



Rapport de projet HORIZON – MF09





Table des matières

I – Remerciements	3
II – Présentation du projet	4
1 – Introduction	4
2 – Objectifs	4
3 – Membres.....	4
III – Description du projet.....	5
1 – Description mécanique	5
1.1 – Extérieur de la fusée.....	5
1.2 – Dimensions	6
1.3 – Intérieur de la fusée	7
1.4 – Parachute	13
2 – Partie électronique	13
2.1 – Carte séquenceur	13
2.2 – Carte expérience	15
2.3 – Carte APEX	17
3 – Vol et résultats	17
3.1 – Déroulement du vol.....	17
3.2 – Traitement des données récupérés	21
III – Conclusion	27
IV – Annexes	28



I – Remerciements

Je tenais à remercier tous les membres et le bureau d'AeroIPSA pour leur aide précieuse, j'ai commencé cette année avec des connaissances limitées dans ce milieu, mais, grâce à eux, j'ai beaucoup appris en l'espace d'un an et j'espère que les membres d'HORIZON (càd Liam mdr) ont pu découvrir des choses durant l'année et un minimum s'amuser.

Cimer à Runcam pour les 10 % de promo, ça m'a débloqué mon budget.

Et merci à Yahia pour avoir cru en mon projet même quand je n'y croyais plus vers la fin de l'année. Ça a été un Speedrun en 1 mois (my bad), mais tout a fonctionné et (c)HORIZON a pu prendre son envol avec de belles images.



II – Présentation du projet

1 – Introduction

HORIZON est un projet de minifusée lancé par Nathan TURINI ayant pour but de faire découvrir et apprendre aux participants la conception et la réalisation d'une fusée étudiante. Le projet a commencé en septembre 2024 pour voler lors du C'Space 2025 en juillet.

2 – Objectifs

Les objectifs principaux d'HORIZON étaient de filmer en 360° le vol avec plusieurs caméras d'actions embarquées ainsi que de récolter des données de positions et d'accélérations de la fusée grâce à un GPS et un IMU.

Pour cela, les caméras choisies sont les **RunCam Thumb Pro W**, le GNSS est le **SAM-M10Q** de u-blox et l'IMU est le **BNO085 CEVA**.

Durant l'année, le projet APEX a été ajouté dans la fusée pour de la télémesure et sera détaillé dans une partie dédiée.

3 – Membres

Chef de projet :

- Nathan TURINI

Membres :

- Liam HAW-DOCK-DIAN
- Constant PACEAUD
- Corentin PLANCHON

III – Description du projet

1 – Description mécanique

1.1 – Extérieur de la fusée

De la fibre de verre a été utilisée pour :

- Le tube principal
- Le tube porte propulseur
- Les 4 ailerons
- Les rondelles encadrants les ailerons et le porte propulseur

La coiffe, les supports internes pour les PCBs, les caméras et la trappe para sont imprimées en PLA.

La rondelle inférieure de la trappe para où est attachée la corde est en delrin.



Figure 1, 2 et 3 : Tube d'HORIZON avec coiffe et ailerons en assemblage



1.2 – Dimensions

Fusée		
Nom	Horizon	
Club	Aerolpsa	
Type	Minifusée	
Masse	1300 g	sans propu
Centre de Masse	590 mm	sans propu
Longueur totale	900 mm	

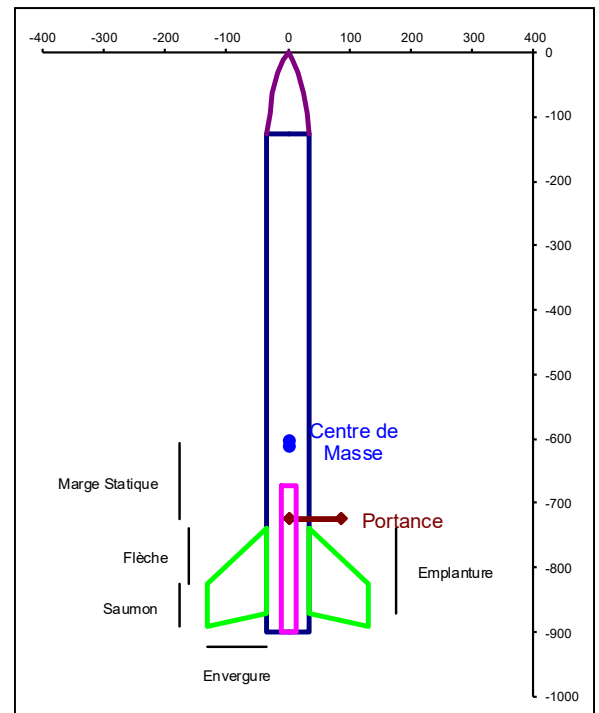


Figure 4 et 5 : Dimensions générales

Coiffe	
Forme	Ogivale (pointue)
Hauteur	125 mm
Diamètre	67 mm

Figure 6 : Dimensions de la coiffe

Ailerons	
Mono-empennage	
Emplanture 'm'	130 mm
Saumon 'n'	67 mm
Flèche 'p'	85 mm
Envergure 'E'	98 mm
Epaisseur 'ep'	3 mm
Nombre	4
Position du bas	870 mm

Figure 7 : Dimensions des ailerons



Figure 8 : HORIZON avant la RCE3 (Séquenceur intégré)

1.3 – Intérieur de la fusée

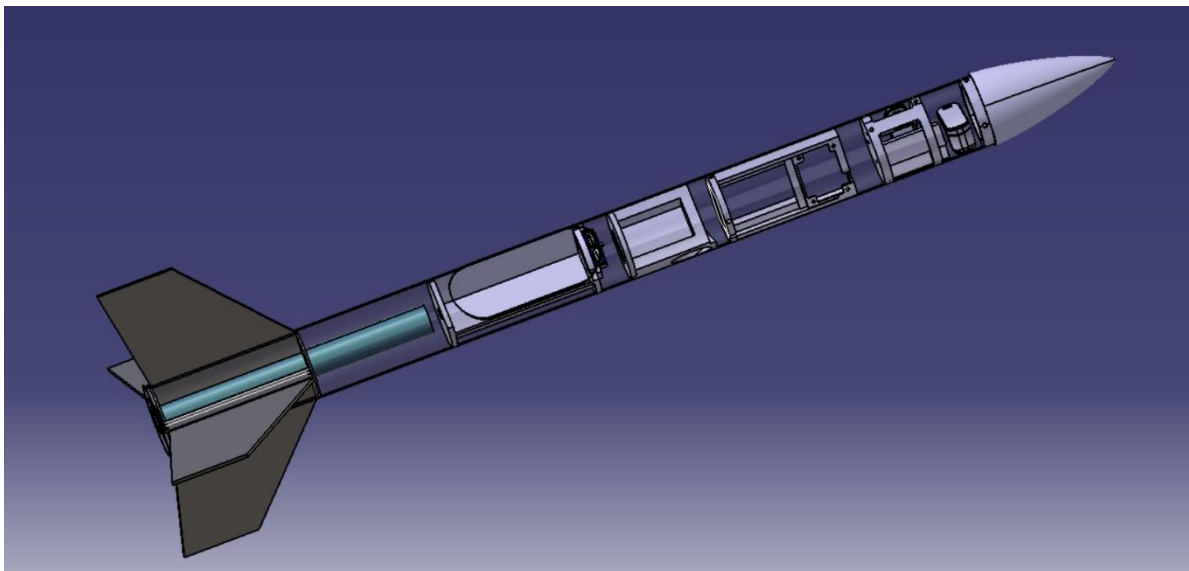


Figure 9 : Catia d'HORIZON



L'intérieur de la fusée est composé de bas en haut :

- Du porte propulseur et des bagues
- De la cage para
- Du module d'affichage et de récupération
- Du module expériences
- Du module caméras

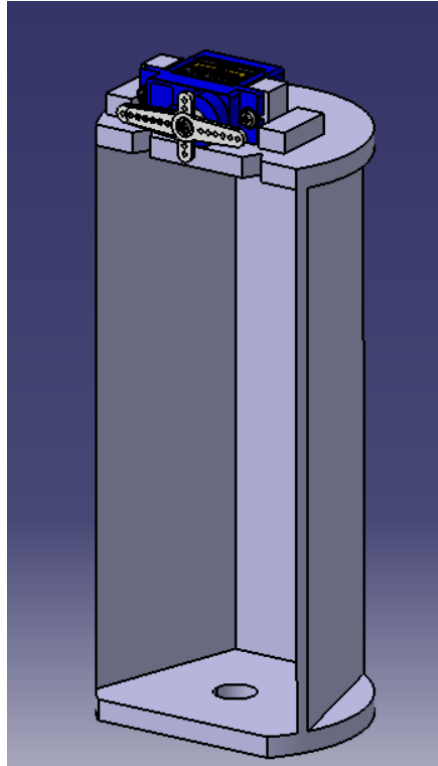


Figure 10 : Cage contenant le parachute

La cage parachute est fixée à une plaque de 3mm de delrin et accueille un servomoteur pas à pas qui vient se loger dans un support fixé à la trappe afin de la retenir et de permettre l'ouverture à l'apogée.

