

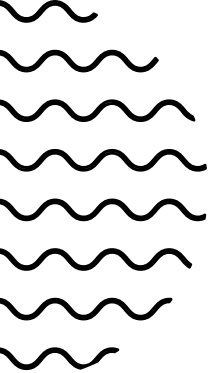


PROJET ESMÉE

CLUB EMA'BOT



RÉALISATION DE LA PREMIÈRE MINI FUSÉE EXPÉRIMENTALE DE L'ÉCOLE DES MINES
D'ALÈS POUR LE C'SPACE 2025



Avant propos



Le rôle de Planètes Sciences :

Ce rapport a été créé avec un double objectif. D'une part, ce document réuni toutes les informations nécessaires à Planète Sciences et au CNES pour qualifier le projet MF87 Esmée ainsi que les résultats à la suite de la campagne de lancement. D'autre part, ce document présente des conseils issus du retour d'expérience du projet qui seront utiles pour les futurs projets du club Ema'Bot. En effet, la transmission des connaissances est une des priorités de cette association. C'est pourquoi ce fichier rassemble l'ensemble des conseils / ordres de grandeur que nous aurions aimé avoir au début de notre projet.

Remerciement:

Je tiens à adresser des remerciements sincères auprès des bénévoles de Planète Sciences (mention spéciale à la debug team) et au CNES pour leur accompagnement. Merci aussi aux équipes LéoFly et Club aérospatial ICAM pour leur soutien sur place. Merci à toutes les personnes de IMT Mines Alès qui m'ont aidé ou soutenu dans ce projet, à la plateforme mécatronique de l'école, et plus particulièrement à loïc imbert pour l'usinage du tube en carbone conforme à mon plan. Et Merci à Evann Kurzawa, Aldric Parent, Ethan Anoufa et Maximilian Zurkaulen pour leurs conseils qui m'ont grandement aider.

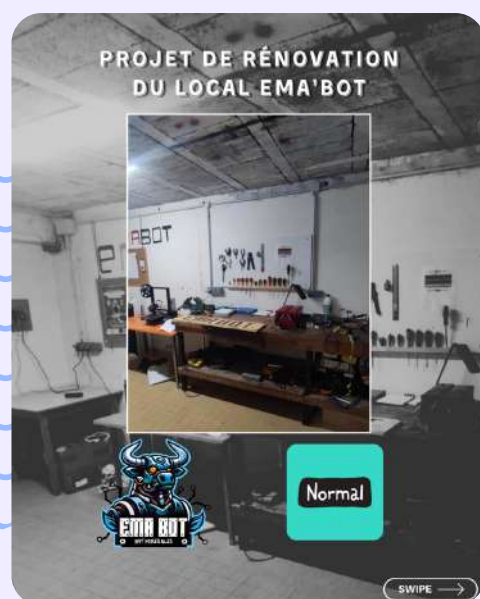




Présentation du Club Ema'Bot



Ema'Bot est l'association de robotique de l'IMT Mines Alès, gérée par un bureau composé de 7 élèves de deuxième année de cycle d'ingénieur dont Le président est Marvin Radji. Notre activité principale est la robotique, avec un focus sur la création de robots sumo. Pour relancer le club et ouvrir de nouvelles perspectives aux étudiants, nous avons décidé de nous étendre à d'autres projets en lien avec la mécanique. Ce projet incarne notre ambition de fusionner robotique et astronomie, offrant une plateforme unique pour l'innovation et la collaboration interdisciplinaire. Pour cette année 2025, voici nos 3 projets phares : Tournoi National de Robotique 2025 organisés par l'IUT de Nîmes; Projet Esmée (mini-Fusée pour le C'Space 2025); Rénovation du Local du Club.





Ma passion pour la robotique et l'aérospatiale a été un moteur clé de mes aspirations professionnelles. Je considère la robotique comme une partie essentielle de l'ingénierie aérospatiale moderne, jouant un rôle crucial dans des tâches telles que l'assemblage et l'exploration d'engins spatiaux. Le domaine de la mécatronique permet cette intersection de domaines qui me permet une polyvalence de mes compétences.

L'IMT Mines Alès est une école d'ingénieurs publique fondée en 1843, membre de l'Institut Mines-Télécom. Elle forme des ingénieurs généralistes et spécialisés en mécatronique, matériaux, génie civil, environnement et intelligence numérique. L'école se distingue par son approche pédagogique orienté projet et son lien fort avec l'industrie.



