes c'est entièrement gonflé ce qui nous as empêché de faire une torche.

Le fait que les cordes se sont entièrement reliés entre elles peut aussi être due à l'attache de la trappe de l'ouverture du parachute qui était relié à l'émerillon. La corde de celle-ci s'est enroulé autour des autres suspentes du parachute ce qui a engendré qu'elles ont continué de tourner sur elle-même.

Selon nous, cela s'est fait progressivement au fil de la descente, augmentant petit-à-petit la vitesse de descente.

Nous n'avons pas à ce jour de solution pour cela, nous avons estimé que cela était juste de la malchance.



Pour récupérer la fusée, nous avons dû l'extraire de terre.

A la suite de cette opération plutôt compliquée notamment pour la coiffe en Pla qui été très enfoncé, nous avons pu retrouver la fusée en parfaite état avec toutes les pièces sans dégâts.

Malheureusement, la turbine avec les aimants est manquante. L'ensemble c'est vraisemblablement désassembler à l'apogée lors de la décélération.

Une équipe a d'ailleurs retrouvé un bout de la bague avec les aimants en recherchant sa fusée montrant que les pièces se sont bien séparées mais surtout que le choc à la séparation a dû être plutôt violent.

Lorsque nous avons retrouvé la fusée, le séquenceur et la carte apex marchait toujours, plus de 7heures après.

## ● ANALYSE DES DONNEES

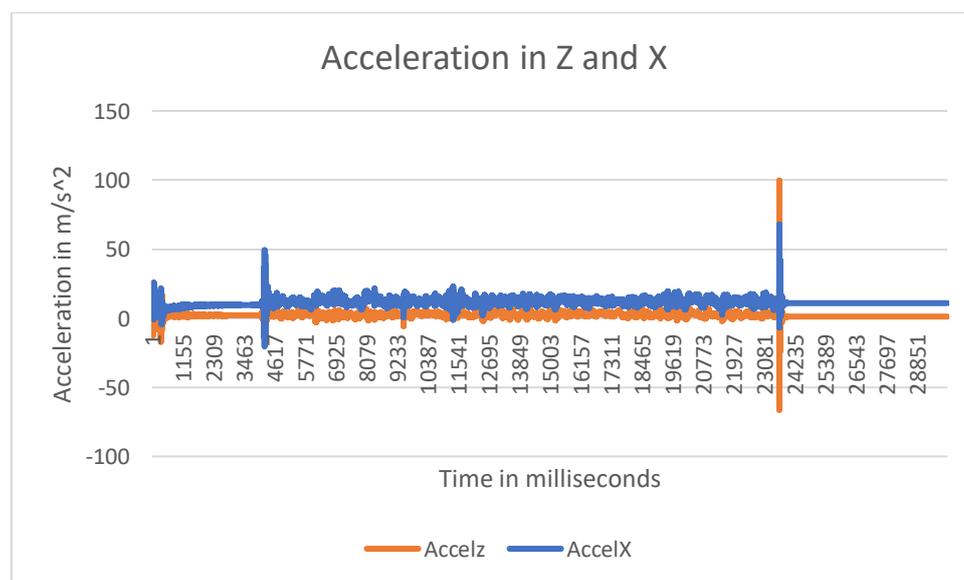
Pour l'analyse de l'expérience, nous nous sommes rendu compte que notre expérience Nept'1, n'as pas eu l'autonomie nécessaire, nous avons que 30 à 45 minutes de vidéos, cela est due à la batterie lipo qui a mal fonctionné. En effet, lors de notre achat, nous avons utilisé la batterie pendant plusieurs semaines sans problèmes et juste avant le c-space nous avons eu besoin de la recharger et depuis elle a mal fonctionnée, la batterie semble donc s'être vidé avant son autonomie estimé de 2h.

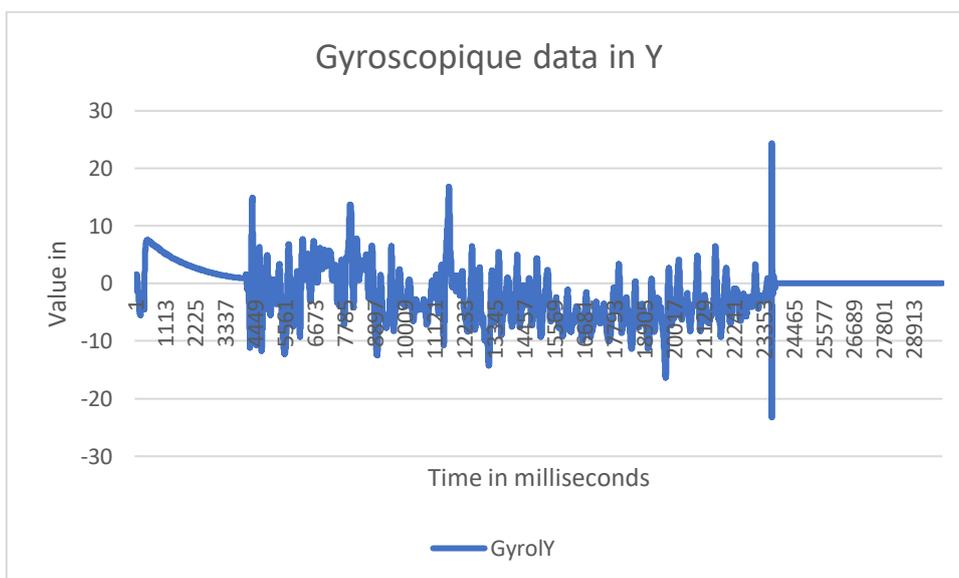
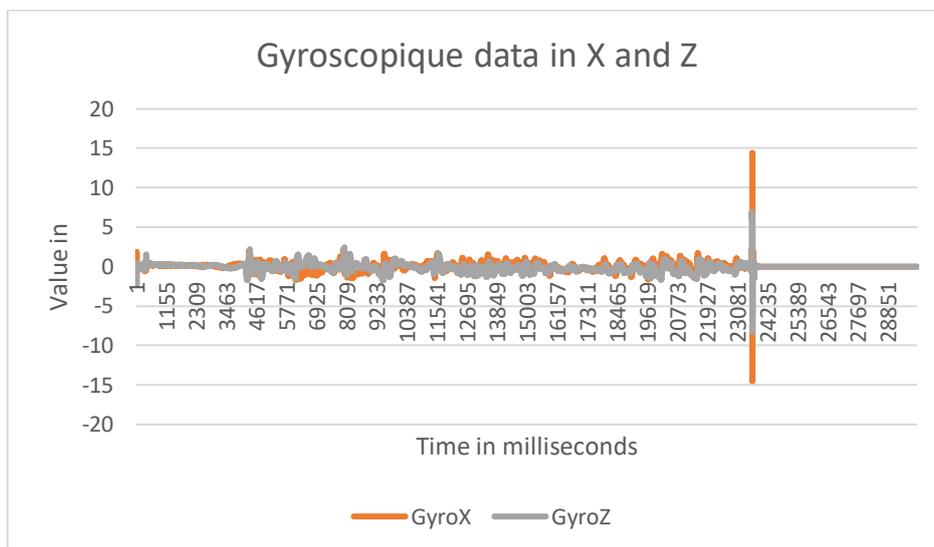
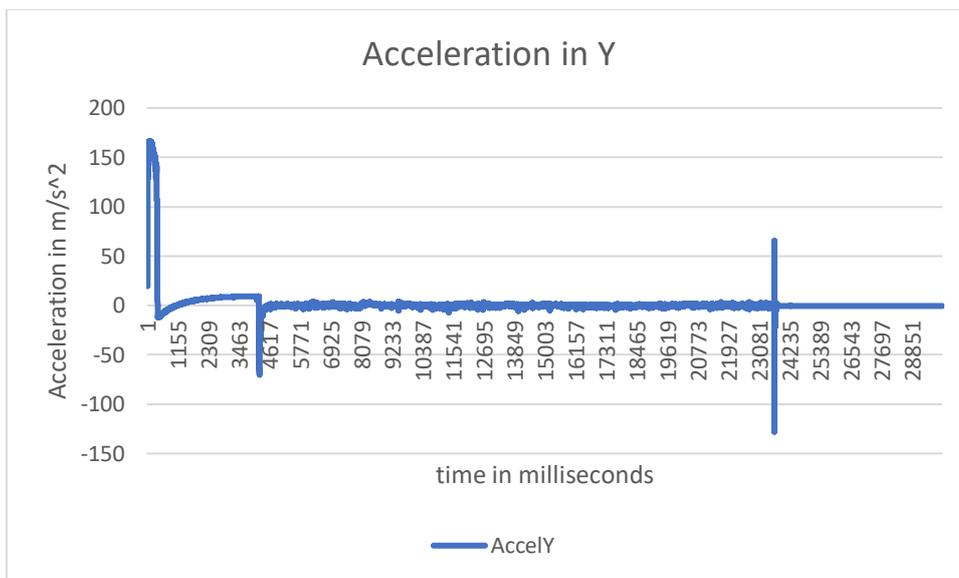
L'expérience Eole Next a elle cependant eu l'autonomie nécessaire, cependant certaines de nos données sont inexistante ou incohérente.