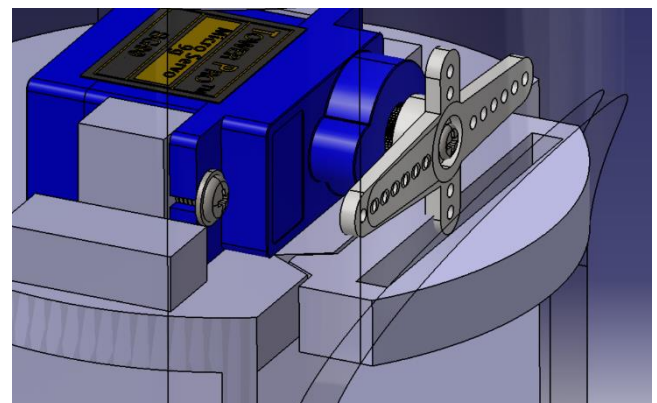


Figure 11 : Gros plan sur le verrou retenant la trappe

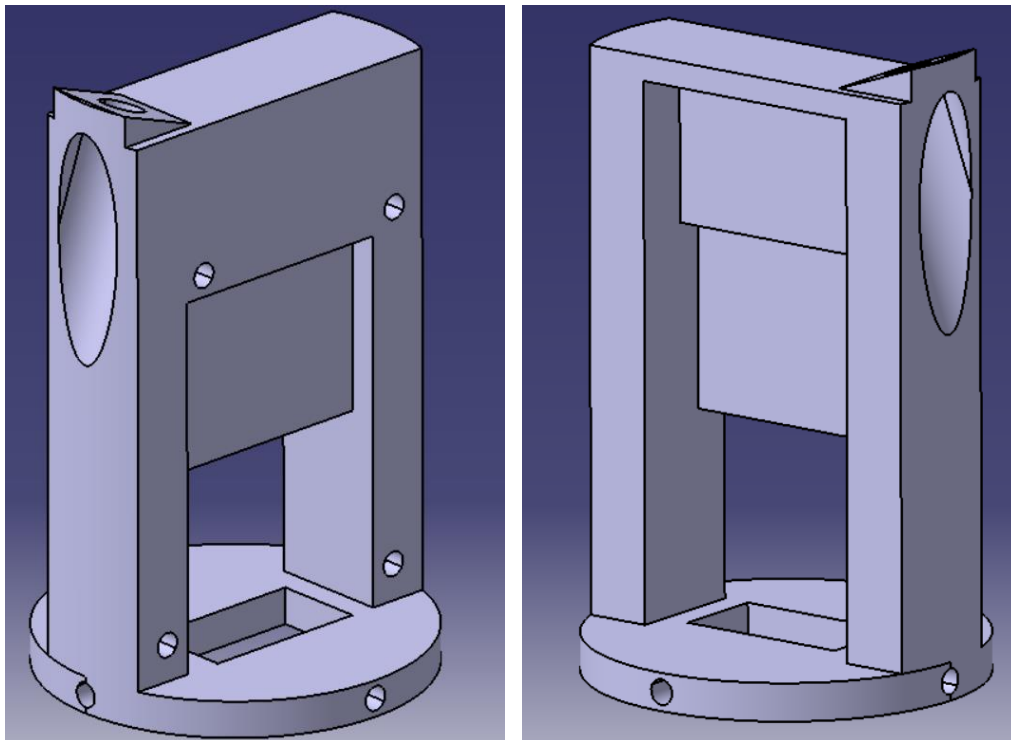


Figure 12 et 13 : Support PCBs affichage/récupération

Le module affichage & récupération accueille la PCB qui contrôle l'allumage de la fusée par les switches, détecte le débranchement du jack et joue le rôle du séquenceur pour le déploiement du parachute. C'est l'interface homme-machine de la fusée.

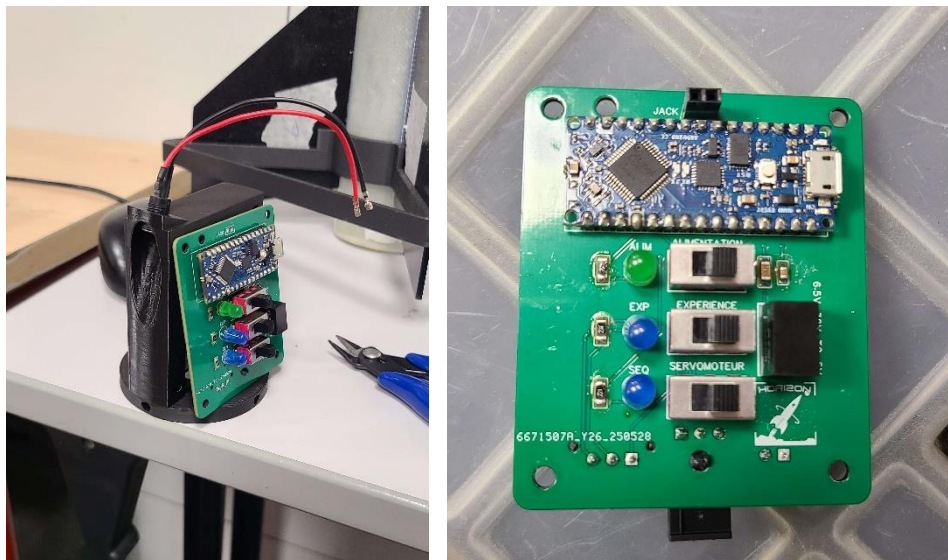


Figure 14 et 15 : Carte affichage/séquenceur

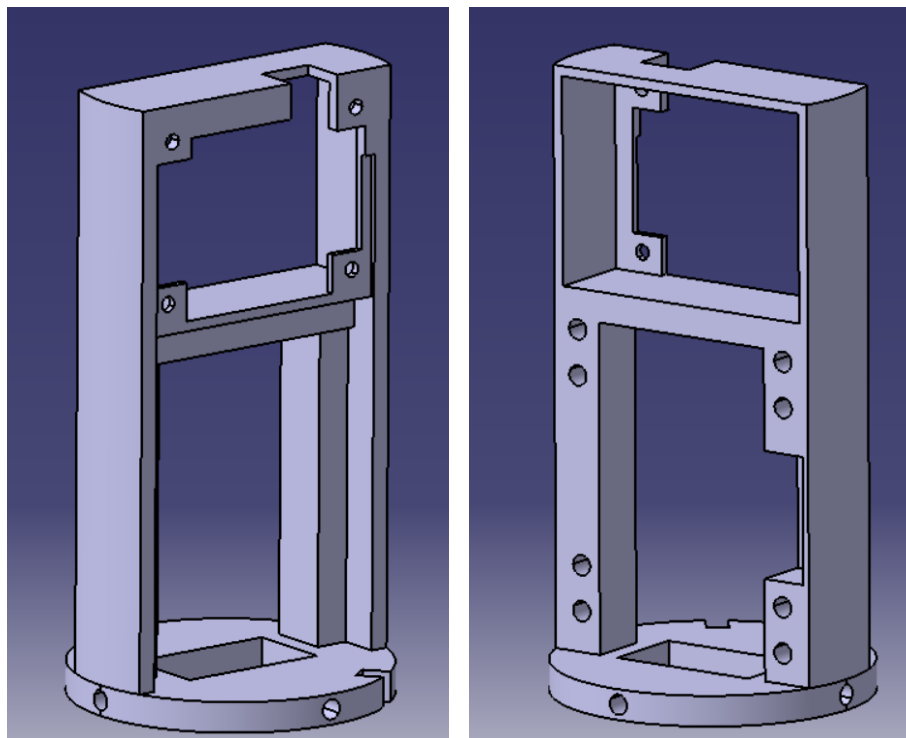


Figure 16 et 17 : Support PCBs expériences

Le module expériences est le support de la PCB expérience d'HORIZON et de la PCB de télémesure d'APEX.

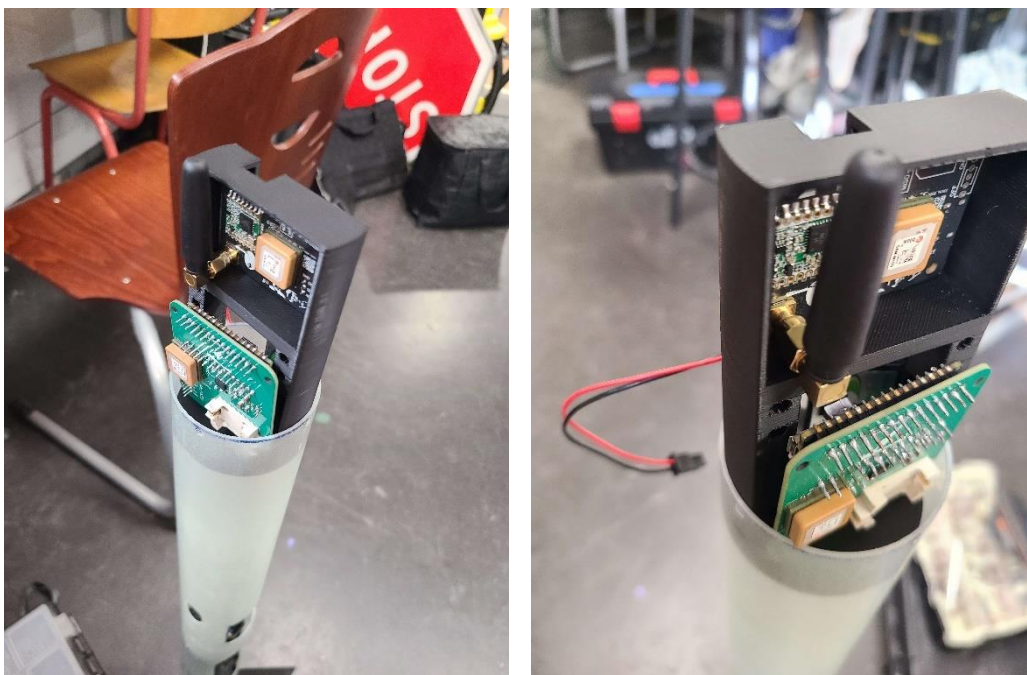


Figure 18 et 19 : Support expériences dans le tube (APEX en haut et la carte d'HORIZON en bas)

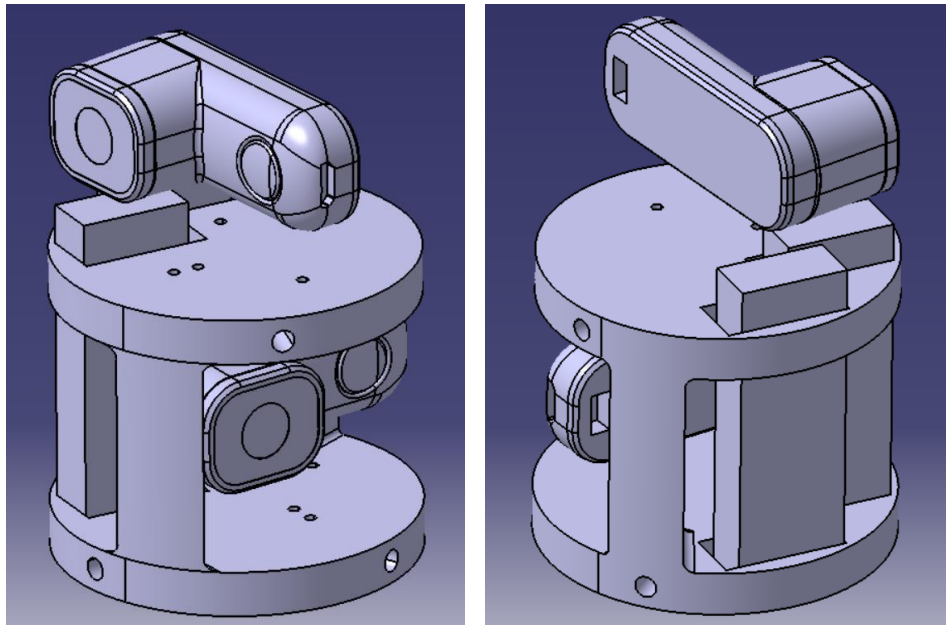


Figure 20 et 21 : Support caméras avec les deux Runcams et leurs batteries LiPo

Les caméras utilisées sont 2 Runcam Thumb Pro W d'une FOV de 155° afin d'obtenir un peu moins de 310° au total en vue du fait que les images doivent se superposer afin de faire une vraie vidéo grand angle. L'angle de 360° initiale a donc été réduit dû à des limitations de budget et de place dans la fusée.



Figure 22 : Runcam Thumb Pro W



Figure 23 : Runcam allumée avec la NiMH

Les caméras, nécessitant une tension d'alimentation individuelle constante d'environ 5V, étaient alimentées initialement par deux batteries NiMH de 4,8V afin d'assurer l'enregistrement du vol en maximisant la durée de vie des caméras jusqu'à décharge totale des batteries (plus de 2h) au cas où la fusée aurait dû rester longtemps sur le pas de tir. Malheureusement, en raison de leur composition, lorsque les NiMH sont branchés, leur tension chute drastiquement pour ensuite être constante contrairement aux LiPo qui restent constantes et donne le maximum de leur voltage jusqu'à décharge totale.