L'association Planète Sciences est une association d'éducation populaire créée en 1962, d'abord sous le nom de ANCS (Association Nationale des Clubs Scientifiques). Son objectif est de développer la pratique des sciences et des techniques par les jeunes à travers la démarche expérimentale et la gestion de projet. L'association pilote un réseau national qui regroupe plusieurs activités tels que des séjours de vacances, des ateliers en classe, des événements grand public, des concours de robotique, des projets de clubs espace ainsi que des projets développés en laboratoire.



Le Centre National d'Études Spatiales est une agence spatiale française créée en 1961. Le centre s'occupe de concevoir et de mener la politique spatiale de la France, en collaboration avec d'autres agences et partenaires internationaux avec des projets dans divers domaines comme les satellites de télécommunications, l'observation de la Terre, l'exploration planétaire et la recherche scientifique.



Je poursuis mon apprentissage avec l'entreprise Dactem International, une entreprise spécialisée depuis plus de 30 ans dans la conception de moyens de contrôle, de test et de mesure dans les différents secteurs de l'industrie. Je fais partie du bureau d'études électroniques, qui s'occupe principalement de la conception et de la fabrication de cartes électroniques, de baies, de bancs de tests et de racks, ainsi que du développement d'équipements de test pour la propulsion électrique des satellites.

ENERGETIS est une entreprise spécialisée dans la transition énergétique, l'efficacité énergétique des bâtiments et l'optimisation des consommations. Elle accompagne les collectivités, les industriels et les entreprises tertiaires dans la réduction de leur empreinte carbone en proposant des solutions sur mesure : audits, gestion énergétique, suivi des performances, etc. Grâce à une expertise technique reconnue, ENERGETIS allie innovation technologique et ingénierie environnementale pour répondre aux enjeux climatiques actuels.





Le projet Esmée



Je me suis fixé comme objectif de concevoir la première fusée amatrice de l'IMT Mines Alès, nommée Esmée.. Ce nom de projet, Esmée, a une symbolique très forte pour moi car c'est le prénom de ma fille. Initialement prévu pour le C'space 2024, le lancement de Esmée à été repousser d'un an car la semaine de lancement était pendant mon échange universitaire. C'est finalement au C'Space 2025 que cette fusée fera son vol. D'autre part, ce vol sera l'occasion de mettre en œuvre une expérience scientifique permettant de donner un sens et un objectif concret à ce lancement.

Ce projet a représenté un véritable défi personnel, car c'est mon premier projet personnel mécatronique et contrairement aux autres équipes généralement composées de quatre étudiants, j'ai dû en assumer l'intégralité seul, de la conception à la réalisation, en passant par les tests, la programmation et la coordination logistique.

Présentation du C'Space



L'astromodélisme en France

En France, c'est l'association Planète Sciences qui organise, conjointement avec le CNES, le déroulement des campagnes de lancement (C'Space) pour ces projets d'astromodélisme. Depuis sa création en 1962, Planète Sciences fixe les règles régissant la mise en œuvre de ces projets sur le territoire national, afin de garantir le respect des lois et de la sécurité par tous. Pour ces raisons, Planète Sciences rédige un cahier des charges que tous les participants se doivent de suivre s'ils souhaitent participer à la campagne appelé C'Space. Celui-ci permet de garantir la sécurité des personnes sur site, de même qu'il permettra aux équipes d'orienter la conception de leur projet.