Tout d'abord, nous n'avons aucune donnée concernant la production d'électricité, nous n'avons pas trouvé la cause (A voir si on a trouvé la cause) . Cependant la Teensy a détecté le module Bluetooth durant 4ms soit le temps d'une itération de ce code. Ce ping du module Bluetooth peut être expliqué de deux manières, premièrement, cela peut juste être un bug de la Teensy, ne prouvant pas la réussite de l'expérience. La deuxième explication peut-être que le module Bluetooth a réussi à être alimenté suffisamment pour s'initialiser et être détecté par la Teensy et que par la suite, l'alimentation n'était pas suffisante d'où le peu de temps où il a été détecté.

Le baromètre, un MLP3115A soudé en SMD, à lui cessé de répondre au requête I2C 700 millisecondes après l'allumage moteur présumé. Nous présumons que cela est dû à l'accélération soudaine surpassant la résistance du capteur. En effet, après inspection post-vol de la pcb, aucun dégât extérieur au capteur ne peut être observé. De même pour les soudures, bien qu'il y a un jumper sur un pad du capteur (un fil de cuivre de 0.2mm de diamètre), ce dernier est resté intact comme en témoigne l'inspection post-vol. De plus, ce capteur avait fonctionné de manière continue pendant plusieurs heures lors d'essai au sol, donc un problème de mémoire ou surchauffe n'est pas derrière ce disfonctionnement là (de plus que le lancement de MROM a eu lieu tôt le matin).

Quant à l'accélération et le gyroscope (LSM6DSOX sur breakout adafruit), nous avons eu des données cohérentes.







## ● CONCLUSION

En conclusion, la fusée FX-05 a été un demi-succès par le fait que la partie Meca a parfaitement fonctionné ce qui nous a permis de pouvoir lancer et récupérer la fusée rapidement.

Cependant, la partie expérience a peu fonctionné ce qui conduit à une réussite partielle de la fusée.

Nous pouvons aussi rajouter que la partie expérience de APEX (voir en annexe) est globalement une réussite, le projet MROM permettant de tester leur système sur une fusée.

Nous sommes aussi très satisfaits d'avoir pu emmener deux membres du projet pour leur premier espace avec l'association



## • REMERCIMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement toute l'équipe ayant participé au projet :

PIGOT Brice

ORGER - - BLEUET Maxence

PEIX Guillaume

PEPAY Lucie

MERCANTON Charly

BAIRE Juliette

MARCU Alexe

PLOQUIN Hector

VITIS Anouk

MAAJ Jett

GUDIVADA Munisree

MUSTAFAEV Tim

Je tiens aussi à remercier l'équipe de APEX LEGENDS pour leur travail et aide durant le c-space pour ce module de télémétrie.

PAILLARD Alexis

AMARANTI Malo

PICHON Lucas

FRAUDET Elouan



Je tiens aussi à remercier, l'association AéroIPSA de nous avoir fait confiance à moi et Maxence pour créer une fusée expérimentale

Merci aussi aux équipes de planètes sciences et au CNES qui nous permettent chaque année de pouvoir lancer nos projets et qui nous ont bien encadré lorsque nous en avons besoin durant cette année.

Nous tenons aussi à remercier particulièrement nos sponsors pour nous avoir permis de réaliser ce projet dans les meilleures conditions possible.

Merci donc au Crous de Créteil et la CVEC pour leur financement intégral du projet mais aussi merci à Repro-Auto et FiguraWorks pour nous avoir aidé sur la production des deux turbines.



**Repro-Auto**



**Figura Works**



**Crous Créteil**



**CVEC**



## ● ANNEXES

### ○ CHRONOLOGIE

Alexis

Malo

Lucas

Juliette

Brice

Lucie

Maxence

Yahia

Boite à outils :

- //Prendre scotch papier bleue
- // prendre 10 vis m4
- // prendre des vis plates
- //protection tissus pour la fusée
- //Prendre tournevis m 2.5
- //Prendre WD40
- // prendre rouleau de sopalin
- // prendre gel douche
- //prendre eau
- //prendre supports
- //prendre boite à vis
- // prendre tete plate
- // papier et crayon
- // Jack de secours



## CHRONOLOGIE :

En club :

T-3h

- Changer les piles
- Charger la lipo (optio)
- Recharger batterie apex
- Recharger la batterie de la station sol
- Reformater sd experience
- Regarder la place dans la sd nept'1
- Regarder la place dans la sd station sol
- Mettre la sd dans carte experience
- Mettre la sd dans carte nept'1
- Mettre point de colle sd experience
- Mettre point de colle sd nept'1
- Attendre 2m
- Vérifier que les cartes tienne
- Alimenter la carte apex (cables usb c)
- Brancher le programmeur st-link v2
- Ouvrir le projet VS code prévol apex
- Charger programme prévol apex
- Vérifier l'état initial dans init\_machine() attendu MEMORY\_ERASE\_PROCESS
- Lancer le programme prévol
- Lancer serial monitor sur le pc
- Vérifier le tutut de démarrage
- Et le message de démarrage sur le serial monitor
- Attendre (2min environ)
- Entendre le tulu de fin
- Et le message de fin sur le serial monitor
- Couper le débogueur
- Ouvrir le projet VS code vol
- Vérifier la valeur de init pour dissocier pré-vol de vol
- Flasher le programme vol
- Débrancher
- Foutre Alexis dehors
-



T-1h

- Prendre apex the legend
- Prendre the batterie of the legend
- intégrer apex legend
- vérifier que la batterie est intégrée apex module telem
- Scotcher la batterie apex
- Mettre eau nept'1
- Mettre colorant rouge dans nept'1
- Insérez les batteries 9v séquenceur
- Insérez les batteries 9v expérience
- Connecter tout
- Visser le tiroir
- Verifier la fermeture du tiroir
- Insérez la batterie lipo experience nept'1
- Insérez la batterie station sol
- Tester la batterie station sol
- Teste la batterie nept'1
- Tester le moteur servo
- Plier et ranger le para → lucie
- Assembler le bloc turbine
- Protéger ailettes de la turbine
- Scotcher tournevis pour pyro sur ailerons au scotch bleu ( peintre )
- Vérifier les vis présentes
- Prendre gopro et support
- Prendre chronometer ou montre
- Prendre station sol
- Prendre la fusée
- Prendre caisse à outils

En tente:

Se présenter

Dévisser 6 vis coiffe de visser

4 vis haut bague alu

Lubrifier le roulement à billes.

Revisser 4 vis haut bague alu

Revisser 6 vis coiffe

En rampe :

Chose à faire	Personne	Temps	Check
Descendre la fusée du camion	Tous	2 m	



Chose à faire	Personne	Temps	Check
Démonte la coiffe	Yahia	1m	
Mettre les vis dans la boîte à vis	Lucie	10s	
Demander l'autorisation d'émettre à la fréquence 868.250 MHz	Suiveur	2m	
Allumage station sol	Malo	10s	
Allumer switch apex	Alexis	10s	
Vérifié la led témoin d'alimentation D'apex	Alexis	10s	
Vérifié le buzzer actif d'apex	Alexis	10s	
Vérifier telem	Malo	10s	
Fermer la coiffe	Maxence + Juliette	1m	
Retirer la protection turbine	Maxence	1m	
Insérez la fusée dans le rail	Yahia + maxence	2m	
Attacher jack séquenceur à la rampe	Juliette	1m	
Attacher jack expérience à la rampe	Juliette	1m	
Attacher le jack exp à la fusée	Juliette	10s	
Attacher le jack séquenceur à la fusée	Juliette	10s	
Vérification de la mise en place des jacks	Brice	10s	
Allumer le switch d'alimentation Power Nept'1	Lucie	10s	



Chose à faire	Personne	Temps	Check
Mettre en route chronomètre	Maxence	10s	
allumer le switch power de la carte séquenceur	Yahia	10s	
Vérifier que la led s'allume bien (rouge continu)	Yahia	10s	
Allumer le switch ready-flight du séquenceur	Yahia	10s	
Vérifier que la led clignote lentement	Yahia	10s	
Allumer le switch ready-flight de la carte expérience	Maxence	10s	
Vérifier que la led reste allumé	Maxence	10s	
Allumer le switch power de la carte expérience	Lucie	10s	
Vérifier que la led clignote	Lucie	10s	
Vérifier le temps du chronomètre >2m	Maxence	10s	
allumer le switch ready-flight nept'1	Juliette	10s	
Vérifier que la led bleu s'allume	Juliette	10s	
Demander station météo, température et pression au niveau de la mer	Brice	1m	
Noté les valeurs météo.	Lucie et malo	1m	
Vérifier l'accrochage le tournevis a la fusée à l'aide du scotch	Juliette	10s	



Chose à faire	Personne	Temps	Check
Installer la GoPro	Maxence	1m	
Allumer la GoPro	Maxence	1m	
Vérification enregistrement GoPro	Maxence	1m	
Prise de la photo de groupe	Tous	1m	
Elévation de la rampe	Suiveur	1m	
Prendre la photo de la fusée seule	Tous	2m	
Prise de la photo de groupe	Tous	2m	
Vérifier la télémétrie en Jupiter	Lucas	1m	
Mise en place propu	Pyro	5m	
Verrouiller attache moteur avec tournevis	Pyro	1m	
Ramener tournevis	Pyro	1m	

Post-Vol :

Demander position gps → Alexis

Communiquer la position.