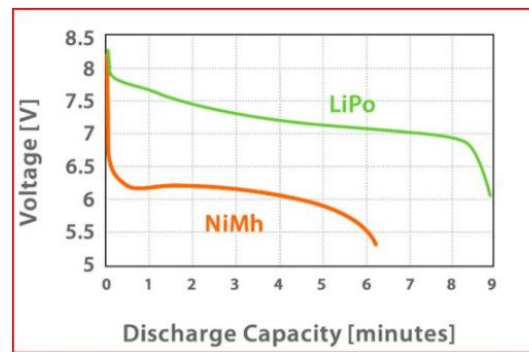


Figure 24 : Courbes de décharges des batteries NiMH et LiPo

Les NiMH passaient donc en dessous de la barre minimum d'alimentation pour les caméras (environ 3,1V) et ces dernières s'éteignaient au bout de quelques secondes. La solution a donc été d'acheter des LiPo de 3,7V, 1100mAh pour tenir la charge constante requise durant au moins 2h.



Figure 25 : LiPo de remplacement



Figure 26 et 27 : A gauche, la disposition initiale des caméras et à droite, la disposition finale

Comme dit précédemment, la disposition des caméras a dû être changée à cause d'un mauvais calcul des dimensions du diamètre de la fusée et des caméras. Le nombre de

caméras est aussi passé de 3 ou 4 à 2 pour rester dans le budget. Leurs FOVs ne couvrent donc pas les 360° prévus mais l'angle couvert reste très large et permet d'avoir un très bon aperçu du vol.

1.4 – Parachute

Le parachute utilisé est en forme de croix et est de couleur orange.

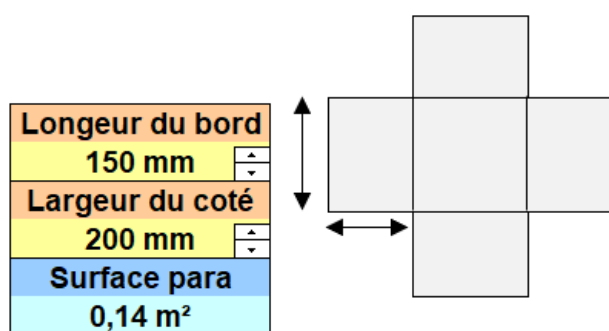


Figure 28 et 29 : Dimensions du parachute et parachute cousu

2 – Partie électronique

2.1 – Carte séquenceur

Les composants de la PCB affichage/séquenceur sont :

- Arduino Nano Every
- 3 Slide switchs SPDT :
 - Switch « Alimentation » pour alimenter le séquenceur
 - Switch « Expérience » pour alimenter l'expérience (+5V, GND et batteries séparées de cette PCB)
 - Switch « Servomoteur » pour ouvrir et fermer la trappe lors des essais
- LEDs pour l'interface homme-machine
- Résistances
- Condensateurs
- Régulateurs DC-DC
- Connecteurs Molex pour relier la batterie d'alimentation, le servomoteur et la carte expérience

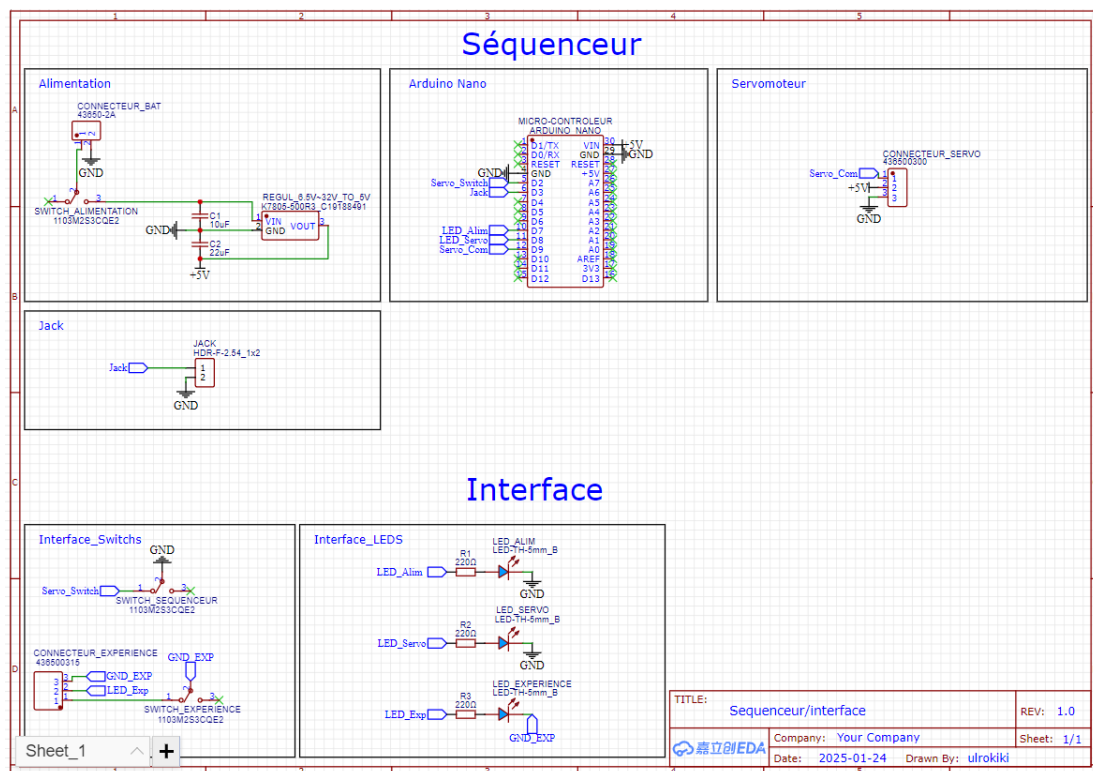


Figure 30 : Schéma du circuit de la carte affichage/séquenceur sur EasyEDA

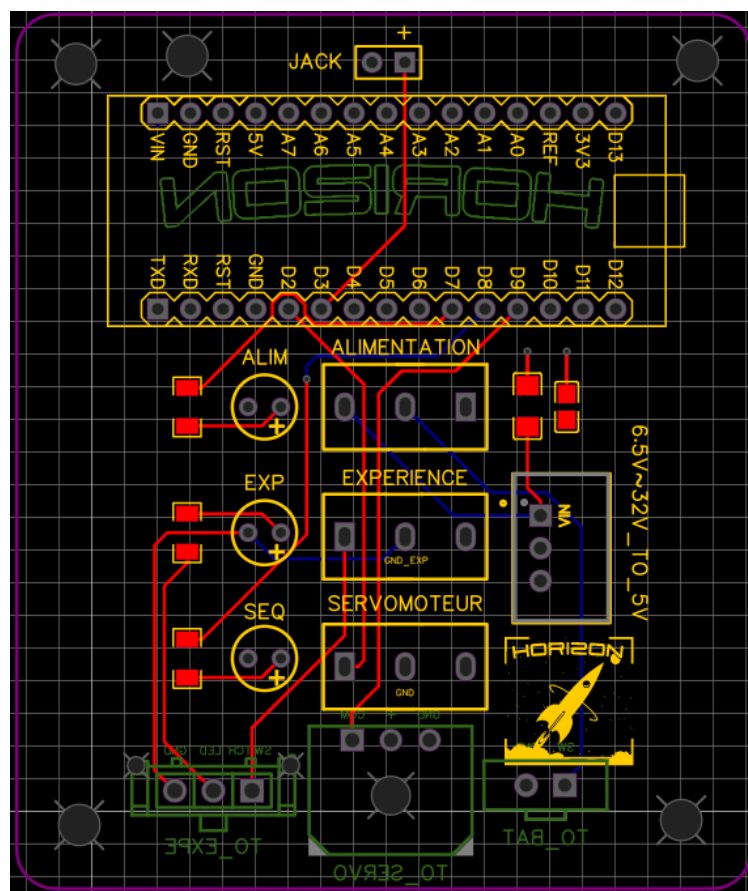


Figure 31 : PCB affichage/séquenceur sur EasyEDA

2.2 – Carte expérience

Les composants de la PCB expérience sont :

- Arduino Nano Every
- GNSS SAM-M10Q Ublox
- IMU BNO085 CEVA
- Lecteur MicroSD
- Pile de backup pour le GNSS
- Résistances
- Condensateurs
- Régulateurs DC-DC
- Connecteurs Molex pour relier la batterie d'alimentation et la carte affichage/séquenceur