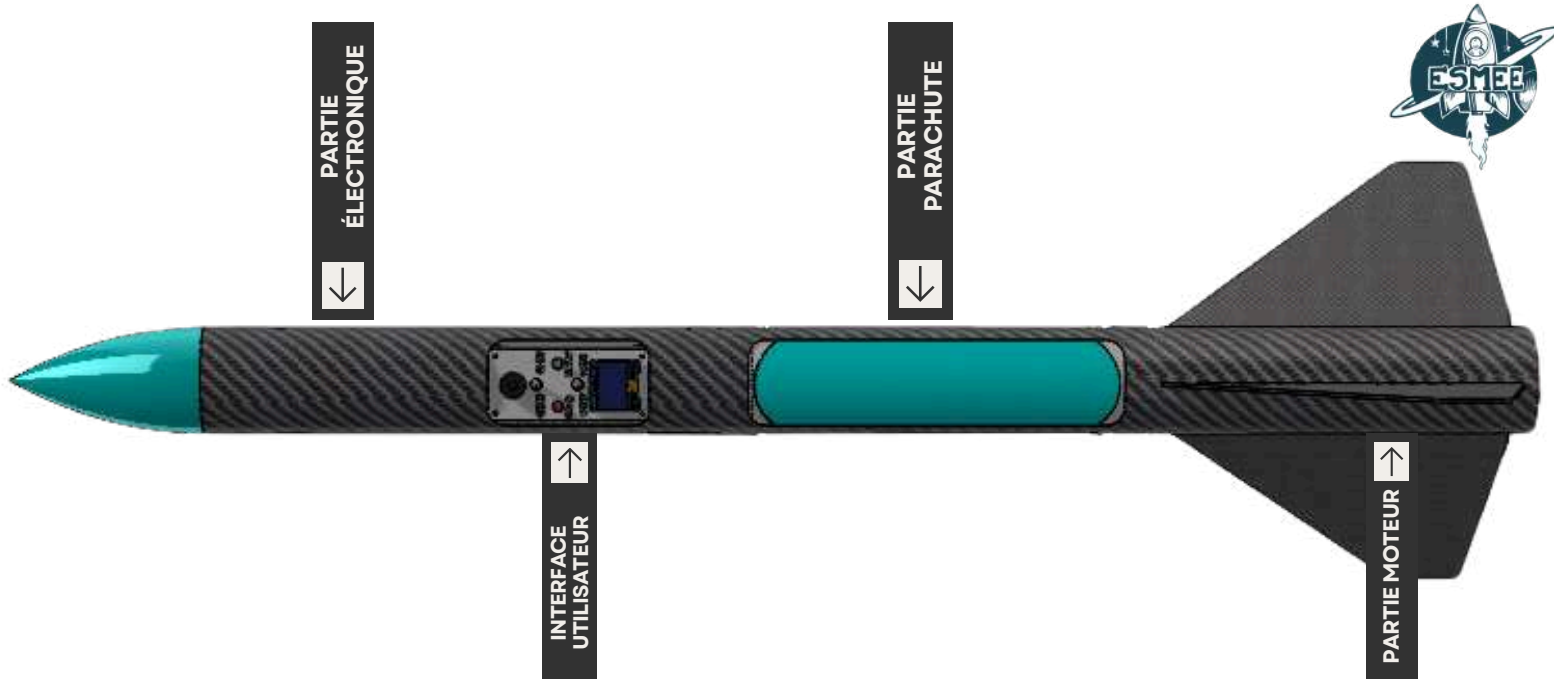
Une « minif » est une catégorie de mini fusée avec possibilité d'embarquer ou non une expérience scientifique de masse faible d'environ de 1 à 2 kg pouvant atteindre des altitudes supérieures à 100 m, le maximum atteignable par cette catégorie est 300m d'altitude pour 300m de portée balistique.



Le rôle de Planètes Sciences :

Pour notre projet, Planète Sciences nous fournit le cahier des charges à respecter. Un bénévole référent de Planète Sciences nous est attribué pour solliciter de l'aide ou poser des questions. 3 réunions Club-Espace sont mises en place durant l'année pour rencontrer l'équipe de suivi et leur présenter l'avancement de notre projet. Une plateforme est mise en place pour accéder à diverses ressources, comme le cahier des charges, le compte-rendu des projets des autres clubs des années précédentes, etc. Enfin, Planète Sciences a développé un outil de calcul pour la stabilité de la fusée, qui sert de support pour contrôler toutes les fusées voulant participer au C'Space.





Dimensionnement de la mini-fusée

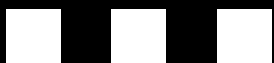


La fusée Esmée a pour but d'être un projet de référence technique dédié à l'étude caractéristique d'un vol mini-fusée classique. Sa trajectoire sera standard et ne possèdera pas de caractéristique spécifique (non supersonique, pas de contrôle de roulis ...). j'ai dimensionné cet minif à partir de ces critères. Ainsi, j'ai dimensionné une fusée mesurant 89mm de hauteur, un diamètre de 60 mm (56 mm int) pour une masse totale de 1424g (sans masse moteur). Ma fusée est équipée de 3 ailerons profilés en forme libre, elle est mono-étage. Pour correspondre aux attentes du vol, le moteur que j'utiliserai le propulseur Pandora (Pro 24 6G BS) de la société CTI qui est fourni lors du C'Space par le CNES et Planète Sciences.