Retour en base vie :

Vérifier valeur de la résistance

## o Schéma Electrique & Circuits Imprimés

### ■ Interface

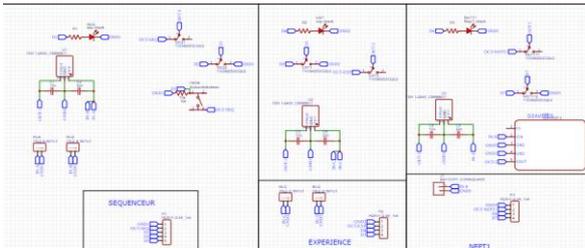
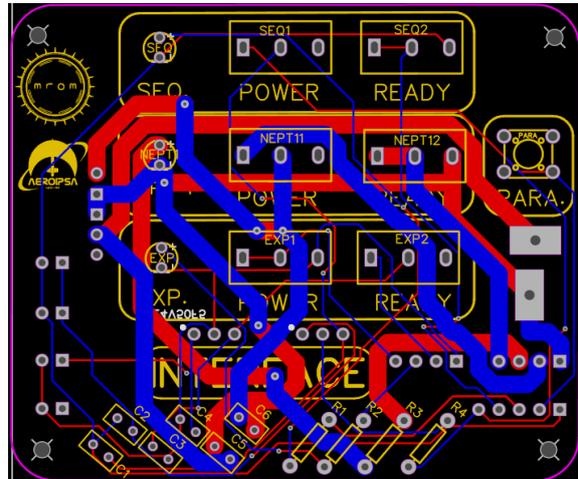


Schéma 14: Schéma électrique Interface MROM



PCB 1: PCB 2 couches Interface MROM sans sérigraphie coté cuivre

### ■ Séquenceur

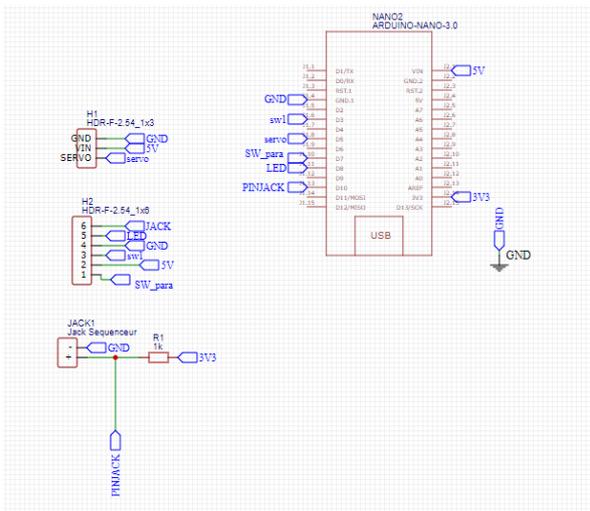
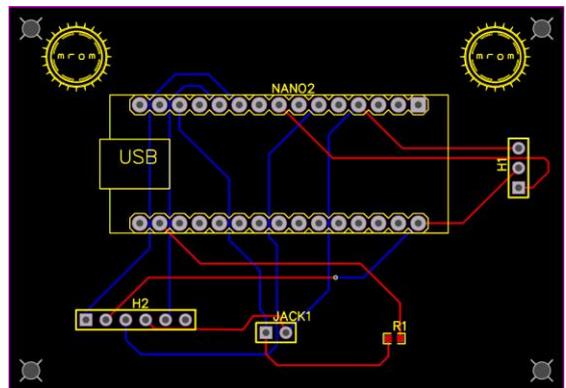


Schéma 15: Schéma électrique séquenceur MROM



PCB 2: PCB 2 couches Séquenceur MROM

## ■ Eole-Next

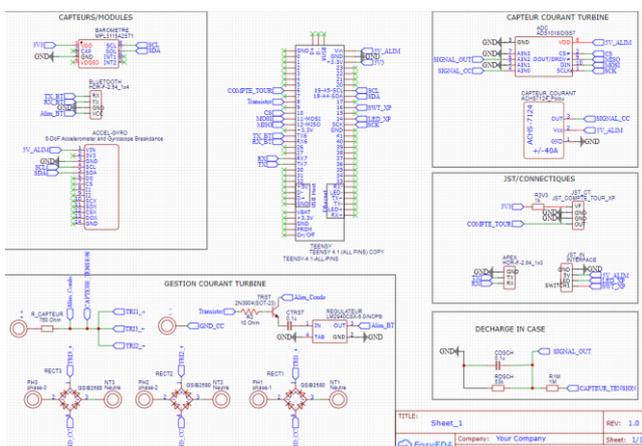
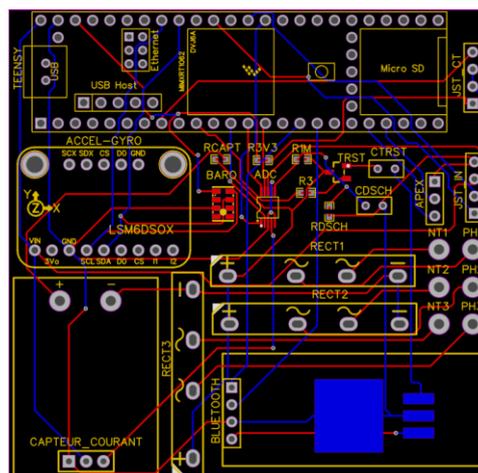


Schéma 16: Schéma électrique expérience MROM



PCB 3: PCB 2 couches Eole-Next sans sérigraphie coté cuivre

## ■ Nept-1

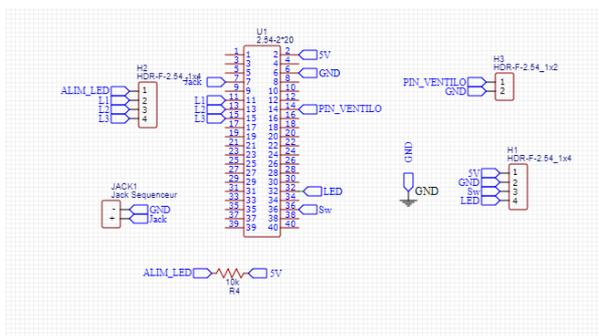
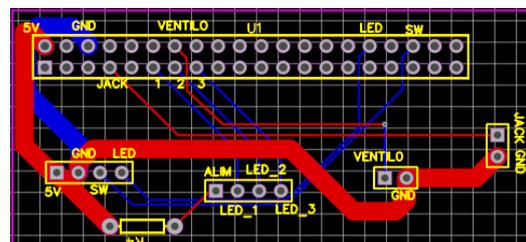


Schéma 17: Schéma électronique de l'expérience Nept'1



PCB 4: PCB 2 couches Nept'1 MROM

## ○ APEX LEGENDS

---

# APEX

## Rapport de projet

---

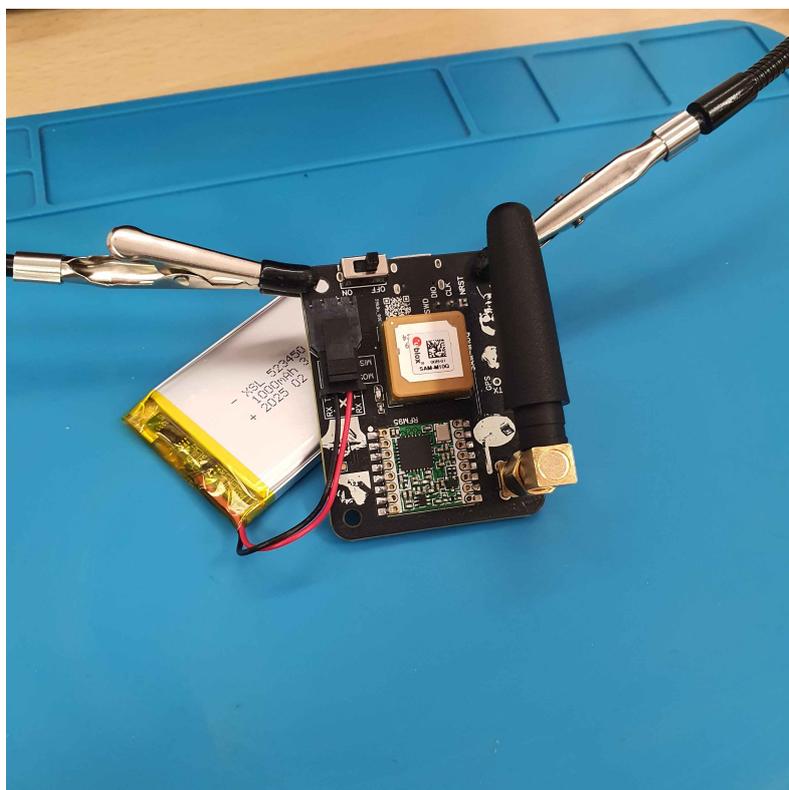


FIGURE 1 – Module APEX

Membres du projet :

- Alexis Paillard
- Malo Amaranti
- Lucas Pichon
- Elouan Fraudet

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Mise en contexte</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Module électronique APEX</b>	<b>3</b>
2.1	Présentation du module	3
2.2	Composants principaux	3
2.2.1	Microcontrôleur STM32F411RETx	3
2.2.2	Module de télémétre RFM95W	3
2.2.3	BMI088	4
2.2.4	ADXL370	4
2.2.5	LSM303AGR	4
2.2.6	BMP380	4
2.2.7	W25Q512JV	4
2.2.8	SAM M10Q	4
2.2.9	Connectivités	5
2.2.10	Alimentation	5
2.2.11	Témoin utilisateur	5
2.3	Conception du module	6
2.3.1	CAO - Conception Assistée par Ordinateur	6
2.4	Soudure des composants	8
2.5	Programmation du module APEX	9
<b>3</b>	<b>Station sol APEX</b>	<b>10</b>
3.1	Objectif du projet	10
3.2	Composition principale	10
3.3	Fonctionnement	10
<b>4</b>	<b>Expériences et résultats</b>	<b>11</b>
4.1	Prisma	11
4.2	Horizon	11
4.3	MROM	11

## Table des figures

1	Module APEX	3
2	Module APEX	3
3	Schéma du module APEX	6
4	Routage du module APEX	7
5	Station sol APEX	10
6	Données collectées par le module APEX durant le vol de la fusée MROM	12

# 1 Mise en contexte

Ce rapport fait l'objet du retour d'expérience sur le projet APEX.