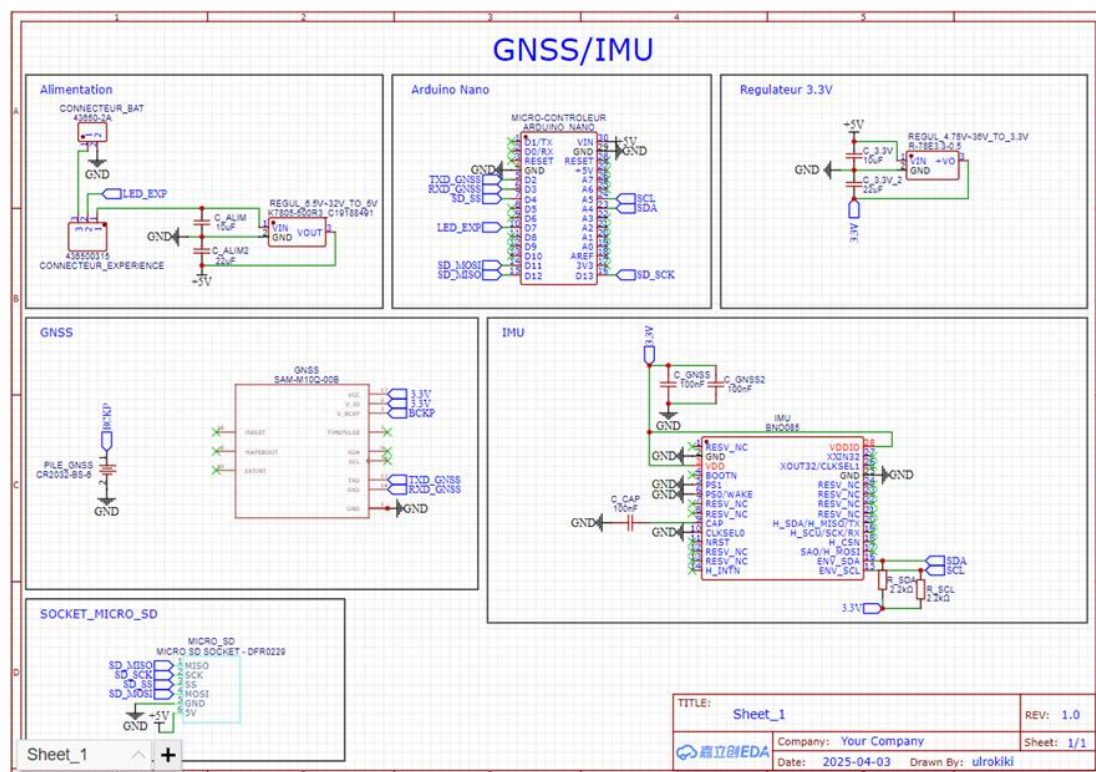


Figure 32 : Schéma du circuit de la carte expérience

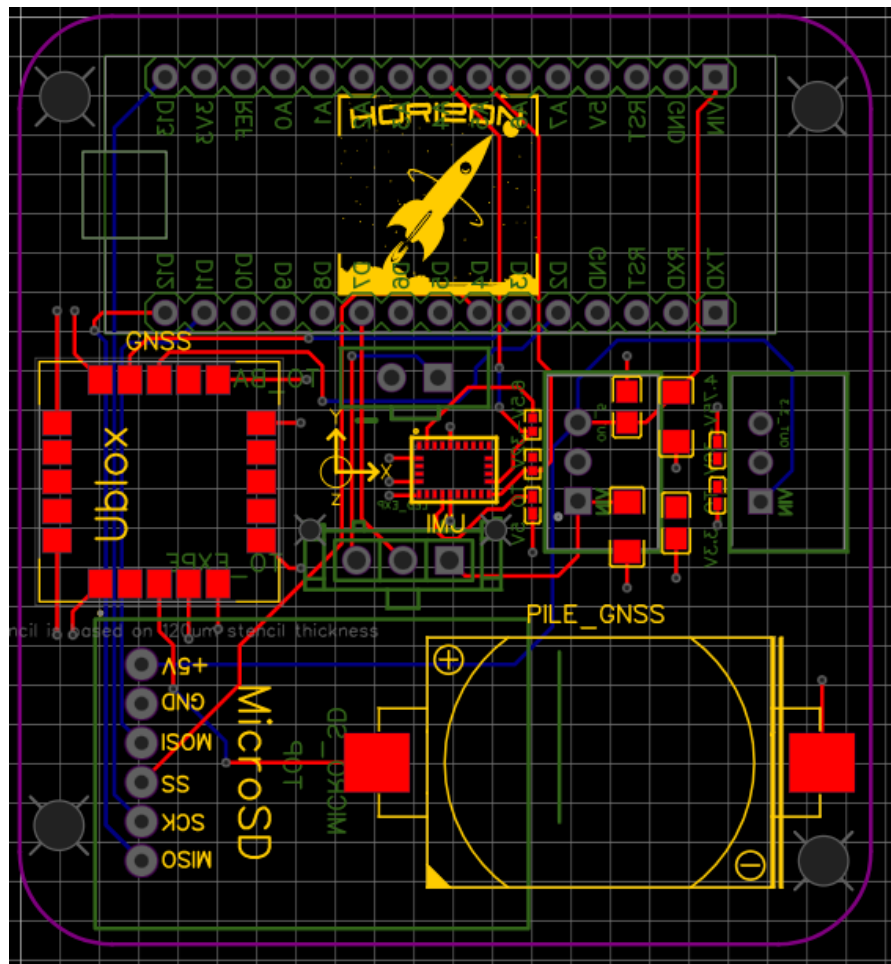


Figure 33 : PCB expérience

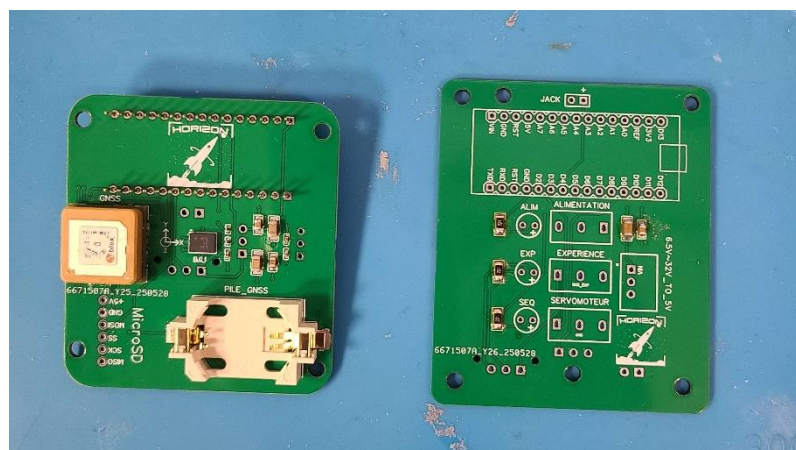


Figure 34 : De gauche à droite, cartes expérience et affichage/séquenceur

2.3 – Carte APEX



Figure 35 : PCB d'APEX en noir dans le module expérience

Comme cité dans la partie « Objectifs », le projet APEX a été rajouté au cours de l'année. C'est une carte programmable composée de nombreux capteurs et GNSS qui ont pour but de communiquer et d'envoyer des mesures à une station sol lors du vol de la fusée. *(Voir le rapport d'APEX en annexe)*

Le projet est également présent sur 2 autres projets d'AéroIPSA : Prisma et MROM. La carte a donc pris place dans la partie supérieure du module expérience.

3 – Vol et résultats

3.1 – Déroulement du vol

Après avoir été qualifié le mercredi 9 juillet, HORIZON et ses membres sont appelés le lendemain matin en tente ZAS pour un lancement possible avant la pause du déjeuner. Arrivés en tente ZAS (et après pas mal de négociations), la chronologie est lancée, le GNSS est allumé et les caméras sont alimentées.

Quelques 10min plus tard, HORIZON et ses accompagnateurs se dirigent vers les rampes pour commencer la dernière étape de la chronologie. Le séquenceur est allumé, les caméras sont lancées et les LEDs vérifiées. Tout se déroule sans problème jusqu'au moment de vérifier la bonne réception de la télémesure d'APEX, la station sol ne reçoit rien et la LED de la carte n'est pas visible (la batterie LiPo d'APEX a été scotchée le matin même à un endroit différent que d'habitude et la LED était donc cachée par celle-ci).

J'ai choisi de continuer la préparation au lancement vu qu'APEX n'était pas un élément principal du projet et que l'on approchait de la fin du C'Space.



Figure 36 : Photo de groupe avant lancement

La chronologie est terminée, tout le monde se retire du pas de tir pour aller en zone pupitre, les pyrotechniciens insèrent le propulseur Pandora, nous rejoignent en zone pupitre et, 2 minutes après, Jupiter lance le décompte.



Figure 37 : Attente des pyros en zone pupitre



HORIZON décolle le jeudi 10 juillet 2025 à 12h04 de la rampe Minif centrale, le parachute se déploie au bout de 6,7 secondes juste après l'apogée et la fusée atterrit sans dommages, quelques dizaines de mètres plus loin, après un vol de 30 secondes. Le vol est **nominal**.



Figure 38 et 39 : Décollage d'HORIZON

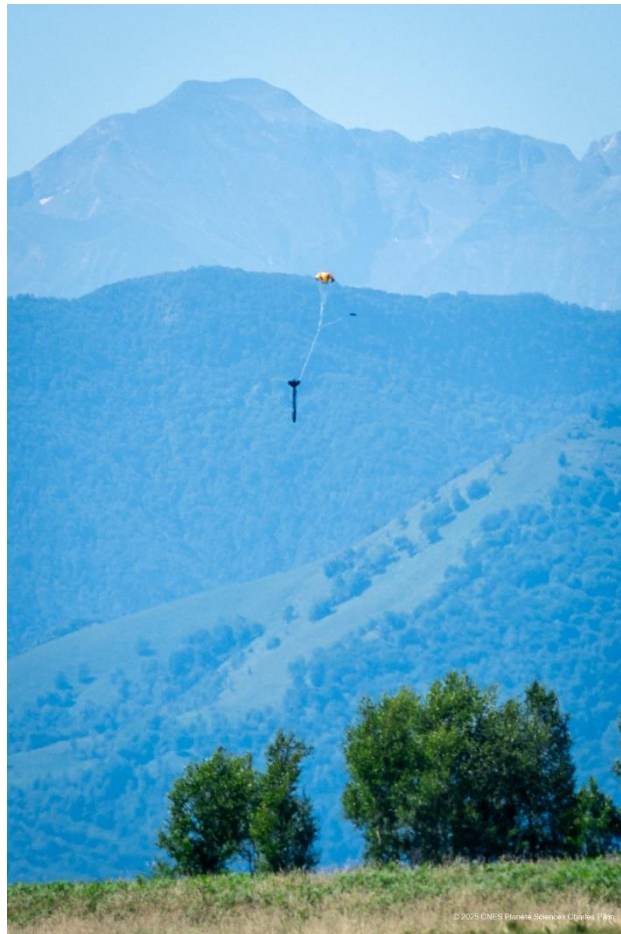


Figure 40 : HORIZON sous parachute

La fusée est récupérée dans les 7 minutes après son lancement.

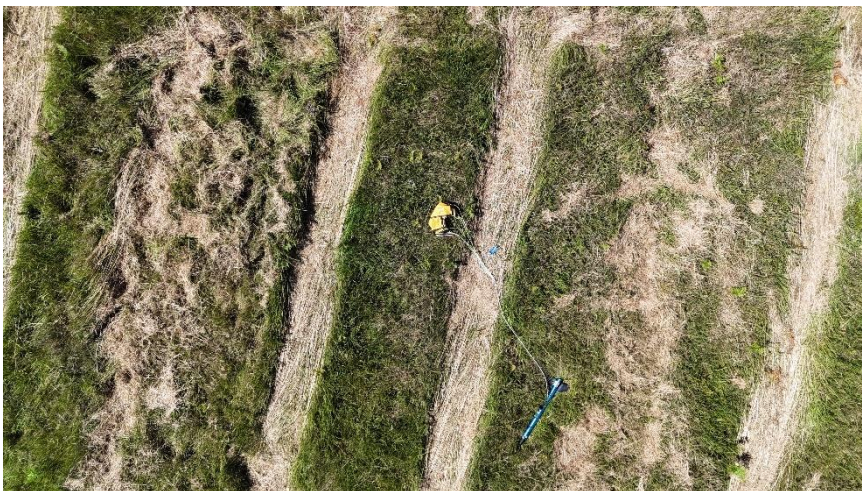


Figure 41 et 42 : Zone d'atterrissage d'HORIZON (vue du drone et à pied)



Figure 43 : L'équipe d'HORIZON allant chercher la fusée

3.2 – Traitement des données récupérés

3.2.1 – Les caméras

Après récupération, nous avons directement vu que les caméras étaient encore allumées et enregistraient, elles se sont éteintes peu après durant le retour à la tente ZAS par manque de batterie. Les LiPo ont donc parfaitement fait leur job.

Une fois la fusée démontée, nous avons vu qu'APEX était bien allumé, la LED était cachée par la batterie.

Les rushs vidéo sont parfaits ! Aucune perte de focus, aucun tremblements ou vibrations et, malgré la différence de hauteur des caméras sur le support, les vidéos se superposent parfaitement, l'angle est suffisamment large. Les vidéos sont en 2.7K, 60fps.