Sa conception allie légèreté et robustesse afin d'atteindre un apogée de 300 m, ce qui permet d'exploiter pleinement la hauteur autorisée pour une mini-fusée. Cette altitude prolongera également la durée de vol, offrant ainsi davantage de temps pour collecter des données.

Dans cette configuration, compte tenu de ces paramètres, nous estimons atteindre un apogée de 300m, une portée balistique de 299m avec une vitesse max de 223 m/s et une accélération maximum de 110 m/s^2

Concernant la disposition mécanique, notre fusée repose sur une structure interne. Elle se compose de trois parties distinctes, un bloc moteur, la partie système de descente, et un rack électronique comprenant le séquenceur et la charge utile.. Vue CAO de l'assemblage total sans peau Les principaux matériaux qui composent la fusée sont facilement usinables. Nous utilisons de nombreuses pièces réalisées en ABS ou en PLA provenant d'impression 3D (additive manufacturing). Pour les pièces en métal, nous favorisons l'aluminium pour sa légèreté et sa facilité d'usinage à partir d'une CNC (computer numerical control) et d'un tour à métaux. La structure repose sur 4 tiges filetées en acier parcourant la fusée

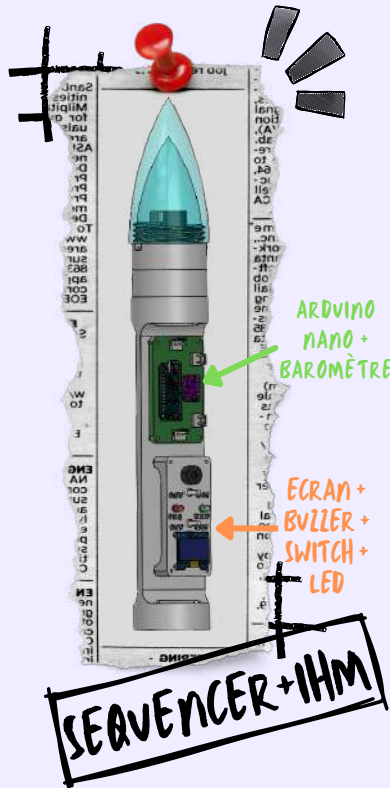
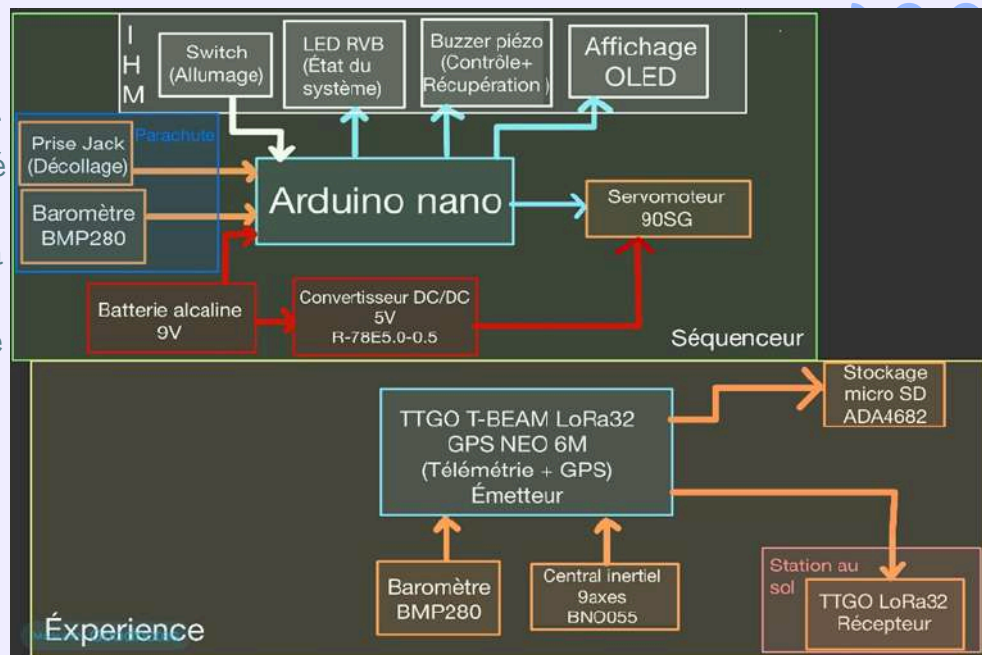