Le projet APEX a été réalisé dans le cadre d'un travail réalisé au cours de l'année scolaire 2024-2025 au sein de l'association de l'AéroIPSA.

## - L'AeroIPSA

L'AéroIPSA est une association étudiante de l'école d'ingénieurs IPSA qui conçoit et réalise entièrement des projets fonctionnels en rapport avec le secteur aérospatial. Elle rassemble des étudiants autour de projets d'astromodélisme, principalement de lanceurs, mais aussi de Cansats (micro-satellites atmosphérique). Cela permet aux différents membres de l'association d'appliquer les notions apprises durant leur cursus au profit d'un projet d'envergure et d'acquérir les compétences nécessaires dans leur futur métier d'ingénieur.

## - APEX

APEX est un projet d'électronique se découpant en deux parties : la partie électronique embarquée et la partie sol. La partie embarquée est un module électronique de fusée, baptisé "APEX" et servant à collecter des données durant le vol de la fusée et à les transmettre au sol. La partie sol est une mallette contenant un ordinateur, une batterie et un récepteur de télémétrie appelé "Station sol". Le projet se base en grande partie sur un projet précédent baptisé "Unknown".

## - Unknown

Unknown est un projet de module électronique de fusée expérimentale réalisé par Vincent Fauquembergue et Alexis Paillard et ayant volé sur le projet SP-01 lors de la campagne de lancemenet du C'space 2024. Les expériences du projet Unknown ont été les suivantes :

- **Expérience principale** : Relocaliser une fusée après son lancement grâce à un module de télémétrie LoRa renvoyant les données GNSS tout au long du vol.
- **Expérience secondaire** : Réalisation d'une collecte de données provenant de nombreux capteurs, barométrique et centrale inertielle, afin de reconstituer le vol après récupération des données stockées sur une mémoire flash.

L'un des objectifs du projet Unknown était de réaliser un module électronique se voyant plus facilement intégrable dans une fusée amateur. Cela s'est traduit par l'utilisation d'une seule carte électronique ayant tous ses composants directement soudés dessus ainsi que l'utilisation d'un microcontrôleur autre que l'Arduino ou que la Teensy. Le choix fait s'est porté sur un STM32F4 de STMicroelectronics. La programmation de ce microcontrôleur a été réalisée en C et un bon nombre des drivers nécessaires ont dû être réadapté par les membres du projet ce qui a permis d'acquérir de nouvelles compétences en programmation bas niveau.

## - Objectifs et enjeux du projet APEX

Le projet APEX s'inscrit dans la continuité du projet Unknown avec pour objectifs principaux :

- **Faciliter l'intégration** : Développer un module plus compact et modulaire
- **Enrichir les données** : Étendre les capacités de collecte de données en ajoutant de nouveaux capteurs et en améliorant la précision des données
- **Augmenter la connectivité** : Ajouter de nouveaux moyens de connexion entre le module et d'autres organes de la fusée
- **Maximiser la rapidité d'exécution** : Optimiser le code et intégrer des techniques de programmation avancées pour garantir une fréquence d'échantillonnage élevée tout en gardant une modularité du code
- **Avoir une station sol plus performante** : Développer une station sol capable de recevoir les données en temps réel et de les afficher de manière compréhensible, intuitive et modulaire afin qu'elle puisse être utilisée facilement par les membres de l'association pour d'autres projets

## 2 Module électronique APEX

### 2.1 Présentation du module

Le module APEX est composé d'une seule carte électronique de forme rectangulaire sur laquelle sont soudés tous les composants nécessaires à son fonctionnement. Il est conçu pour être compact permettant une intégration facile dans une fusée ou cansat et est alimenté par une batterie LiPo 3.7V. Il est équipé de plusieurs capteurs dont un gps, d'une interfaces de communication physique, d'une mémoire flash pour le stockage des données, d'un module de télémesure LoRa<sup>TM</sup> et d'un microcontrôleur STM32F411RETx de STMicroelectronics. Le module est programmé en C.

Le coût total d'une carte avec sa batterie, son antenne et tous ces composants s'élève à 110 €. 4 modules ont été commandé ce qui fait que cette partie du projet avait un budget aloué d'au moins 440 €.

La figure 2 présente le module APEX avec ses composants principaux labelisés.

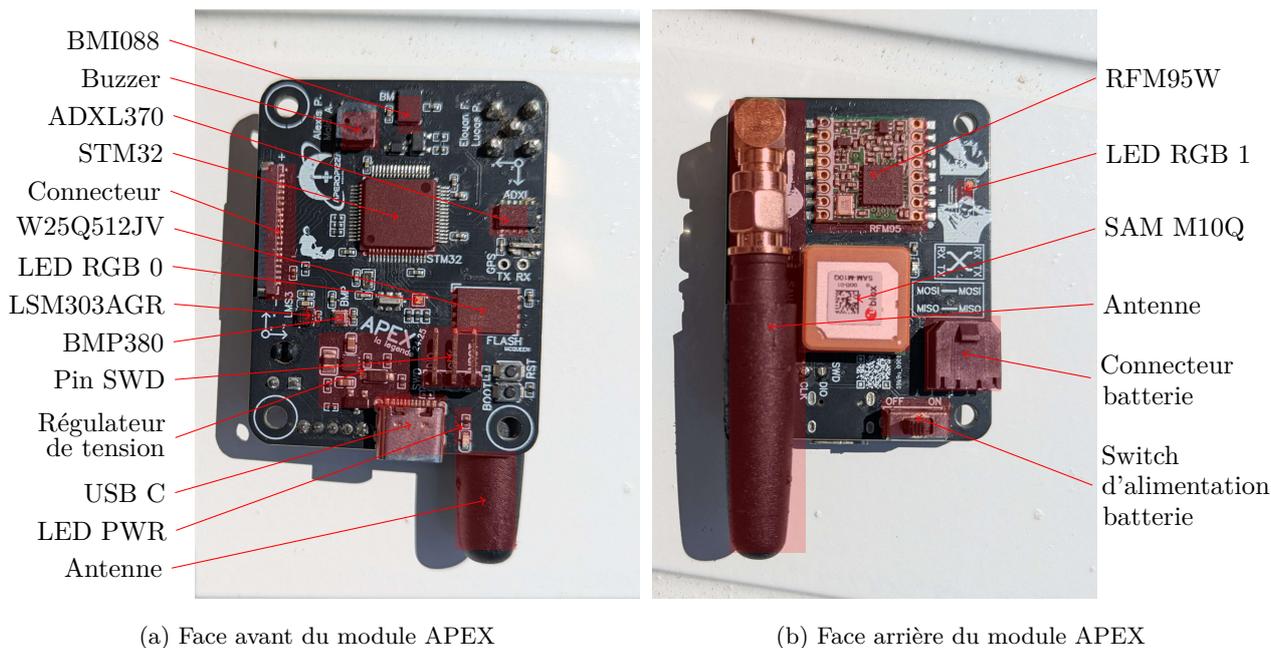


FIGURE 2 – Module APEX

### 2.2 Composants principaux

#### 2.2.1 Microcontrôleur STM32F411RETx

Le microcontrôleur STM32F411RETx est un microcontrôleur 32 bits de la famille STM32F4 de STMicroelectronics. Il est basé sur un cœur ARM Cortex-M4 et dispose de 512 Ko de mémoire flash, 128 Ko de SRAM et d'une fréquence d'horloge maximale de 100 MHz. Il est équipé de multiples interfaces de communication, dont SPI, I2C, UART et USB, ainsi que de multiples périphériques, tels que des convertisseurs analogique-numérique (ADC), des convertisseurs numérique-analogique (DAC) et des timers. Le STM32F411RETx est particulièrement adapté pour les applications embarquées nécessitant des performances élevées et une faible consommation d'énergie. C'est le microcontrôleur STMicroelectronics dont le compromis puissance / taille est le plus intéressant pour les applications embarquées. Aussi, la documentation et les ressources disponibles pour ce microcontrôleur ainsi qu'un environnement de développement complet et une communauté active facilitent en font un choix intéressant pour les projets d'électronique embarquée à l'association de l'AéroIPSA.

#### 2.2.2 Module de télémesure RFM95W

Le module de télémesure RFM95W est un module de communication radio de la famille RMF9x de HopeRF. Il permet une transmission de données sans fil de plusieurs modulations différentes, dont le FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa<sup>TM</sup> et OOK dans la bande de fréquence 868/915 MHz<sup>1</sup>. Ce module offre de nombreuses fonctionnalités et modes de fonctionnement. Cependant, pour ce projet, seuls les modes de transmission et réception simples ont été utilisés.