Figure 44 : Extrait des vidéos superposées



Figure 45 : Extrait des vidéos

Le décalage vertical est nécessaire pour aligner les vidéos, c'est dû à la différence de hauteur des caméras.

3.2.2 – L'expérience

La carte expérience a également bien fonctionné malgré la LED de retour visuelle défaillante, seul hic, l'IMU avait été mal branché lors de la réalisation de la PCB, j'ai inversé 2 PINs permettant de communiquer avec l'Arduino Every, la carte n'avait donc que le GNSS de fonctionnel. Mais, heureusement, comme les Runcams utilisées sont des caméras d'actions pour drone FPV, elles possèdent toutes un accéléromètre et une centrale inertielle intégrés prêts à l'emploi. Nous avons donc tout de même pu relever les vitesses et accélérations de la fusée comme prévu.

Après analyse des données de la microSD, nous avons eu la confirmation que le GNSS a bel et bien fonctionné, nous avons donc pu récupérer :

- La date et l'heure (UTC) (A ce moment de l'année, l'heure en France était d'UTC+2)
- La latitude
- La longitude
- L'altitude
- La vitesse 2D (Vitesse sol)
- La vitesse 3D (Vitesse sol + vitesse verticale)
- Le cap (°)
- L'Affaiblissement de la Précision Horizontale (HDOP)
- Le nombre de satellites visibles



Malheureusement, pour l'altitude, beaucoup de valeurs sont erronées. Dès le décollage, les valeurs passent de 0m ou 3m à 95 857m et 100 511m, les raisons possibles sont un dysfonctionnement du GNSS au niveau de la mesure d'altitude ou bien une sécurité limitant cette mesure lorsque le GNSS dépasse un certain nombre de « g ».

Le GNSS nous permet tout de même de tracer le parcours depuis la tente club jusqu'à la zone d'atterrissage et même le retour après récupération :

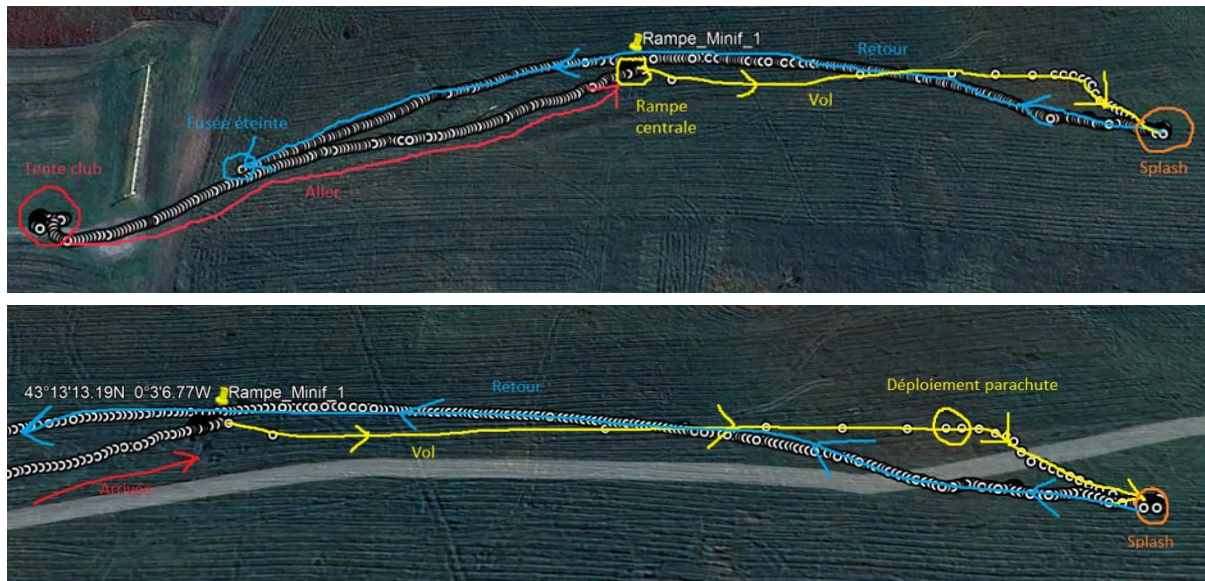


Figure 46 et 47 : Parcours de la fusée le jour de lancement

Le nombre de satellites visibles variait de 0 à 6 pendant l'aller, il est monté à 11 durant tout le vol, est redescendu entre 0 et 3 après l'atterrissage puis est revenu à 10 pour le retour. Nous avons donc eu une bonne communication de la position durant tout le vol. C'est parfait.

- La précision horizontale (HDOP) a également été excellente durant tout le parcours, variant de 0,5 à 0,6 (erreur de $\pm 2,5$ m), et atteignant au max 1,98 durant la phase de propulsion. (Plus la valeur est proche de 0, plus la précision est bonne puisque la valeur représente une erreur de précision)

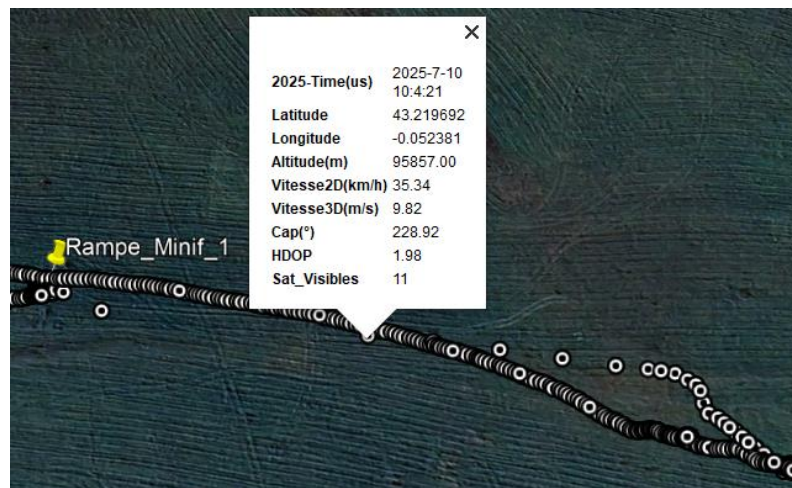


Figure 48 : Extrait de données durant le vol (phase de propulsion)

Pour donner un ordre d'idée :

- Précision idéale : <1
- Précision excellente : 1-2
- Précision bonne : 2-5
- Précision modérée : 5-10
- Précision faible : 10-20
- Précision mauvaise : >20

La vitesse par rapport au sol (2D) relevé est de 35-50km/h durant la propulsion puis de 6-7km/h en redescente. Quant à la vitesse totale (3D), on obtient les mêmes valeurs que la vitesse sol (ce qui voudrait dire que la fusée vole horizontalement), cela peut découler du problème de mesure de l'altitude ou d'une faute faite dans le programme du GNSS.

Comme dis précédemment, les deux caméras sont intégrées d'un accéléromètre et d'un gyroscope permettant d'avoir des informations précieuses lors du pilotage de drone FPV. Dans notre cas, ces capteurs ont été précieux pour remplir l'objectif initial de l'IMU.



Figure 49 : Support caméras

Ces données sont celles mesurées par la caméra inférieure (la plus proche du centre de masse), voici les données une fois traitées :

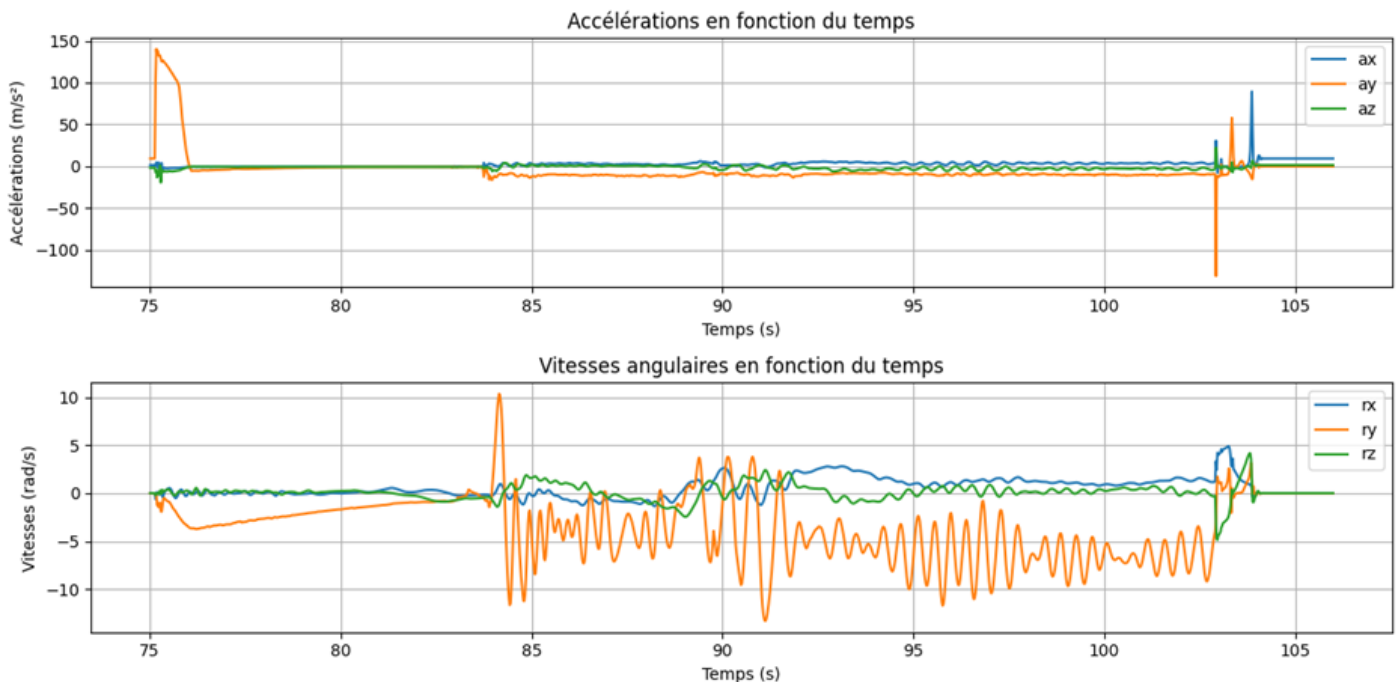


Figure 50 : Données des caméras (Y est l'axe de roulis (vertical) de la fusée vers le haut)

La fusée décolle à environ $t = 75,1s$ (Avec $t = 0s$ étant le moment où la caméra a commencé à enregistrer). On voit bien la phase de poussée de $75,1s$ à $76,1s$ sur la courbe « ax » puis l'apogée entre $82s$ et $84s$ sur les deux graphes, la descente sous parachute où la fusée tourne sur elle-même, observable par les grands pics de vitesse après $t = 84s$ sur la courbe « ry », et enfin, l'impact au sol un peu avant $t = 103s$ (avec le grand pic négatif de « ay ») pour un retour à des valeurs constantes à $t = 104,1s$.

Nous avons donc précisément 29 secondes depuis la première variation de vitesse mesurée dès l'allumage du propulseur jusqu'à la dernière variation de vitesse après l'atterrissage.

