



ERMES
Rapport de projet
-
Ipsa Space Systems



Remerciements

Merci tout d'abord à Planète Sciences, au CNES et à tous les bénévoles pour l'organisation de ce C'Space, pour leur grande disponibilité et leurs conseils tout au long de l'évènement.

Merci également à l'IPSA pour sa confiance, qui nous permet de profiter de cette activité associative qui nous est précieuse.

Enfin, merci à Cyril Tilhou-Triep qui a eu la gentillesse de nous prêter du matériel ayant permis à l'équipe de qualifier la fusée et d'effectuer ce vol nominal avec un aperçu embarqué qui n'étaient pas garantis.

Table des matières

Remerciements.....	2
I. Introduction	2
II. Stabilité et plan de vol	3
III. Sous-systèmes mécaniques	4
A. Etage propulsif.....	5
B. Etage électronique et coiffe.....	5
C. Système de récupération	6
D. Case électronique	8
IV. Systèmes électroniques.....	9
A. Architecture générale.....	9
B. Séquenceur.....	12
C. Superviseur	12
D. Enregistreur.....	13
E. Support capteurs.....	13
F. Télémétrie	15
1. A bord.....	15
2. Au sol	15
G. Support caméra.....	17
H. Support batteries.....	18
I. Interface externe.....	18
V. Résultats et analyse du vol	19
A. Déroulement du vol	19
B. Analyse du vol.....	21
VI. Conclusion et perspectives	22
Table des illustrations	23

I. Introduction

Ermes est une fusée expérimentale réalisée par l'association étudiante Ipsa Space Systems de l'école d'ingénieur IPSA. Initié au début de l'année scolaire 2024 – 2025 et lancé au C'space 2025. Ce projet est dimensionné pour le supersonique et embarque une expérience qui a pour vocation d'étudier le champ de pression au niveau de la coiffe.

Cette fusée était prévue pour observer les phénomènes existants dans un régime supersonique (compressibilité de l'air, efforts, chocs). L'objectif était d'obtenir un retour complet sur son comportement dans ces conditions extrêmes afin d'améliorer nos procédés de conception et de fabrication sur les futurs projets.

Dans un premier temps ce rapport détaillera l'architecture des ensembles mécaniques et systèmes électroniques embarqués ainsi que leur réalisation. Par la suite, ce document exposera le déroulement du vol avant de finir sur les conclusions et les projections futures de l'équipe et de l'association.



II. Stabilité et plan de vol

Dans le cadre de ce projet, nous nous sommes grandement intéressés à la stabilité de notre fusée à travers les différents régimes de vol rencontrés. Ermes est conçue pour embarquer un Pro75-3G qui lui permet d'atteindre le domaine du supersonique.

La fusée possède une masse très faible de 4.5 kg pour un gabarit d'une longueur de 1.53 mètre et un diamètre de 98 mm. Son centre de gravité se situe à 838 mm de l'extrémité de la coiffe et elle est équipée de trois ailerons fixés en bas du tube. Des extensions ont été ajoutées afin de garantir la stabilité à tout moment.