1. Il existe aussi les modules RFM96W et RFM98W qui fonctionnent avec les fréquences 169, 433 et 470 MHz.

### 2.2.3 BMI088

Le BMI088 est un central de mesure inertiel (IMU<sup>2</sup>) 6 DOF<sup>3</sup> de Bosch Sensortec (3 axes d'accélération et 3 axes de gyroscope). Il est conçu pour les applications de haute performance et de faible consommation d'énergie. L'accéléromètre offre différentes plage de mesure allant de  $\pm 3g$  à  $\pm 24g$  et le gyroscope de  $\pm 125^\circ/s$  à  $\pm 2000^\circ/s$  avec 16 bits de résolution ce qui fait une sensibilité de  $7 \times 10^{-4}g/LSB$  à  $9 \times 10^{-5}g/LSB$ . La fréquence d'actualisation est au maximum de 1600 Hz pour l'accéléromètre et de 2000 Hz pour le gyroscope.

Pour ce projet, le BMI088 est utilisé pour mesurer les accélérations linéaires hors de la phase propulsive de la fusée mais surtout les vitesses angulaire permettant un suivi d'attitude.

### 2.2.4 ADXL370

L'ADXL370 est un accéléromètre 3 axes de la famille ADXL3xx de Analog Devices. Il est conçu pour les applications nécessitant une mesure de fortes accélérations à haute fréquence. Il offre une plage de mesure fixe de  $\pm 200g$  à une fréquence maximale de 3600 Hz et une résolution de 16 bits et donc une sensibilité de  $6.1 \times 10^{-3}g/LSB$  ce qui est amplement suffisant pour les applications de fusée amateur.

### 2.2.5 LSM303AGR

Le LSM303AGR est un capteur de mouvement 6 DOF de STMicroelectronics. Il combine un accéléromètre 3 axes et un magnétomètre 3 axes dans un seul boîtier. L'accéléromètre offre une plage de mesure de  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$  ou  $\pm 16g$  avec une résolution de 16 bits. Le magnétomètre quant à lui offre une plage de mesure de  $\pm 50$  gauss avec la même résolution de 16 bits. La fréquence d'actualisation maximale est de 100 Hz pour les deux capteurs. Cette faible fréquence d'actualisation rend le LSM303AGR peu adapté pour mesurer les accélérations durant la phase propulsive de la fusée. Cependant, c'est la mesure du champ magnétique qui est intéressante dans le cadre de ce projet. En effet, le LSM303AGR permet de mesurer le champ magnétique terrestre et donc, permet de réduire le phénomène de dérive de l'attitude de la fusée durant le vol en corrigeant les mesures du BMI088.

### 2.2.6 BMP380

Le BMP380 est un capteur de pression barométrique de Bosch Sensortec. Il est conçu pour les applications de mesure de pression atmosphérique et d'altitude. Il offre une plage de mesure de pression de 900 hPa à 1100 hPa avec une résolution de 24 bits et une précision de  $\pm 8$  Pa soit  $\pm 66$  cm. La fréquence d'actualisation maximale est de 200 Hz. Il est également capable de mesurer la température avec une précision de  $\pm 0.3$  °C.

Le BMP380 est utilisé pour mesurer la pression atmosphérique durant le vol de la fusée afin de calculer l'altitude de la fusée. Il est également utilisé pour mesurer la température durant le vol, pouvant être utile pour corriger les mesures de certains capteurs.

### 2.2.7 W25Q512JV

Le W25Q512JV est une mémoire flash NOR de Winbond. Il offre une capacité de 512 Mbits (64 Mo) et est conçu pour les applications nécessitant un stockage de données non volatile. Il dispose d'une interface SPI et permet des vitesses de lecture allant jusqu'à 104 MHz.

Le W25Q512JV est utilisé pour stocker les données collectées, calculées et reçues durant le vol de la fusée.

### 2.2.8 SAM M10Q

Le SAM M10Q est un module GPS de u-blox. Il est composé d'une puce GPS M10 et d'une antenne céramique. Il est conçu pour les applications nécessitant une localisation précise et rapide. Il offre une précision de positionnement de l'ordre du mètre en conditions idéales et une fréquence d'actualisation de 10 Hz. Il est également capable de recevoir des signaux de nombreux systèmes de navigation par satellite, dont GPS, GLONASS, Galileo et BeiDou.

Le SAM M10Q est utilisé pour localiser la fusée durant son vol et ainsi permettre sa relocalisation après son atterrissage. Il est également utilisé pour améliorer la précision des mesures de positionnement et de vitesse en combinant les données du GPS avec celles des autres IMU.

---

2. *Inertial Mesurment Unit* en anglais

3. *Degree Of Freedom* en anglais

### 2.2.9 Connectivités

Le module APEX dispose de plusieurs connectivités pour communiquer avec d'autres modules ou organes de la fusée. Il dispose d'un connecteur USB-C pour la programmation et la communication avec un ordinateur, d'un connecteur de débog SWD pour la programmation et le débogage du microcontrôleur ainsi que d'un connecteur 20 pins pour connecter d'autres modules ou capteurs.

### 2.2.10 Alimentation

Le module APEX est alimenté par une batterie LiPo 3.7V de 1000 mAh avec BMS<sup>4</sup> intégrée. APEX dispose d'un régulateur de tension pour fournir une tension stable de 3.3V au microcontrôleur et aux autres composants. Après expériences, la batterie de 1000 mAh permet de tenir au moins 7 heures, sans connaître la durée maximale. Le module peut également être alimenté par USB-C.

### 2.2.11 Témoin utilisateur

Le module APEX dispose de 5 témoins dont 3 programmable, une LED GPS et un témoin lumineux d'alimentation. Le témoin d'alimentation est une LED rouge qui s'allume lorsque le module est alimenté quelle que soit la source d'alimentation. La LED GPS est une LED rouge qui clignote lorsque le module GPS a déterminé une position valide. Les 3 autres témoins programmables sont deux LED RGB et un buzzer. Ils sont utilisés pour indiquer l'état du module, les erreurs ou les événements importants durant le vol. Ils sont contrôlés par le microcontrôleur via une interface *PWM*<sup>5</sup> permettant la variation de l'intensité lumineuse des LED et la fréquence du buzzer.

---

4. *Battery Management System* en anglais, permet de protéger la batterie contre les surcharges, les décharges profondes et les courts-circuits

5. *Pulse Width Modulation* en anglais, permet de générer un signal numérique modulé en largeur d'impulsion

## 2.3 Conception du module

### 2.3.1 CAO - Conception Assistée par Ordinateur

La conception du module APEX a été réalisée à l'aide du logiciel de CAO EasyEDA. Ce logiciel permet de concevoir des schémas électroniques et de réaliser des routages de cartes électroniques. Il dispose d'une bibliothèque de composants électroniques varié et est directement intégré au service de fabrication de cartes électroniques JLCPCB. Il permet ainsi de concevoir des cartes électroniques rapidement et de les faire fabriquer en ligne en ayant une vision sur le catalogue de composants disponibles par JLCPCB.