Avec les accélérations relevées par les caméras, j'ai voulu voir si on retrouvait la trajectoire mesurée par le GNSS mais, cette fois-ci, avec l'altitude de fonctionnelle.

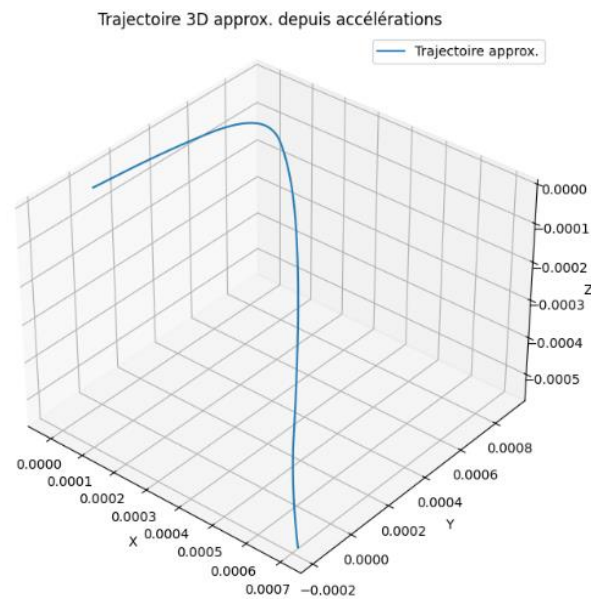


Figure 51 : Graphique en 3D de la trajectoire calculée à partir des accélérations des caméras

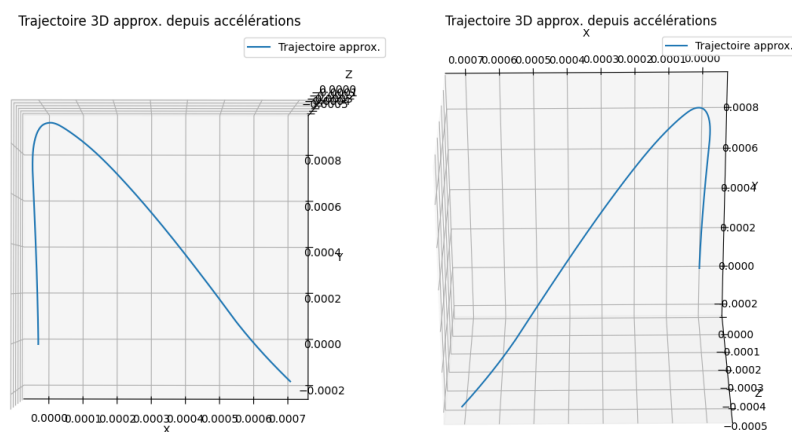


Figure 52 et 53 : Graphiques en 3D positionnés pour voir Y en fonction de X

En intégrant deux fois les accélérations, on obtient la trajectoire sur X, Y et Z. Sur les graphiques 3D, on voit bien la trajectoire de la fusée avec la phase de propulsion/montée, l'apogée et la descente sous parachute.

3.2.3 – APEX la légende

Les checks visuel et sonore n'ont pas pu être faits sur la rampe. La station sol n'a également rien reçu lors du test de réception.



Après le vol, comme dis précédemment, la carte a été retrouvée allumé, cependant, aucune donnée n'a été enregistrés dans la SD. L'équipe d'APEX pense qu'un faux contact au niveau du connecteur de la batterie n'aurait allumé APEX qu'après l'impact de l'atterrissage. La carte aurait été alors bel et bien éteinte lors de la préparation en rampe, ce qui expliquerait l'absence totale de retour visuelle ainsi que sonore lors de son démarrage. Il n'y a donc pas eu de télémesure sur le projet HORIZON. *(Voir plus de détails en annexe sur le rapport d'APEX)*

III – Conclusion

Cette année a été extrêmement enrichissante, nous avons accompli tous les objectifs que nous nous étions fixés au départ, seul l'angle prévu de 360° pour les caméras a été réduit dû à des limitations d'espace, mais je suis déjà très heureux d'avoir pu enregistrer le vol en bonne qualité avec plusieurs caméras et d'avoir eu les données souhaitées.

Merci encore aux membres d'avoir aidé sur le projet, que ce soit durant quelques semaines ou tout au long de l'année, merci à Planète Sciences et au CNES d'organiser un tel événement, au 1^{er} RHP de nous accueillir sur leur base à Tarbes et à AéroIPSA de permettre de participer à cette aventure incroyable.

Résumé des expériences :

- ✓ Enregistrement du vol en grand-angle
- ✓ Récupération de la position, de la vitesse et des accélérations
- ✓ IMU mal branché mais IMU des caméras fonctionnel
- ✗ Télémesure d'APEX

Le projet HORIZON - MF09 est une réussite.



