

---

# APEX

## Rapport de projet

---

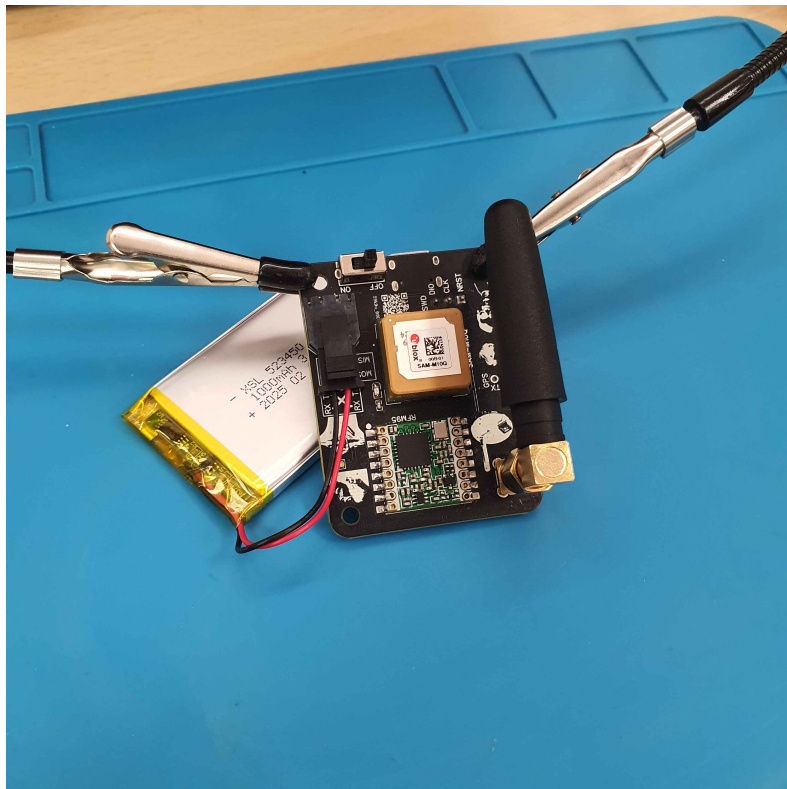


FIGURE 1 – Module APEX

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 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
<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 . . . . .	
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 LoRa<sup>TM</sup> 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.