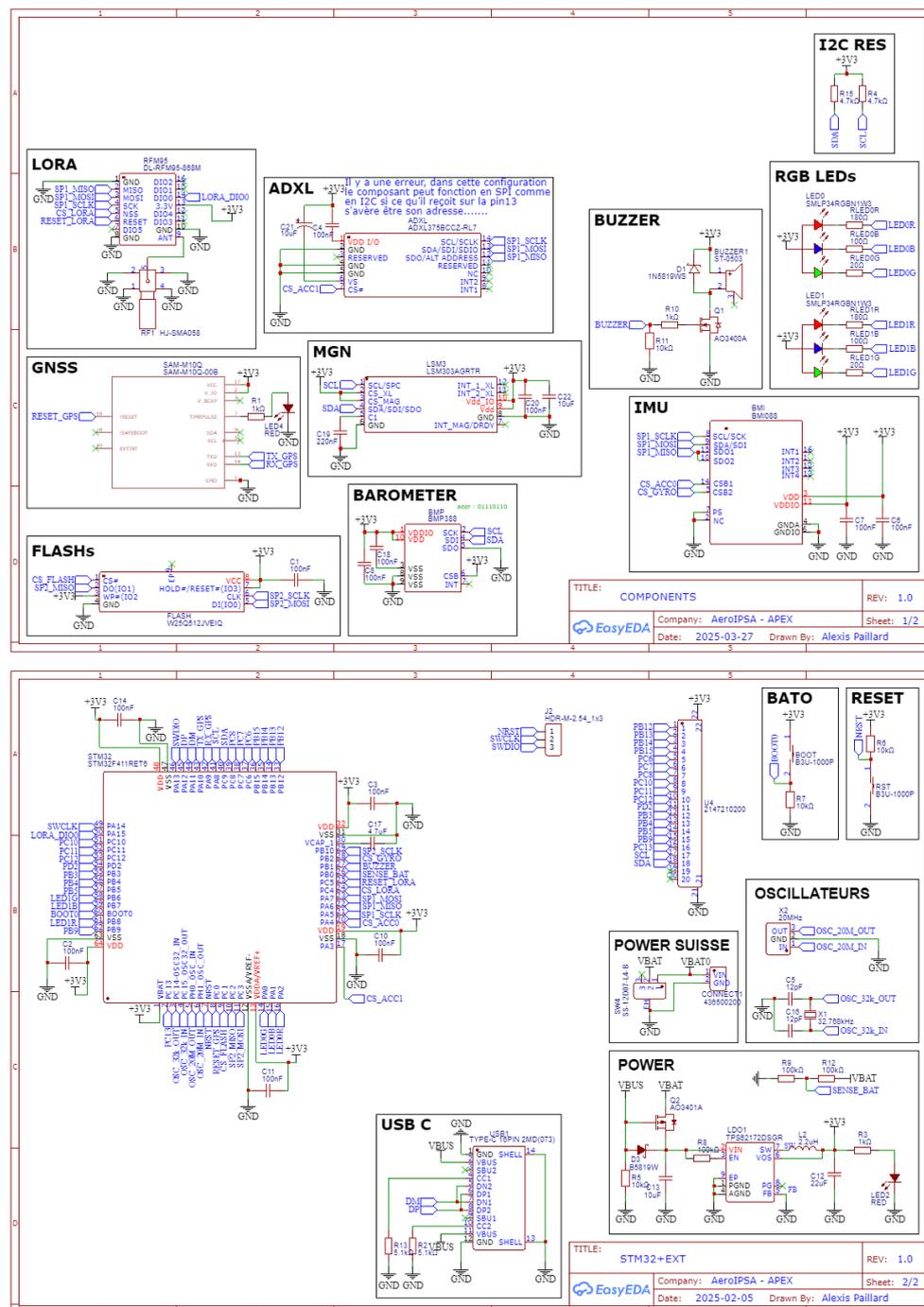


FIGURE 3 – Schéma du module APEX

Le schéma du module APEX est présenté dans la figure 3. Il est composé de deux feuilles de schéma. La première feuille contient les principaux capteurs alors que la seconde est dédiée au microcontrôleur, aux connectivités et à l'alimentation.

Le routage du module APEX est présenté dans la figure 4. Le module est composé de 4 couches : une couche supérieure, une couche inférieure et deux couches internes. La couche supérieure contient la majorité des composants soudés par l'entreprise JLCPCB lors de la fabrication du PCB. La couche inférieure contient le module GPS, le module de télémétrie, l'antenne ainsi que d'autres composants mineurs. Ces composants sont soudés manuellement après la réception du PCB. La couche interne 1 est dédiée aux pistes de signaux et la couche interne 2 est dédiée à l'alimentation et à la moitié des signaux du connecteur 20 pins. La masse est répartie sur toutes les couches zone de cuivre afin de réduire les interférences électromagnétiques, d'améliorer la dissipation thermique et la stabilité du signal.

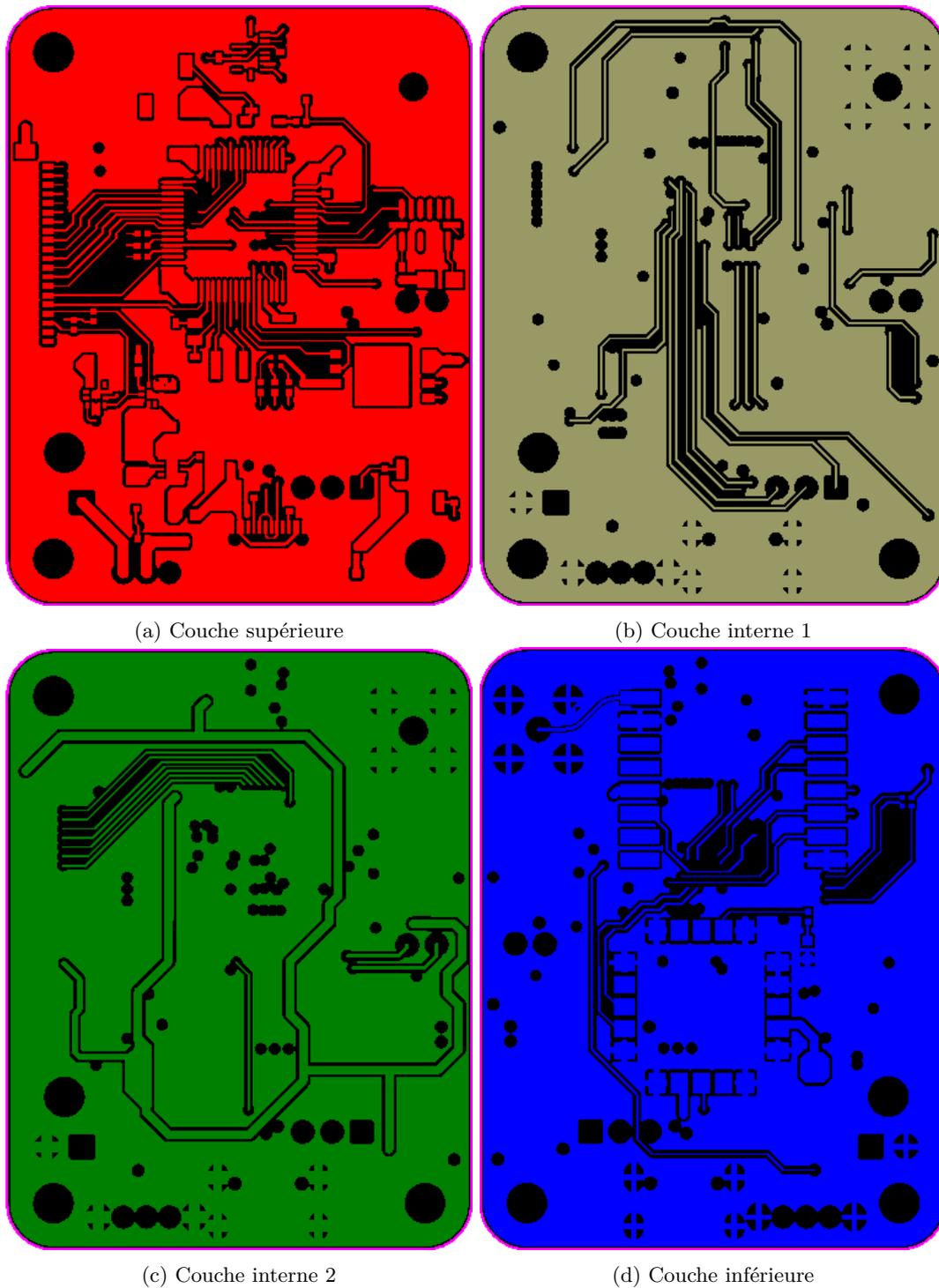


FIGURE 4 – Routage du module APEX

## 2.4 Soudure des composants

Comme dit précédemment, le module APEX a été fabriqué par l'entreprise JLCPCB avec la majorité des composants de la couche supérieure soudés (hormis le buzzer et le connecteur 20 pins faute de disponibilité chez JLCPCB). Tous les autres composants se trouvant sur la couche inférieure ainsi que le buzzer et le connecteur 20 pins ont été soudés manuellement par les membres du projet. L'association de l'AéroIPSA dispose d'une plaque chauffante permettant de souder les composants SMD<sup>6</sup> rapidement et efficacement. Elle a pu être utilisée pour souder les composants de la couche supérieure. Cependant, la plaque chauffante ne permet pas de souder les composants de la couche inférieure. En effet, la plaque chauffante chauffe toute la carte électronique et cette dernière doit présenter une surface plane pour être en contact avec la plaque chauffante. Il est donc impossible d'effectuer une soudure une face par plaque chauffante lorsque des composants sont déjà soudés sur l'autre face. Ainsi, les composants de la couche inférieure ont été soudés manuellement à l'aide d'une station de soudure à air chaud.

La plus grande difficulté lors de la soudure des composants a été la soudure du module GPS SAM M10Q. En effet, les pattes de ce module ne sont pas visible lorsque le module est posé sur la carte électronique. Une erreur de positionnement du module de seulement quelques millimètres ou la formation d'un pont de soudure entre deux pattes peut rendre le module, et le plus souvent la carte électronique, inutilisable. De plus, des composants interne du module GPS sont visible et à l'air libre sur la face inférieure du module. Il est donc possible en appliquant trop de pâte à braser de faire un court-circuit entre ces composants internes.

Sur les 4 modules APEX fabriqués, seule 2 cartes électroniques sont pleinement équipées d'un module GPS fonctionnel :

- Une carte a été endommagée lors de l'alumage de la carte électronique après soudure du module GPS, un court-circuit s'étant formé entre deux pattes du module GPS et a surement endommagée l'un des cristaux oscilateurs du module ou le microcontrôleur interne. La carte APEX répondait toujours mais se mettait immédiatement en défaut lors de son démarrage.
- Sur une autre carte, le module GPS n'a jamais fonctionné. A chaque tentative de soudure du module GPS, un court-circuit se formait entre deux pattes du module. Expérience faite avec la précédente carte, et après plusieurs tentatives, de soudure / désoudure du module GPS, il a été décidé de laisser cette carte sans module GPS. favorisant ainsi le bon fonctionnement des autres composants.

Ces problèmes de soudure du module GPS auraient pu être évités en mettant le GPS sur la face supérieure de la carte électronique, la soudure à la plaque chauffante étant plus facile. Cela aurait cependant impliqué de revoir le routage, la disposition et la taille de la carte électronique ce qui n'était pas envisageable dans le cadre de ce projet. Il aurait été également possible de demander à JLCPCB de souder l'intégralité des composants, y compris ceux de la couche inférieure. Cependant, le coût de fabrication de la carte électronique aurait été trop important, le budget d'une carte APEX étant déjà conséquent.