Architecture électronique embarquée



la partie électronique est divisée en deux sections principales. La partie séquenceur qui constitue le système embarqué chargé d'assurer le déclenchement autonome et sécurisé de l'ouverture du parachute et La partie expérience qui est consacrée à l'acquisition, au traitement et au stockage des données provenant des capteurs.

les 2 cartes ont leurs propres alimentations



La partie séquenceur pilote toutes les phases du vol de la fusée en respectant les normes de sécurité de Planète Sciences. Son rôle est d'analyser les paramètres de vol, traiter les données capteurs et déclencher les actionneurs au bon moment.

Description et fonctionnement des composants

Le microcontrôleur Arduino Nano constitue le cœur du système et exécute le programme de gestion. Il chronomètre les événements dès le décollage et détecte l'apogée via le capteur BMP280. Le déclenchement du parachute est sécurisé par une fenêtre temporelle autour de l'apogée.

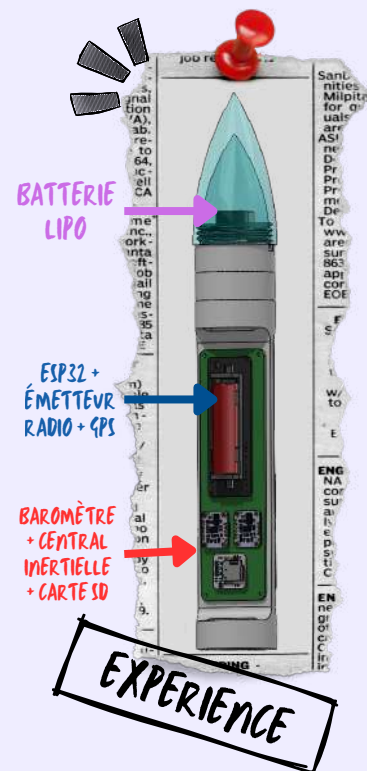
Le BMP280, connecté en SPI, mesure la pression atmosphérique et identifie le point le plus haut du vol. Le servomoteur TowerPro SG90, piloté en PWM, ouvre la trappe du parachute de manière précise et fiable.

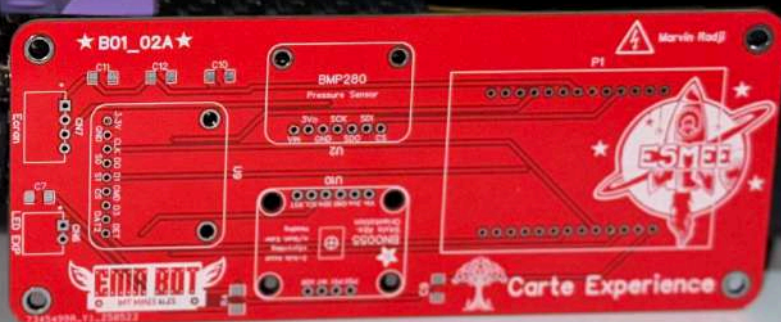
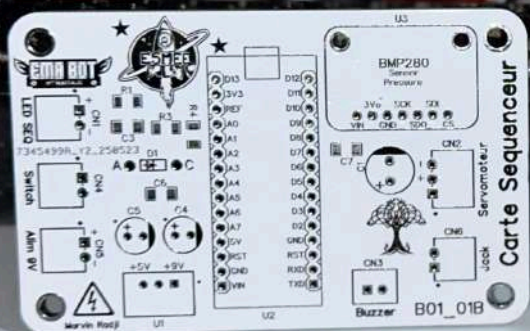
Un buzzer piézoélectrique fournit des signaux sonores pour indiquer l'activation du système et le décollage. L'alimentation est assurée par une pile 9V et un régulateur R-78E5.0-0.5 fournissant du 5V stable au circuit.

La partie expérience du projet Esmée est conçue pour recueillir, transmettre et stocker les données de vol afin de mieux comprendre la trajectoire et les paramètres dynamiques de la fusée. Elle repose sur plusieurs composants essentiels, chacun jouant un rôle bien défini.