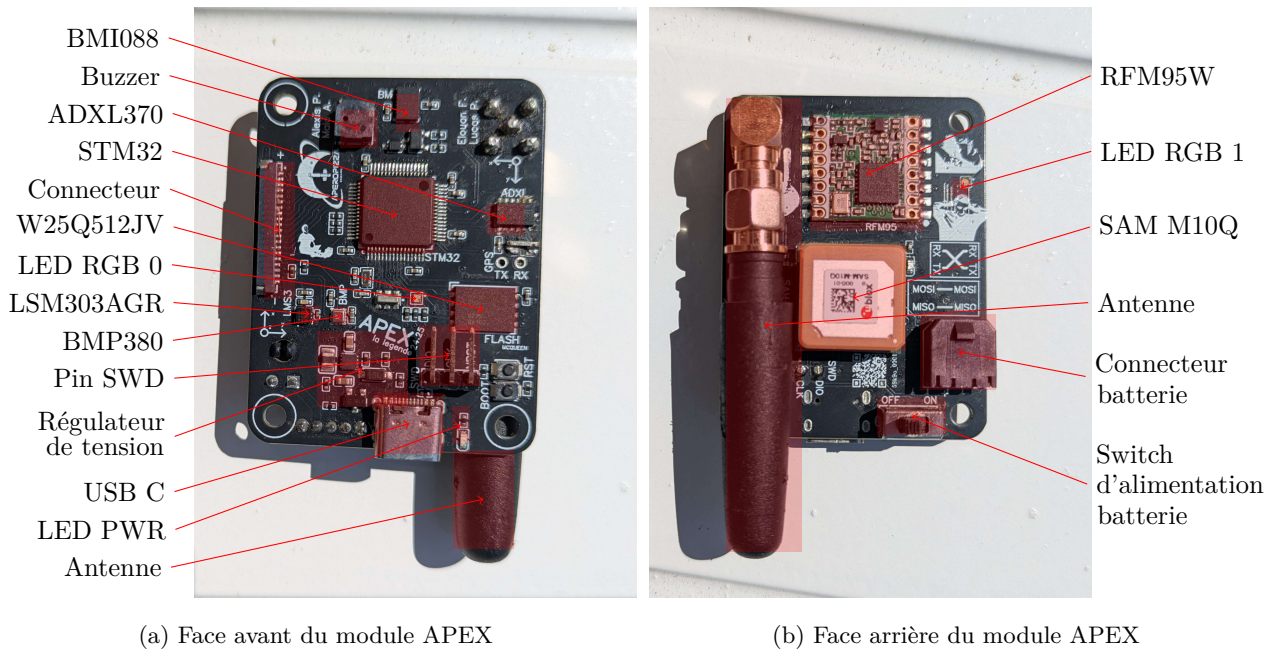


FIGURE 2 – Module APEX

### 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, 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 une 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  $\pm 0.3^\circ C$ .

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 debug 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.

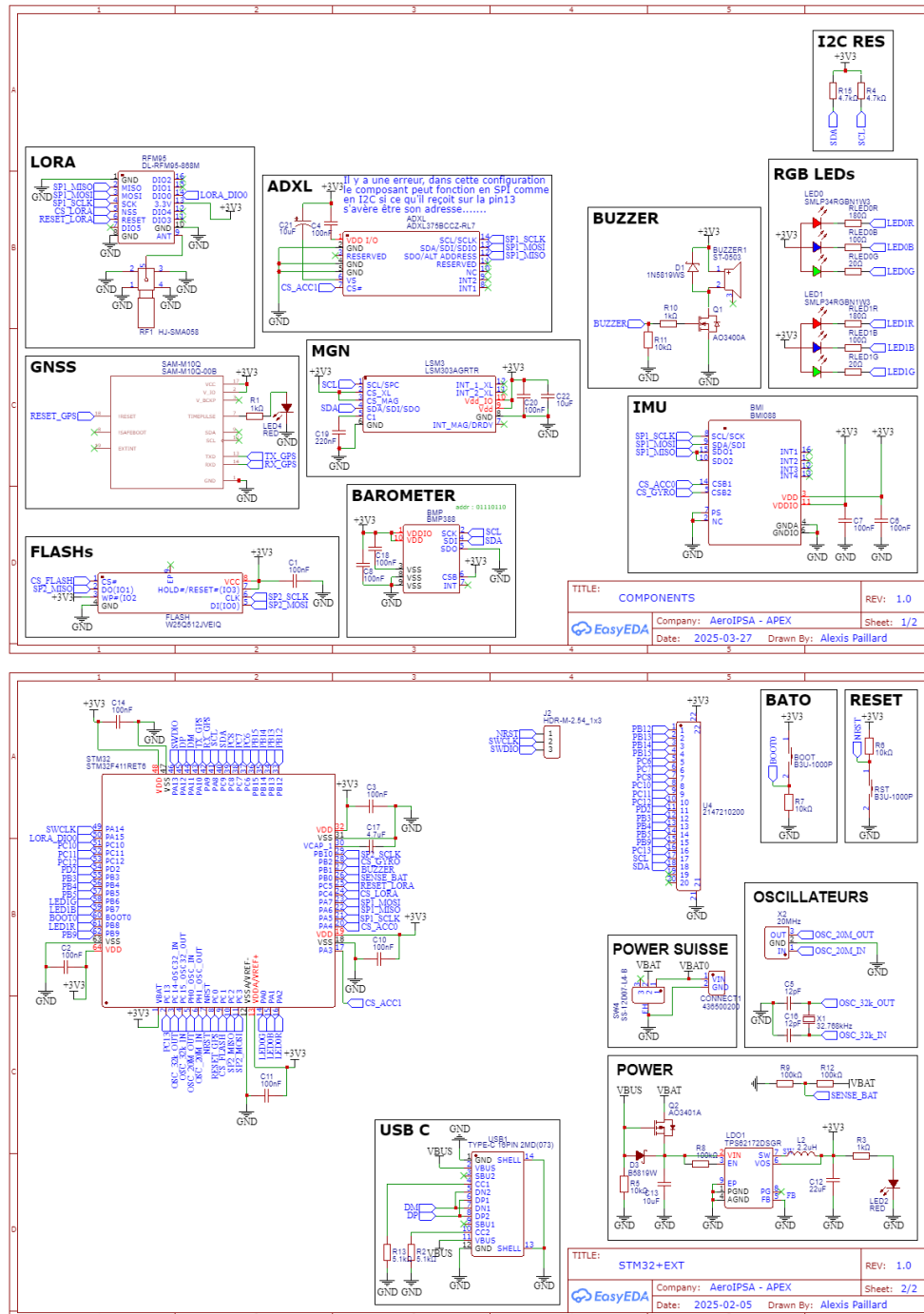


FIGURE 3 – Schéma du module APEX

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.