---

6. *Surface-Mount Device* en anglais, composants montés en surface

## 2.5 Programmation du module APEX

Un des retours d'expérience du projet Unknown était les faibles performances du programme écrit. En effet, il n'était pas possible d'atteindre une fréquence d'échantillonnage élevé et surtout stable. Le programme du projet APEX a donc été écrit de manière à maximiser la rapidité d'exécution tout en gardant une modularité du code. Pour cela, et dans une démarche d'apprentissage et d'approfondissement des connaissances en programmation embarquée, la volonté a été de créer un système de moniteur temps réel (RTOS<sup>7</sup>) simple et adapté aux besoins du projet. Ce RTOS permet de gérer la création de tâches et leur ordonnancement non préemptif voulant s'approcher d'une syntaxe proche des concepts de la programmation asynchrones comme nous pouvons l'entendre dans les langages modernes.

Bien que la programmation de ce RTOS ait débuté dès le début du projet, il n'a pas pu être finalisé et fiabilisé à temps pour être utilisé durant les vols. En effet, même si le projet était bien avancé avant la campagne, un problème de fiabilité du code a été découvert lors des tests finaux avant la campagne de lancement. Ainsi, il a été décidé d'utiliser un code plus simple et plus fiable, écrit en C standard, pour les vols. Le RTOS sera finalisé et fiabilisé pour de futurs projets.

Le code utilisé durant les vols est écrit en C standard et a dû être développé en moins de 2 jours afin d'être prêt pour le premier vol de Prisma. Il est donc simple, peu optimisé et ne répondant à seulement une partie des objectifs initiaux.

---

7. *Real-Time Operating System* en anglais

## 3 Station sol APEX

### 3.1 Objectif du projet

La station sol APEX a été pensée comme une solution modulaire, portable et durable, réutilisable sur plusieurs années. Elle permet de recevoir et d'afficher en temps réel les données transmises en LoRa par le module embarqué APEX. Elle a également été conçue pour être compatible avec de futurs projets, en assurant la réception de leur télémétrie sans dépendre exclusivement du module APEX.

### 3.2 Composition principale

- Raspberry Pi 5 : exécute Raspbian et notre logiciel de récupération et d'affichage des données.
- Module TTGO : réception des communications LoRa 868 MHz.
- Batterie : alimentation autonome pour les campagnes de lancement.
- Écran et clavier : interaction et consultation directe des données.

### 3.3 Fonctionnement

Lors d'un lancement, le module embarqué APEX transmet ses données de télémétrie via LoRa à 868 MHz. L'antenne de la station sol capte ces signaux et les transmet au module TTGO, qui joue le rôle de récepteur LoRa. Les trames ainsi reçues sont envoyées à la Raspberry Pi 5, où un logiciel dédié decode et organise les informations. Les données sont ensuite affichées en temps réel sur l'écran de la station sol, permettant aux opérateurs de suivre l'évolution du vol (position GPS, altitude, capteurs embarqués, etc.). Grâce à cette architecture, la station est portable, autonome et peut être facilement réutilisée pour d'autres projets de télémétrie.

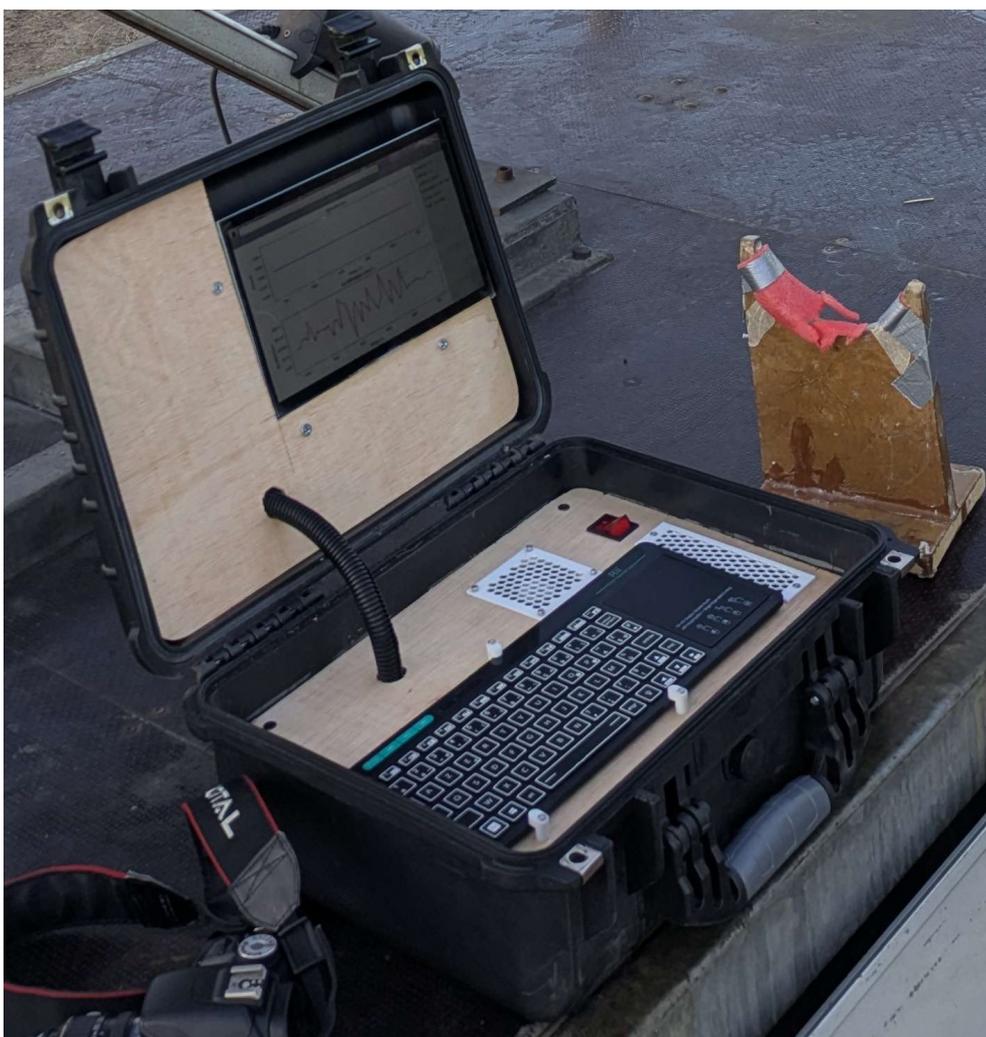


FIGURE 5 – Station sol APEX

## 4 Expériences et résultats

Le projet APEX s'est inscrit dans plusieurs projet de l'association de l'AéroIPSA de l'année 2024-2025. Le module APEX a été embarqué sur une fusée<sup>8</sup> (MROM), deux minif<sup>9</sup> (Prisma et Horizon) et un cansat<sup>10</sup> (Prisma). Cela explique le nombre de 4 modules APEX commandés.

### 4.1 Prisma

Le premier vol du module APEX a eu lieu avec le projet Prisma. 2 modules APEX se trouvaient à bord de Prisma, l'un dans la fusée et l'autre dans le cansat devant être largué par la fusée à son apogée.

Le projet n'ayant pas inscrit la station sol APEX dans sa chronologie, la télémesure n'a pas été utilisé durant le vol. Les données collectées par les modules APEX ont été stockées et récupérées après le vol. Cependant, à cause d'une erreur de programmation, les données ont été encryptées sur la mémoire flash des modules APEX d'une manière non prévue. Il n'a donc pas été possible de récupérer les données collectées durant le vol.

Le vol de Prisma a tout de même permis de valider le bon fonctionnement du module APEX dans un environnement de vol réel. Le module a parfaitement résisté aux vibrations et accélérations subies durant le vol. Le module APEX a également parfaitement fonctionné avant et après le vol, prouvant ainsi la robustesse du module et prouvant que la capacité de la batterie est suffisante largement suffisante pour plusieurs heures de vol.

### 4.2 Horizon

Le projet Horizon a été le second projet de l'AéroIPSA à embarquer un module APEX. Le module APEX embarqué dans la fusée Horizon n'était pas équipé d'un module GPS à cause des problèmes de soudure évoqués précédemment et ne possédait pas non plus le même type de connecteur batterie faute de disponibilité lors de la campagne de lancement.

Lors de l'allumage de la carte APEX, au moment de la chronologie de lancement, le module ne s'est pas allumé correctement (pas de LED d'alimentation allumée et pas de témoin sonore). Le lancement a quand même eu lieu puisque le projet APEX est indépendant du projet Horizon.

Après le vol, lorsque le module APEX a été récupéré, il a été constaté que le module s'était allumé et que le placement des câbles des caméras embarquées bloquaient la vue de la LED d'alimentation. Cependant, aucune données n'a été collectée durant le vol. Nous pensons que cela est dû à un faux contact au niveau du connecteur de la batterie. Le module ne s'était donc pas allumé comme dit précédemment et lors de l'atterrissage, le module s'est allumé et n'a jamais réussi à collecter des données attendant le décollage de la fusée.

### 4.3 MROM

Le projet MROM a été le troisième projet de l'AéroIPSA à embarquer un module APEX. Le module APEX embarqué dans la fusée MROM était pleinement fonctionnel et équipé d'un module GPS. La station sol APEX a également été utilisée durant le vol de la fusée MROM.

Lors de l'allumage de la carte APEX, au moment de la chronologie de lancement, le module s'est allumé correctement (LED d'alimentation allumée et témoin sonore). Au même moment, la station sol APEX a également commencé à recevoir les données transmises par le module validant ainsi le bon fonctionnement de la télémesure.