Pour pouvoir récupérer l'ensemble des informations transmises par la fusée lors du vol, nous utiliserons la station sol conçu par le club. Ainsi la liaison radio se décompose en deux éléments : Une partie émission (GPS + Lora + microcontrôleur + IHM + central inertiel 9 axes + capteur barométrique) et une partie réception (Lora + microcontrôleur + IHM + Carte SD) Le module se décompose simplement en deux éléments, l'antenne avec une puce de Semtech SX1276 pour protocole Lora et un microcontrôleur du type ESP en temps réel. Directement relié à un ordinateur, ayant un gain de 11Db, et une bande de fréquences variant de 830 à 890 mHz, parfait pour nos applications actuelles et futures.

Partie émettrice : Pour le suivi de notre expérience, nous réutilisons l'émetteur TTGO-T-BEAMV1.1, autonome, fabriquée par la compagnie chinoise Lilygo dédiée au protocole de télécommunication Lora et au positionnement par GNSS

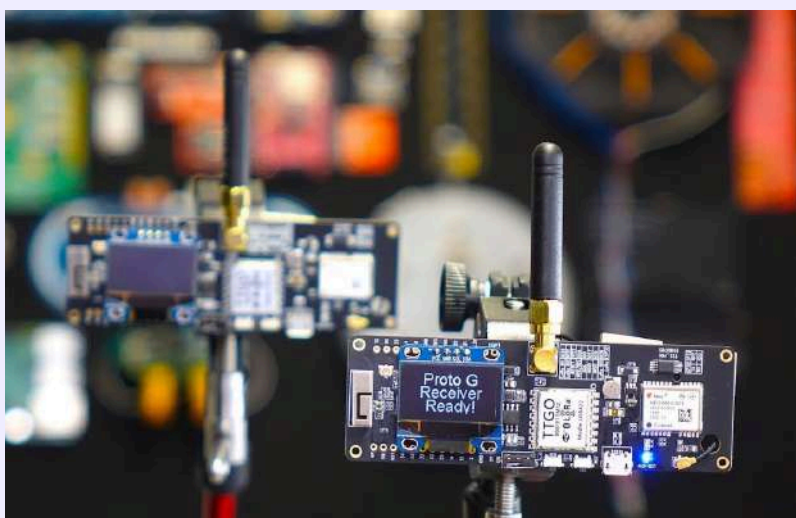
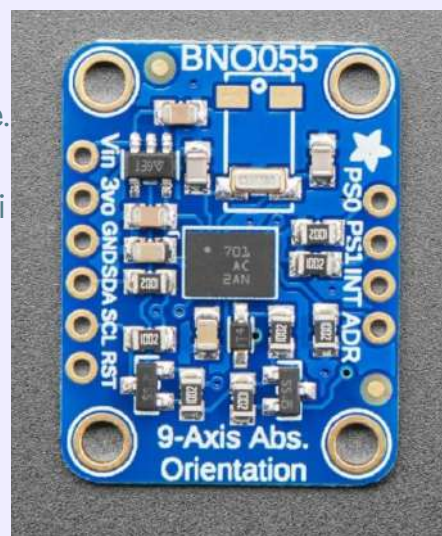




Composants et Fonctionnalités:

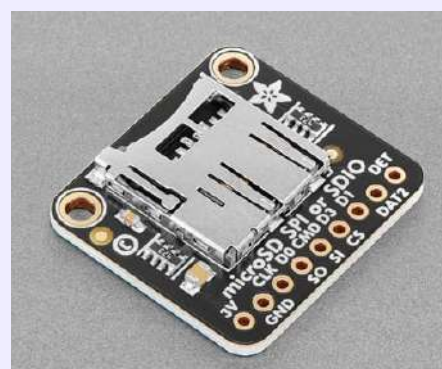
Central inertiel:

Le BNO055 permet une compréhension fine de la trajectoire et du comportement dynamique de la fusée grâce à son microcontrôleur ARM Cortex-M0 intégré qui fusionne accéléromètre, gyroscope et magnétomètre. Contrairement aux IMU classiques, il délivre des informations exploitables (angles d'Euler, quaternions, vecteurs) sans nécessiter de filtre externe, ce qui simplifie l'intégration dans un système embarqué. Utilisé en mode NDOF via l'I²C, il assure le suivi de la stabilité en 3D, la détection de mouvements anormaux et enregistre l'attitude de vol. Une calibration complète est imposée avant décollage, avec affichage des états sur l'écran OLED et blocage logiciel tant que les capteurs ne sont pas prêts. Les mesures sont stockées sur carte microSD et transmises en temps réel par LoRa pour une visualisation 3D post-vol. Le BNO055 permet une compréhension fine de la trajectoire et du comportement dynamique de la fusée

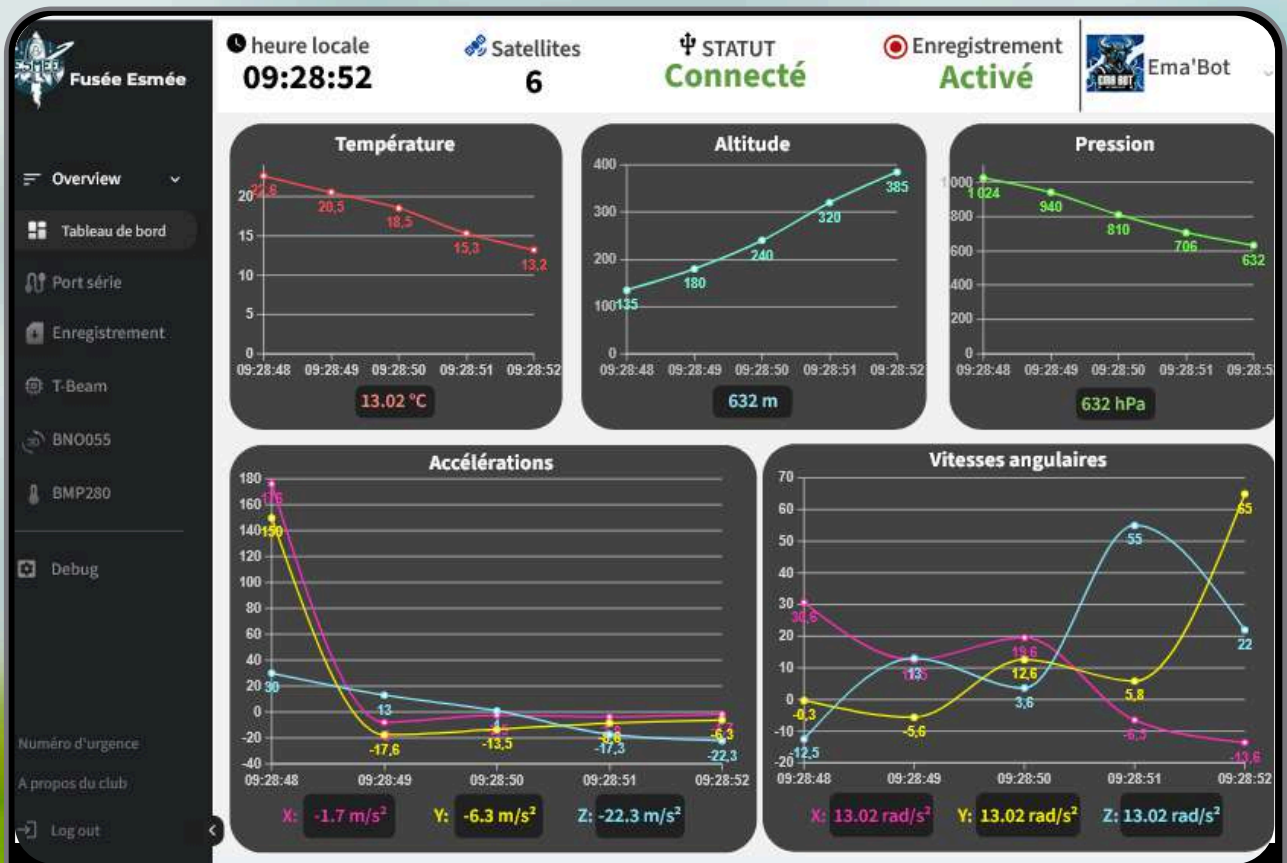


L'émetteur utilisé est le TTGO T-Beam V1.2 Meshtastic, intégrant un module LoRa SX1276 (868 MHz), un GPS Neo-6M et un ESP32 avec WiFi/Bluetooth. Placé dans la fusée, il transmet en temps réel les données de vol grâce à une antenne longue intégrée dans la coiffe en PETG, offrant une portée d'environ 1,2 km. La réception est assurée par une LILYGO® LoRa32 V2.1, qui capte les informations envoyées et les met immédiatement à disposition de l'équipe au sol pour suivi et analyse du vol.