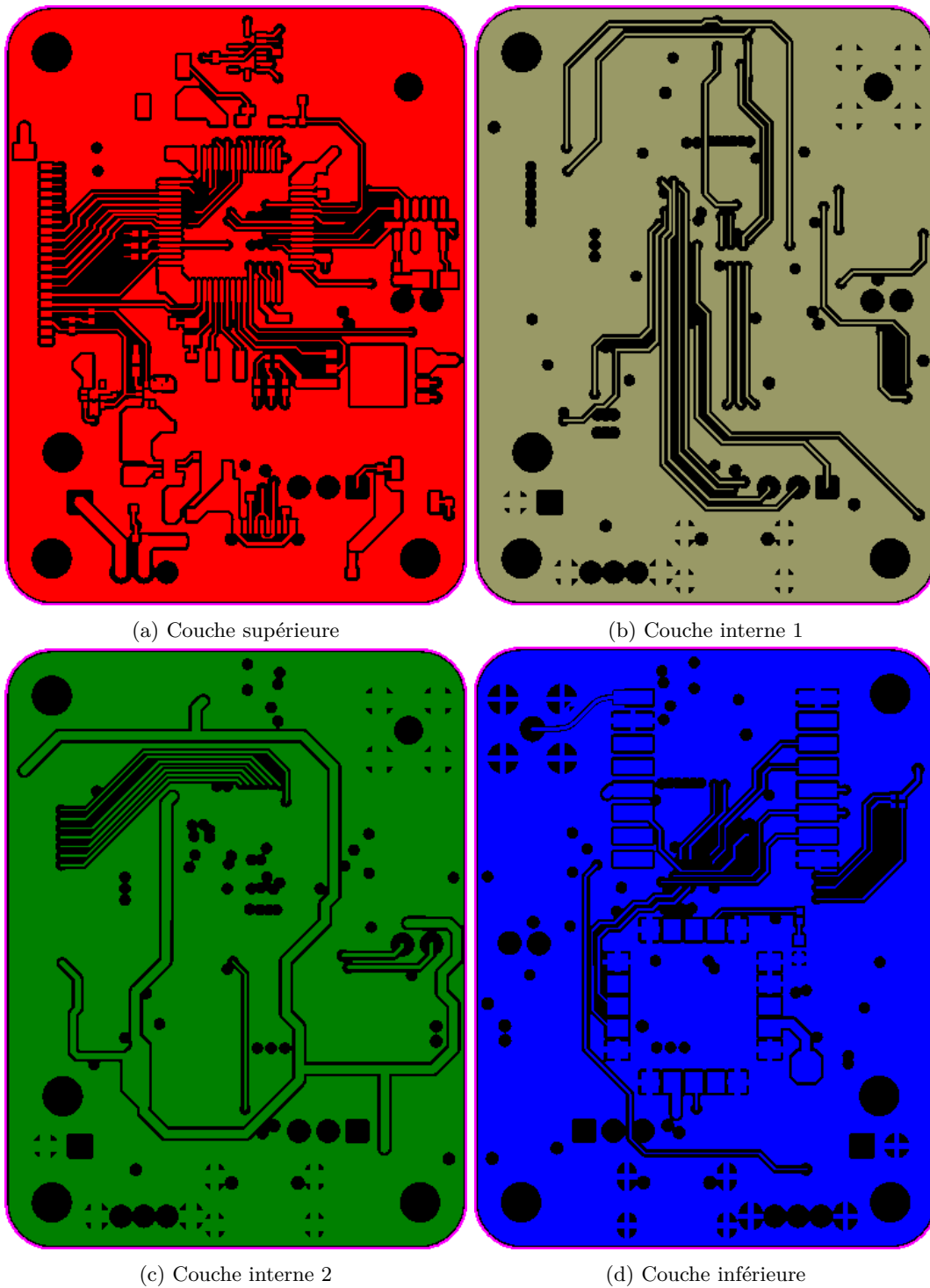


FIGURE 4 – Routage du module APEX



## 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 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 (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 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 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 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 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.