Lors du lancement de la fusée, la station sol APEX n'a pas afficher les données de télémesure comme espéré. En effet, les accélération subies par la fusée durant la phase propulsive n'ont pas été aperçu sur la station sol. Après analyse des données collectées par le module APEX, il s'est avéré que le module a pourtant bien collecté les données durant le vol. Un taux important de données enregistrées ont cependant été corrompues et ce de manière fréquenté durant le vol. Nous pensons que cela est dû à une mauvaise programmation du module. En ne prenant que les données valides il est possible de retracer les accélérations et vitesses angulaires subies par la fusée durant le vol.

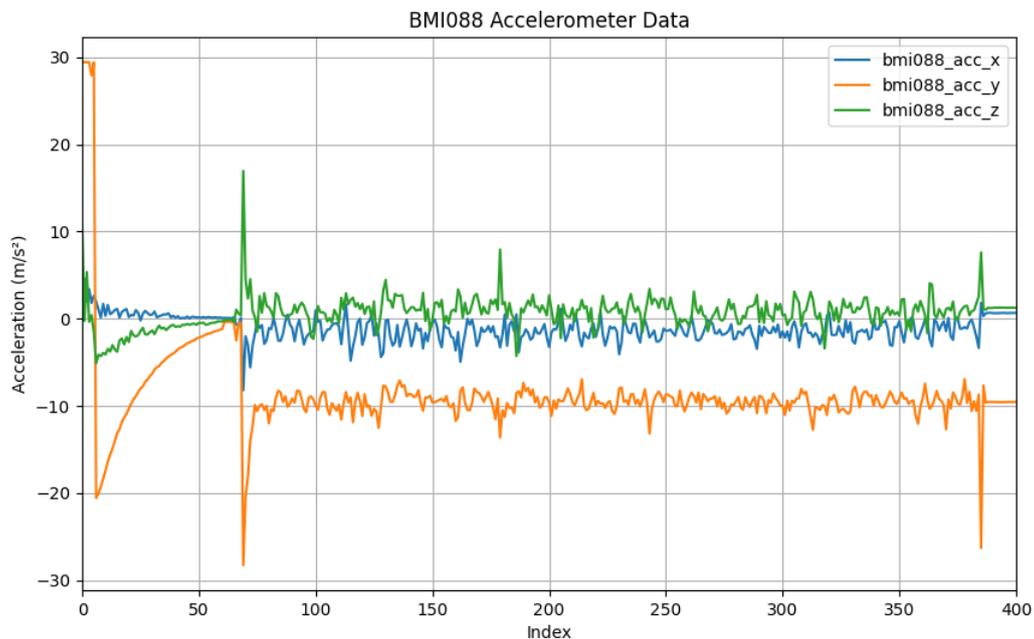
---

8. Fusée amateur possédant un moteur de poussée équivalente ou supérieure à celui du moteur Pro54.

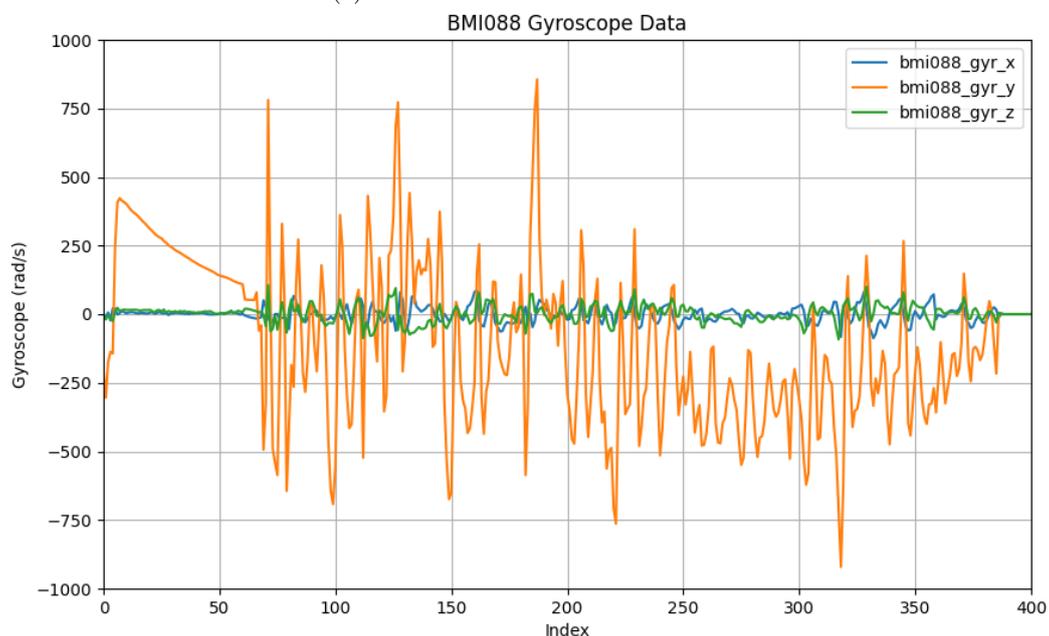
9. Fusée amateur possédant le moteur Pro24 ou équivalent.

10. Micro-satellite atmosphérique le plus souvent largé par une fusée dont le gabarit peut faire penser à une canette.

Ci dessous se trouve un graphique présentant les accélérations transversales (X, Y, Z) ainsi que les vitesses angulaires (X, Y, Z) mesurées par le module APEX durant le vol de la fusée MROM. On peut bien distinguer la phase propulsive de la fusée durant laquelle les accélérations et vitesses angulaires sont les plus importantes. On peut également distinguer la phase de chute libre durant laquelle l'accélération longitudinale (Z) est minimale à la fin de la phase propulsive (-2g) et remonte progressivement jusqu'à 0g. Durant cette phase de chute libre, la vitesse angulaire longitudinale (Z) passe elle par un maximum et diminue progressivement. Se suit après l'ouverture du parachute noté par une forte décélération, puis une phase de descente sous parachute durant laquelle l'accélération longitudinale (Z) est stable autour de -1g, et enfin l'atterrissage de la fusée noté par une forte accélération suivie directement d'un plateau où toutes les valeurs n'ont plus aucune variation.



(a) Accélérations de la fusée MROM



(b) Vitesses angulaires de la fusée MROM

FIGURE 6 – Données collectées par le module APEX durant le vol de la fusée MROM

Le maximum d'accélération longitudinale (Z) mesuré durant le vol est de 3g, ce qui est dû à une erreur de programmation du module APEX. En effet, le module APEX a été programmé pour mesurer des accélérations allant jusqu'à +3g même si le BMI088 est capable de mesurer des accélérations allant jusqu'à +24g et que la fusée MROM est censée atteindre des accélérations de l'ordre de 15g.

## Conclusion

Le projet APEX a constitué une étape déterminante dans la continuité des travaux réalisés au sein de l'AéroIPSA. Conçu comme une amélioration du module *Unknown*, il a permis d'apporter des solutions techniques plus abouties et de relever de nouveaux défis dans le domaine de l'électronique embarquée et des systèmes de télémétrie. L'objectif principal était de développer un module à la fois compact, performant et modulaire, capable de collecter un ensemble élargi de données et de les transmettre efficacement à une station sol réactualisée.

L'ensemble des travaux réalisés a permis de valider plusieurs points essentiels. Sur le plan matériel, le développement d'une carte unique intégrant l'ensemble des composants nécessaires au fonctionnement du module a représenté un véritable progrès en termes d'intégration et de fiabilité. Sur le plan logiciel, une attention particulière a été portée à l'optimisation du code et à la mise en place de structures modulaires garantissant à la fois performance et évolutivité. Enfin, la nouvelle station sol a marqué une avancée majeure en termes d'ergonomie et de fonctionnalités, puisqu'elle est désormais capable de recevoir et d'afficher les données de manière claire et réutilisable dans le cadre d'autres projets de l'association.

Cependant, ce projet a également mis en lumière un certain nombre de limites et d'axes d'amélioration. La complexité croissante des systèmes embarqués implique des temps de développement plus longs et une phase de test particulièrement exigeante. De plus, certaines fonctionnalités envisagées, comme l'optimisation ultime de la fréquence d'échantillonnage ou l'intégration de nouveaux protocoles de communication, n'ont pas encore atteint leur plein potentiel et devront être poursuivies par les prochaines équipes.

Au-delà de ses résultats techniques, APEX illustre parfaitement l'importance de l'apprentissage par projet. Chaque membre de l'équipe a pu approfondir ses connaissances en électronique, en programmation embarquée, en communication sans fil et en traitement de données, tout en développant des compétences transversales essentielles telles que la gestion de projet, le travail d'équipe et la résolution collective de problèmes complexes. L'expérience humaine a ainsi été aussi riche que les progrès technologiques obtenus.

En définitive, APEX ne constitue pas un aboutissement, mais bien une étape dans le processus d'amélioration continue des moyens techniques de l'AéroIPSA. L'existence désormais d'un module fiable, modulable et réutilisable ouvre la voie à de nouvelles expérimentations, qu'il s'agisse de l'ajout de capteurs plus performants, de l'intégration de protocoles de communication innovants, ou encore du développement d'outils logiciels permettant une exploitation plus poussée des données recueillies. Le projet représente ainsi un socle solide sur lequel les prochaines générations d'étudiants pourront s'appuyer et constitue une contribution durable à l'évolution des projets de fusées expérimentales menés au sein de l'association.