Le stockage embarqué du projet Esmée repose sur le module microSD Adafruit ADA4682, fonctionnant en logique 3,3 V et relié en SPI à l'ESP32 T-Beam. Une microSD de classe 10 est utilisée, permettant l'enregistrement fiable de trames capteurs (BNO055, BMP280, GPS) entre 10 et 50 Hz, soit 10–15 ko/s en JSON ou CSV. Le système de fichiers FAT32 est géré via SdFat.h, créant automatiquement un fichier unique à chaque vol et écrivant les données en temps réel. Pour renforcer la fiabilité, les tampons sont régulièrement vidés (flush) afin d'éviter toute perte en cas de coupure d'alimentation, et un mécanisme de détection d'erreur assure une tentative de reconnexion.



MOCKUPS DU SITE



Une interface web centrée sur la diffusion des données entre la fusée et la station au sol en temps réel a été développée pour afficher une visualisation du comportement de la fusée pendant ses phases de vol, incluant son accélération, sa vitesse et son orientation afin de faire l'étude des données issues du capteur barométrique et de la centrale inertielle pour comprendre comment la pression atmosphérique affecte le mouvement de la fusée.

Déroulement du vol

Le 10 juillet 2025 à 17h04, sur le camp militaire du 1er RHP à Ger (64), j'effectue le tir d'Esmée dans des conditions météo idéales : ciel CAVOK (excellente visibilité), vent 020° 7 kt (variable 340-060°), 30 °C, point de rosée 14 °C, QNH 1016 hPa. La tension est maximale : juste avant, la fusée DIAMANT a fini en incendie, il faut donc un lancement irréprochable. Après armement qui à durer 15 min 07 s avant 17 h 04. S'ensuit une poussée d'environ 6 s où l'accélération monte à ~3,3 g (IMU) avec un léger roulis, mais une trajectoire globalement rectiligne. La poussée s'éteint, puis la montée inertielle se poursuit 1,5 s jusqu'à l'apogée, vers 7,6s à 300m au dessus du sol. Peu après le sommet, le parachute s'ouvre et la vitesse verticale passe d'environ 48m/s à 15 m/s, preuve d'un déploiement efficace malgré un léger roulis/lacet sous voile. La descente reste ensuite stabilisée et la fusée se pose 34 s après le décollage, avec une faible portée horizontale. Dans l'ensemble, les trois capteurs (baro, IMU, GPS) racontent la même histoire : montée propre, apogée nette, parachute qui freine correctement, et atterrissage sans surcharge excessive.

Analyse du vol



Apogée:

L'apogée mesurée, estimée à 277 m contre 300 m en théorie, présente un écart de -7 à -10 % : l'altitude maximale atteinte est donc légèrement inférieure aux prévisions, mais reste globalement cohérente avec la simulation.

Vitesse verticale et efficacité du parachute:

Après le déploiement, la vitesse verticale passe d'une chute libre transitoire de -40 à -50 m/s à une descente stabilisée de -10 à -15 m/s. Cette valeur se situe dans la plage visée (-7 à -12 m/s), mais légèrement du côté haut. Le parachute fonctionne correctement, mais un ajustement du diamètre ou un choix de tissu à Cd plus élevé pourrait adoucir davantage l'atterrissage.

Temps vers l'apogée:

Le temps vers l'apogée, mesuré à environ 7 à 8 s contre 7,9 s en théorie, présente un écart négligeable : la dynamique ascendante est donc conforme aux prévisions, avec une phase de boost et une inertie fidèlement reproduites.

Accélérations maximales pendant la poussée:

Les accélérations maximales mesurées, avec un pic d'environ 2,5 à 3,3 g contre ≈ 20 g attendus, sont fortement inférieures aux prévisions. Cet écart marqué s'explique principalement par une erreur de configuration du capteur, qui n'a pas été réglé sur une plage de ± 16 g, mais également par le fait que le BNO055 reste sous-dimensionné pour mesurer des accélérations aussi élevées.