IV – Annexes

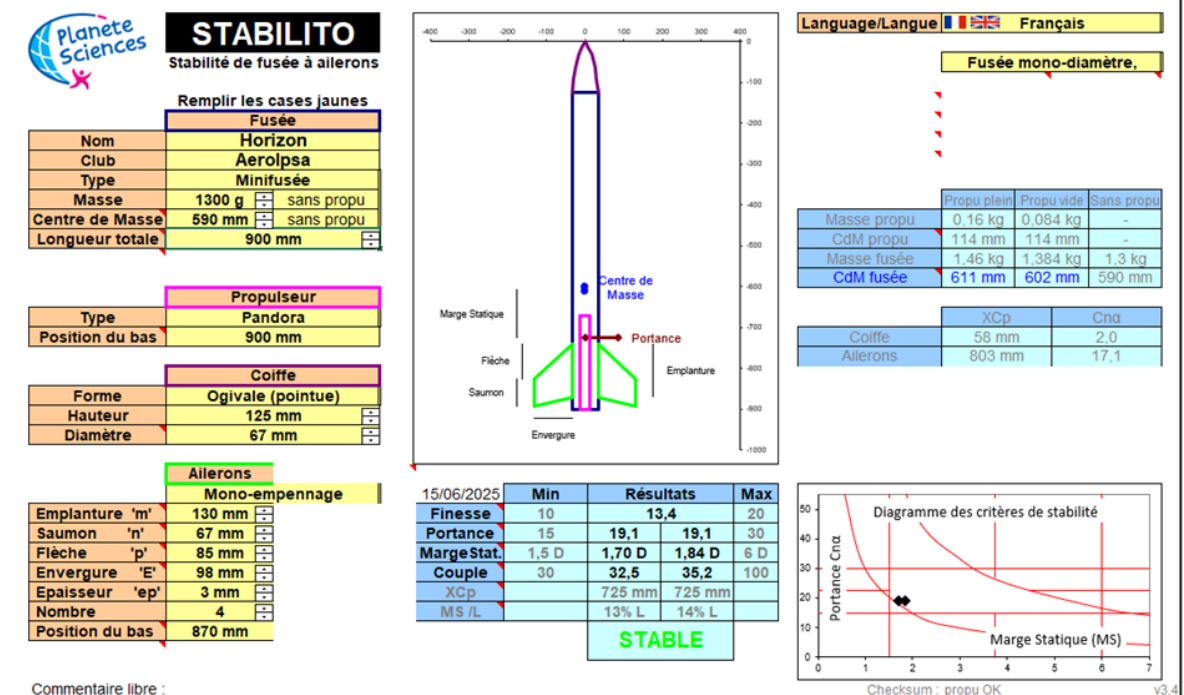


Figure 54 : Stabilito

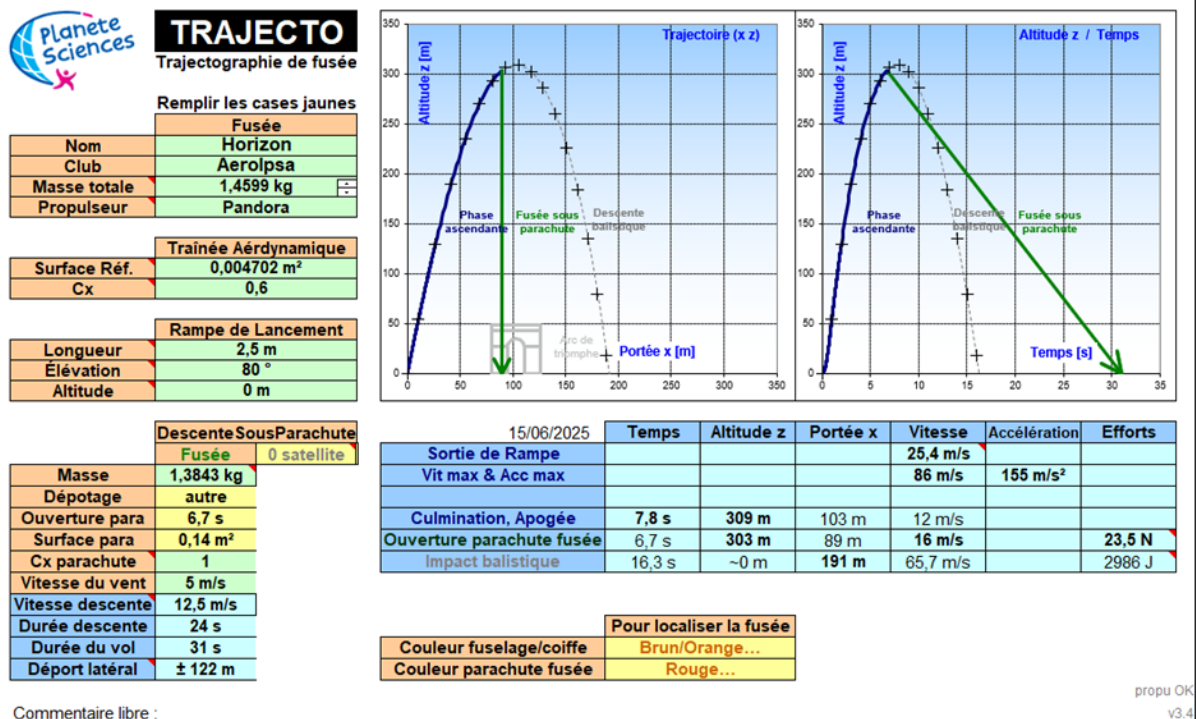


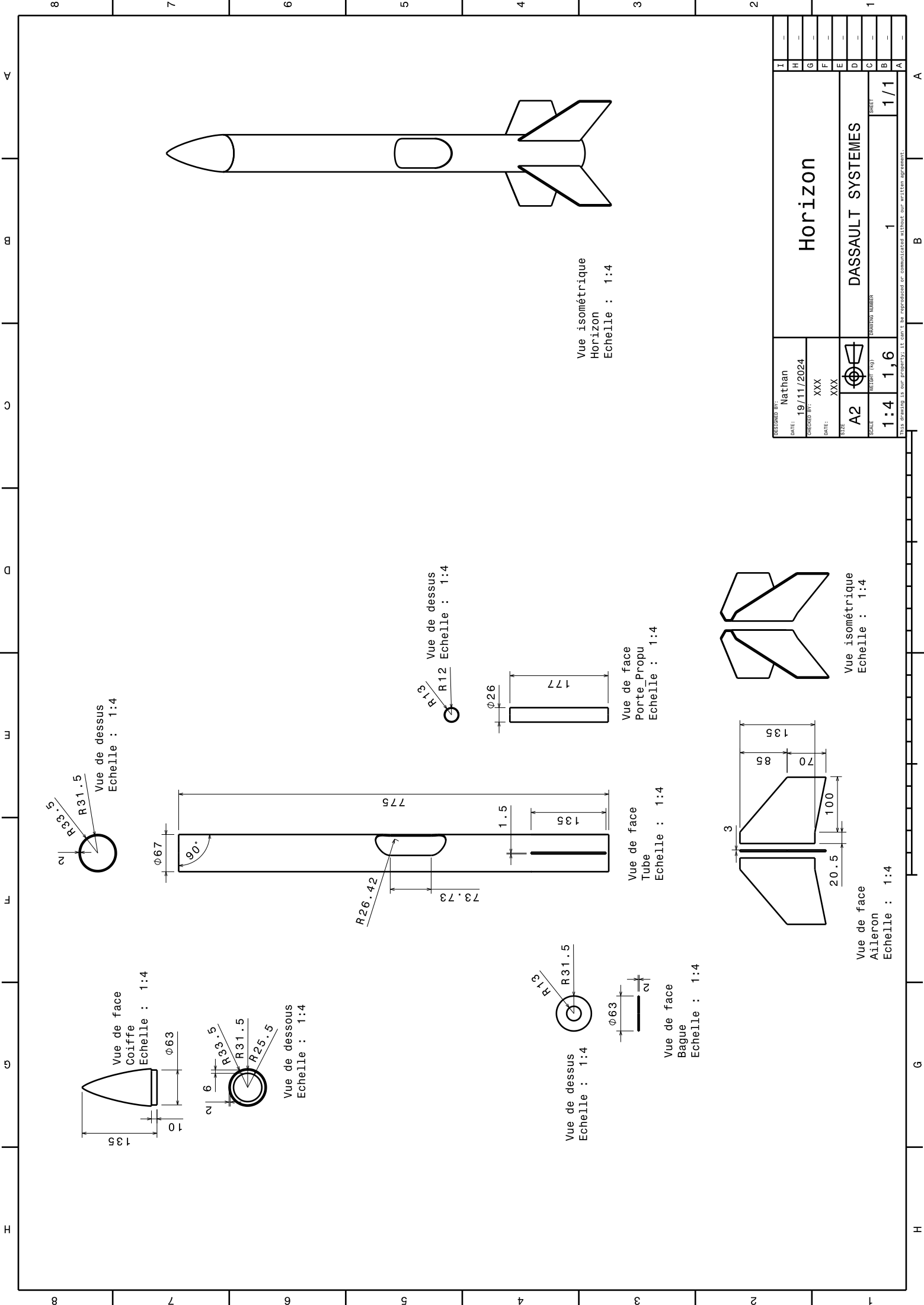
Figure 55 : Trajecto



Figure 56 : HORIZON en train d'être peint



Figure 57 et 58 : HORIZON en contrôle et le matin du lancement



DESIGNED BY: Nathan		Horizon		I
DATE: 19/11/2024	DRAWING BY: XXX			H
DATE: XXX	DATE: XXX			G
SIZE: A2	WEIGHT (kg): XXX			F
DASSAULT SYSTEMES		DASSAULT SYSTEMES		E
DRAWING NUMBER				D
SCALE				C
WEIGHT (kg)				B
1:4	1,6	1		1/1
1/1		A		A

APEX

Rapport de projet

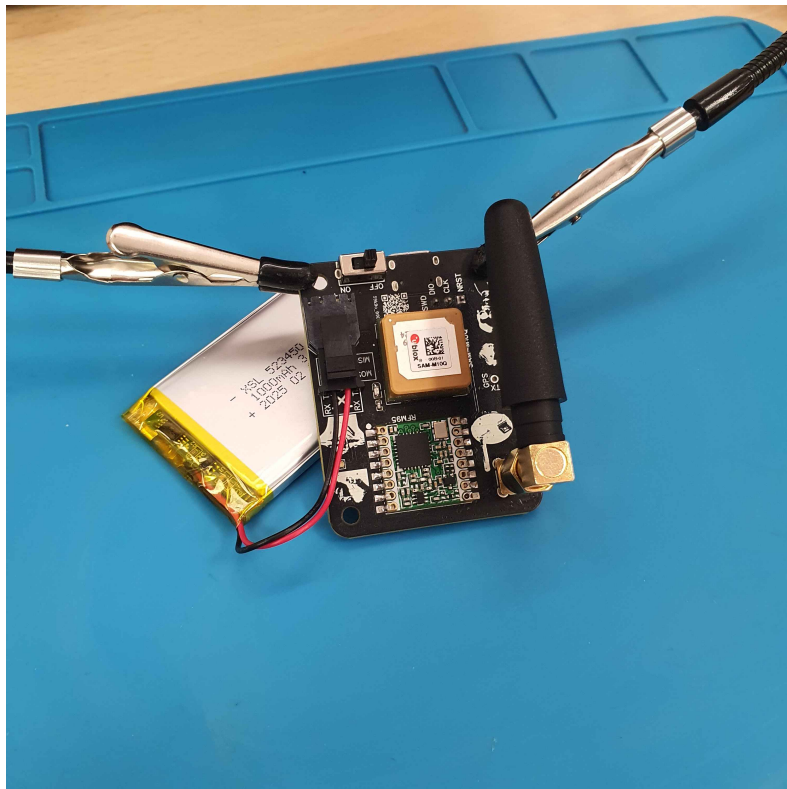


FIGURE 1 – Module APEX

Membres du projet :

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

Table des matières

1	Mise en contexte	2
2	Module électronique APEX	3
2.1	Présentation du module	3
2.2	Composants principaux	3
2.2.1	Microcontrôleur STM32F411RETx	3
2.2.2	Module de télémessure 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
3	Station sol APEX	10
3.1	Objectif du projet	10
3.2	Composition principale	10
3.3	Fonctionnement	10
4	Expériences et résultats	11
4.1	Prisma	11
4.2	Horizon	11
4.3	MROM	11

Table des figures

1	Module APEX	
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'AéroIPSA

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 LoRaTM 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 labélisés.

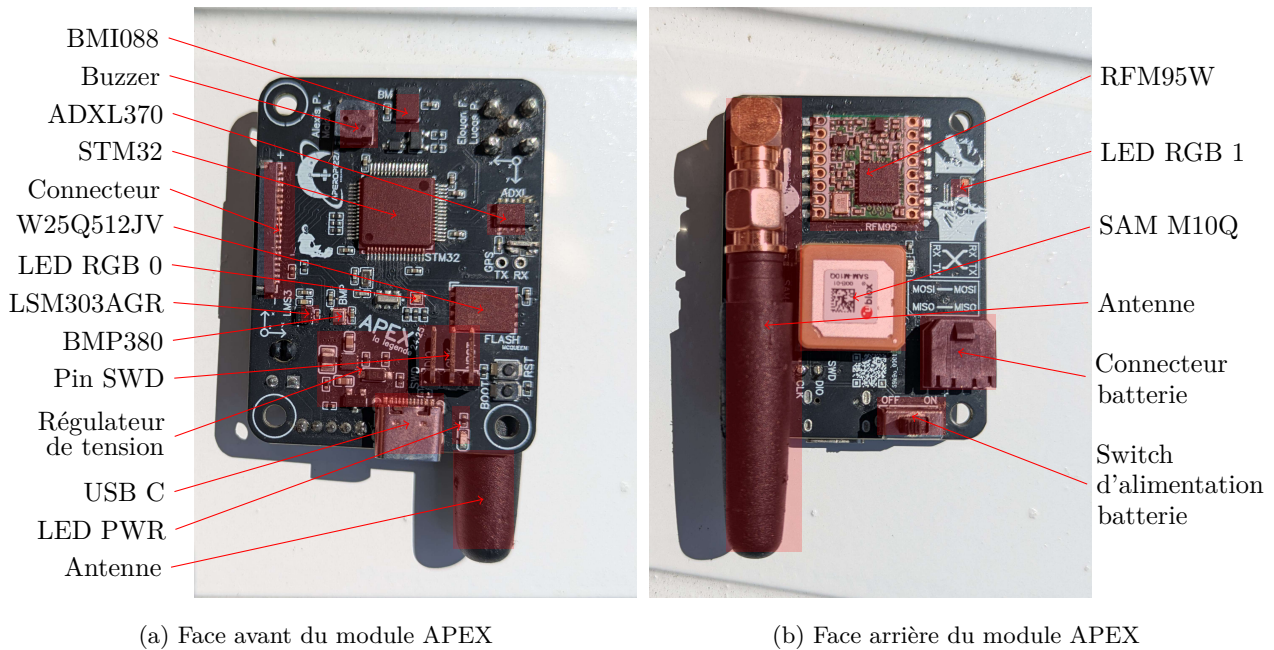


FIGURE 2 – Module APEX

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, LoRaTM et OOK dans la bande de fréquence 868/915 MHz¹. 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 une central de mesure inertiel (IMU²) 6 DOF³ 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 ± 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 ± 8 Pa soit ± 66 cm. La fréquence d'actualisation maximale est de 200 Hz. Il est également capable de mesurer la température avec une précision de $\pm 0.3^\circ C$.

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 BMS⁴ 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*⁵ 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.