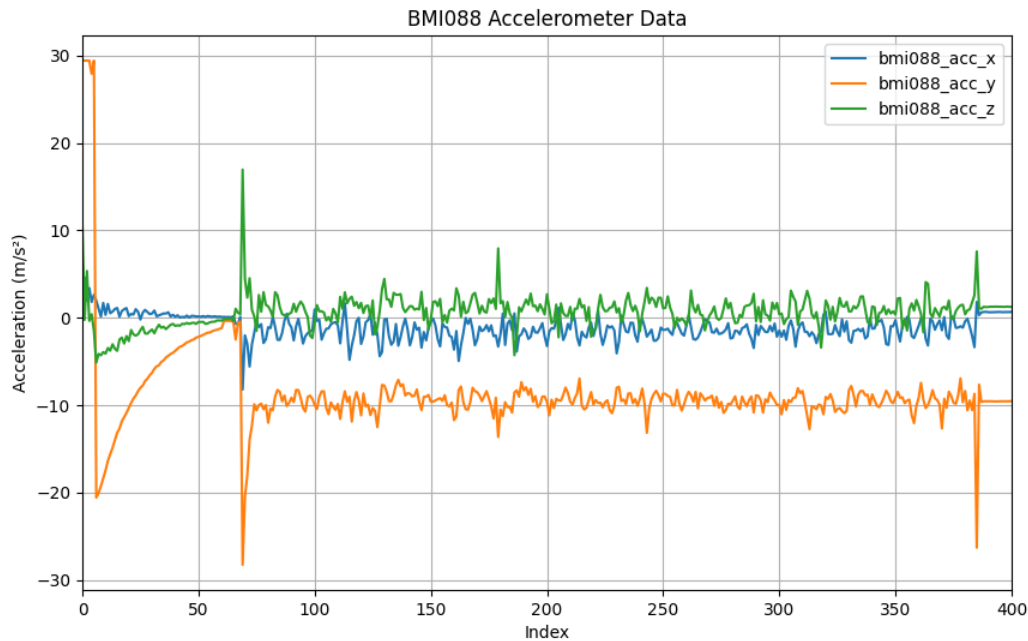
---

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

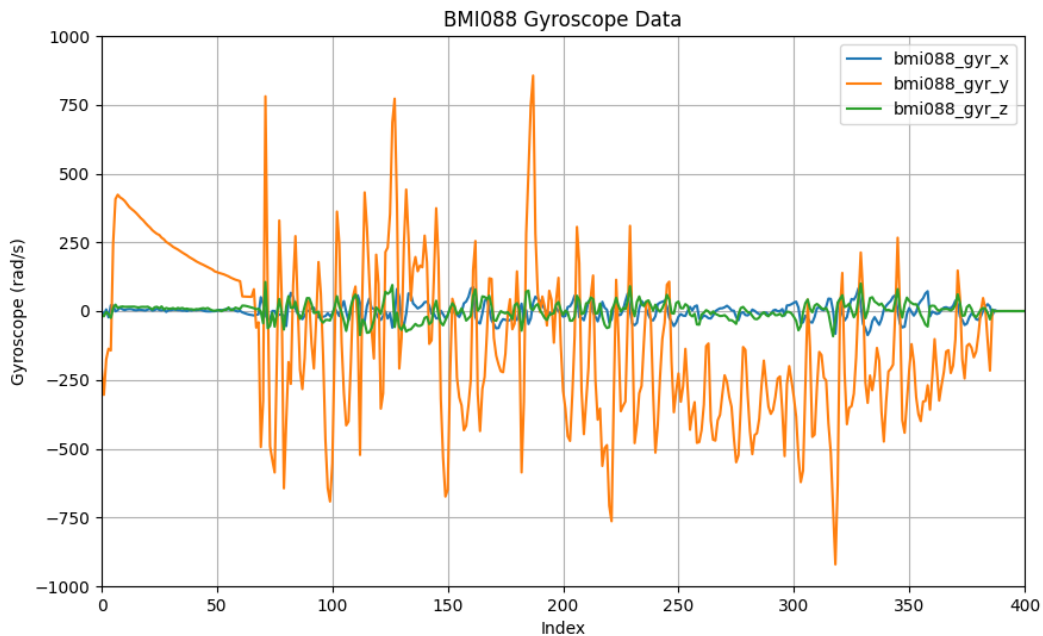
9. Fusée amateur possédant le moteur Pro24 ou équivalent.

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 télémessure. 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.