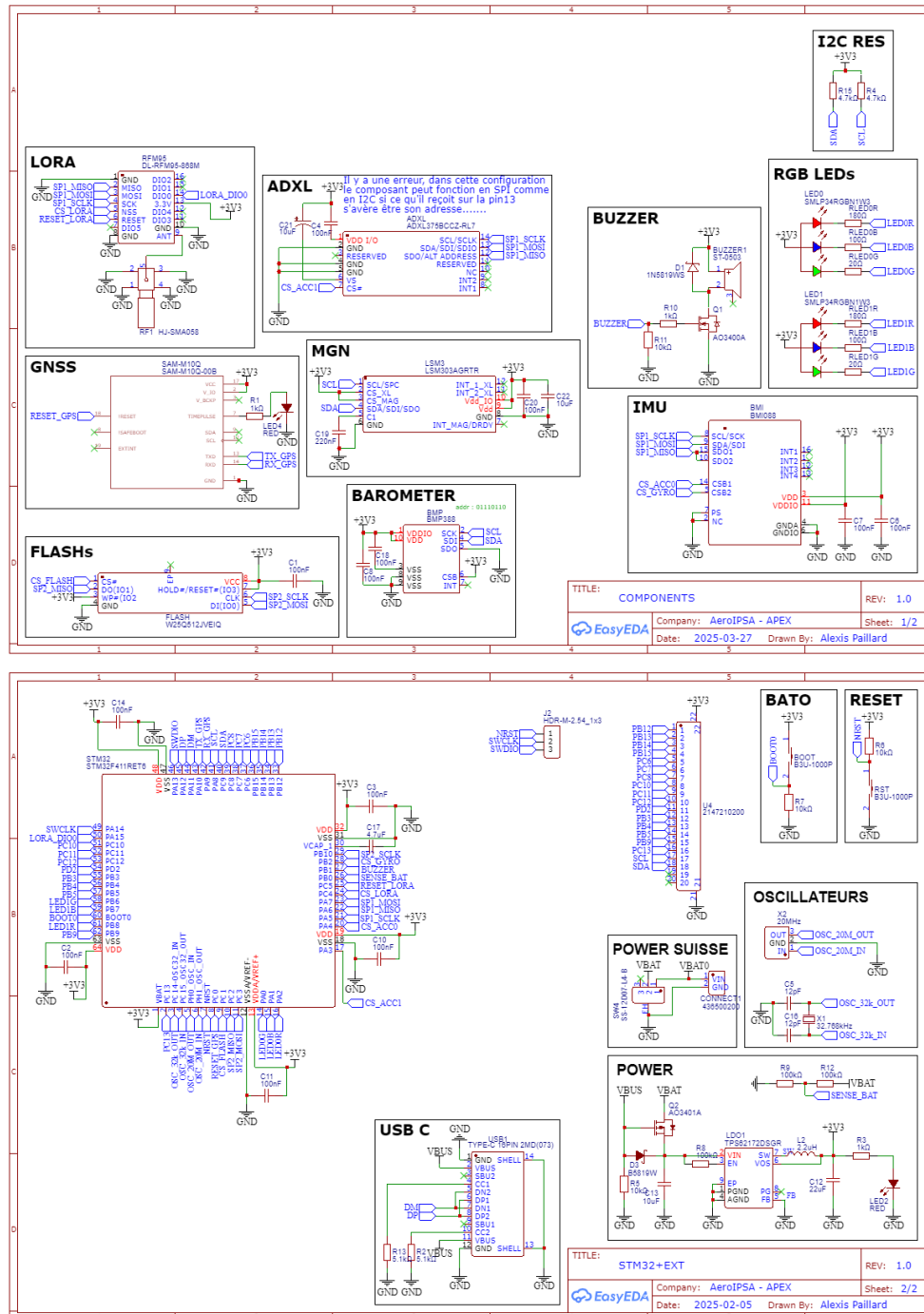


FIGURE 3 – Schéma du module APEX

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.

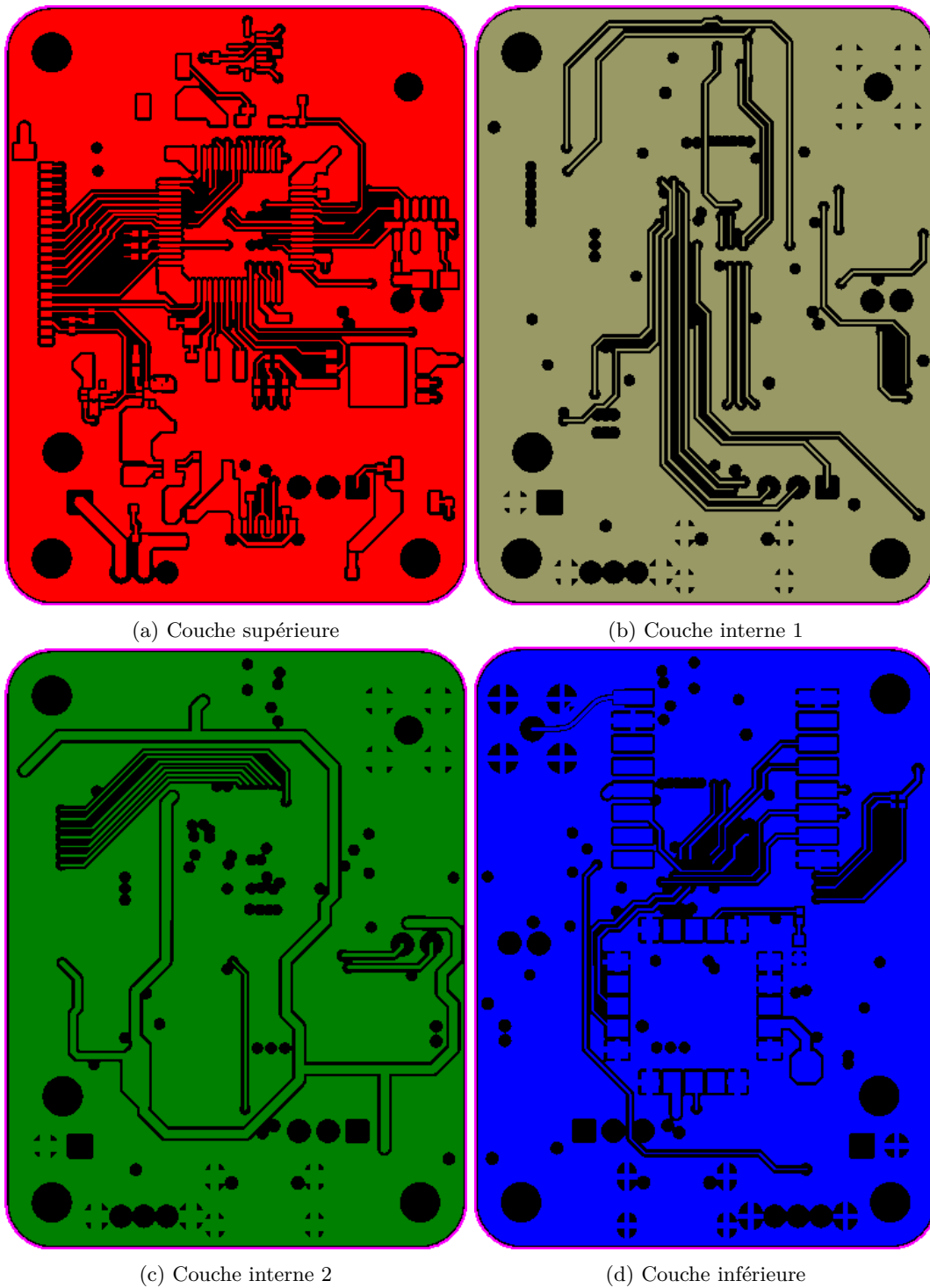


FIGURE 4 – Routage du module APEX

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 SMD⁶ 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 oscillateurs 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 / dessoudure 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 (RTOS⁷) 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 décode 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'AéroIPSA de l'année 2024-2025. Le module APEX a été embarqué sur une fusée⁸ (MROM), deux minif⁹ (Prisma et Horizon) et un cansat¹⁰ (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 cables 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 du 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.

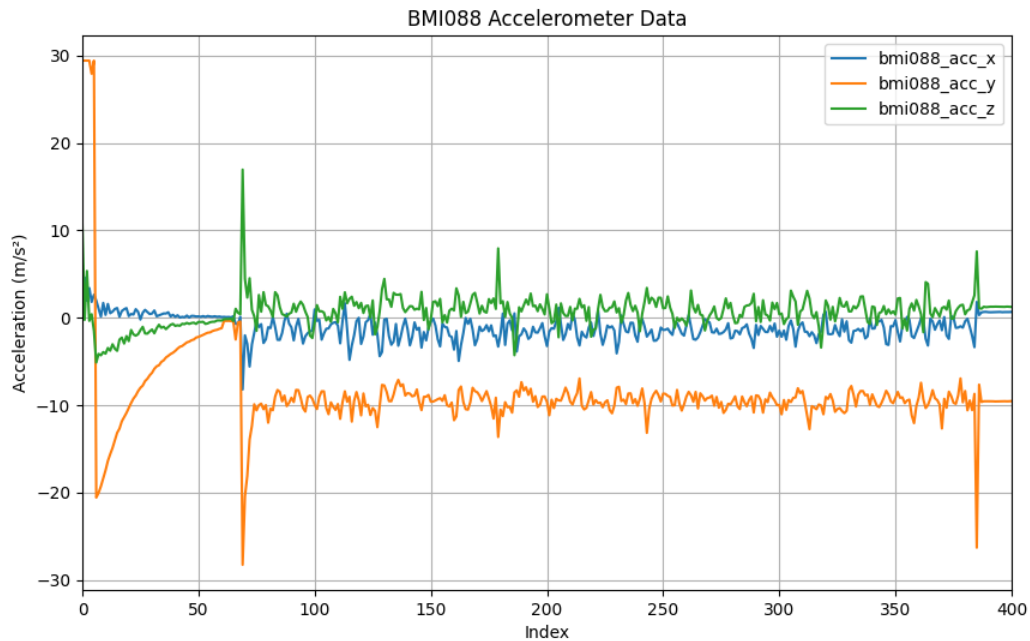
Lors du lancement de la fusée, la station sol APEX n'a pas afficher les données de télémesure comme espéré. En effet, les accélération subies par la fusée durant la phase propulsive n'ont pas été aperçu sur la station sol. Après analyse des données collectées par le module APEX, il s'est avéré que le 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.

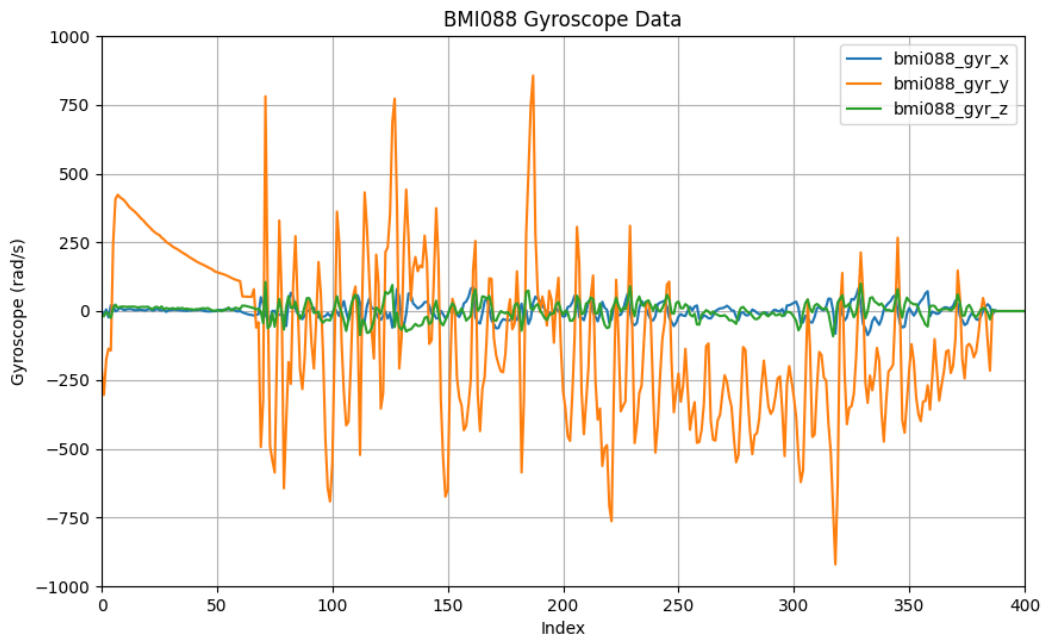
9. Fusée amateur possédant le moteur Pro24 ou équivalent.

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.