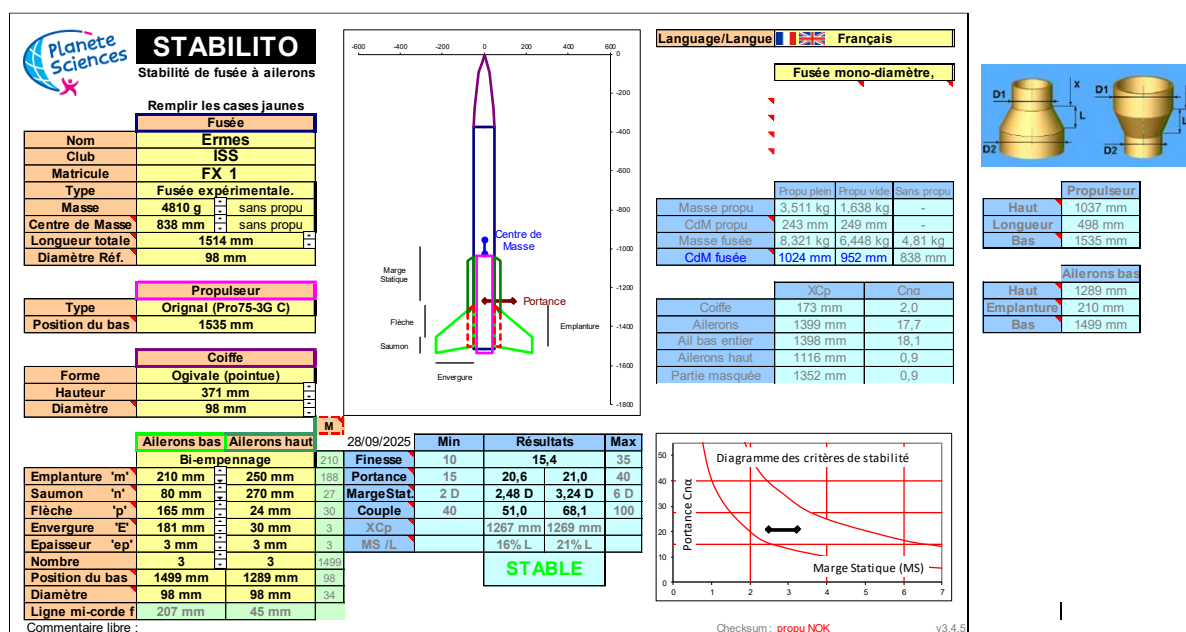


Figure 1 - page Stabilito du Stabtraj Sauvegarde ERMES avec Pro75

Selon les calculs de trajectoire du Stabtraj pour un angle de rampe de 80°, le point d'apogée est situé à une altitude de 2942 m après une ascension d'une durée de 21.7 secondes. La vitesse maximale est estimée à 345 m/s et est atteinte à la fin de phase propulsive. La fusée effectue sa redescente sous parachute à une vitesse de 10.5 m/s pour une durée de 4 minutes et 39 secondes.

A travers une analyse complémentaire dédiée à la stabilité d'ERMES dans le régime supersonique, nous avons étudié la finesse, la portance et la marge statique à travers plusieurs simulations. Ces dernières nous ont permises d'affirmer que Ermes est une fusée expérimentale stable en régime supersonique.

	Min	Résultats MACH1.0 MACH1.15	Max
Finesse	10	15.4	35
Portance	10	14,96 19,79	25
Marge Statique	1.5D	1.78D 1.98D	3D

Figure 2 - Tableau récapitulatif des paramètres d'Ermes

Par ailleurs, notre évaluation a révélé que notre fusée était capable d'atteindre une vitesse de MACH 1.15 tandis que notre évaluation estime cette dernière à MACH 1.05. Dans les deux cas la stabilité est assurée. De plus nous possédons une forte manœuvrabilité de la gestion des masses grâce à une marge statique plutôt faible. Elle nous permet de déplacer le centre de masse de notre fusée, notamment vers la pointe, en toute sécurité. Grâce à sa masse relativement faible, la fusée peut ainsi être manœuvrée même si son poids varie légèrement, tout en conservant une vitesse supersonique.

III. Sous-systèmes mécaniques

ERMES est composée de plusieurs sous-systèmes mécaniques pour l'intégration des fonctions de sauvegarde, d'expérience et de propulsion.

Les ailerons sont usinés en aluminium mais le tube est de fabrication composite : il s'agit d'une structure sandwich en fibre de carbone UD et mousse Epoxy, réalisée selon les procédés de fabrication Perseus au laboratoire de l'IPSA. La coiffe est en fibre de verres et se trouve ainsi neutre en radiofréquence pour permettre l'usage de moyens de télémétrie tels qu'un émetteur LoRa et un récepteur GPS.

Les pièces en aluminium sont usinées par JLC CNC avec qui nous entretenons un partenariat dans le cadre de nos usinages. De nombreuses pièces sont imprimées en 3D, en PETG ou PLA selon les contraintes qui s'y appliquent.

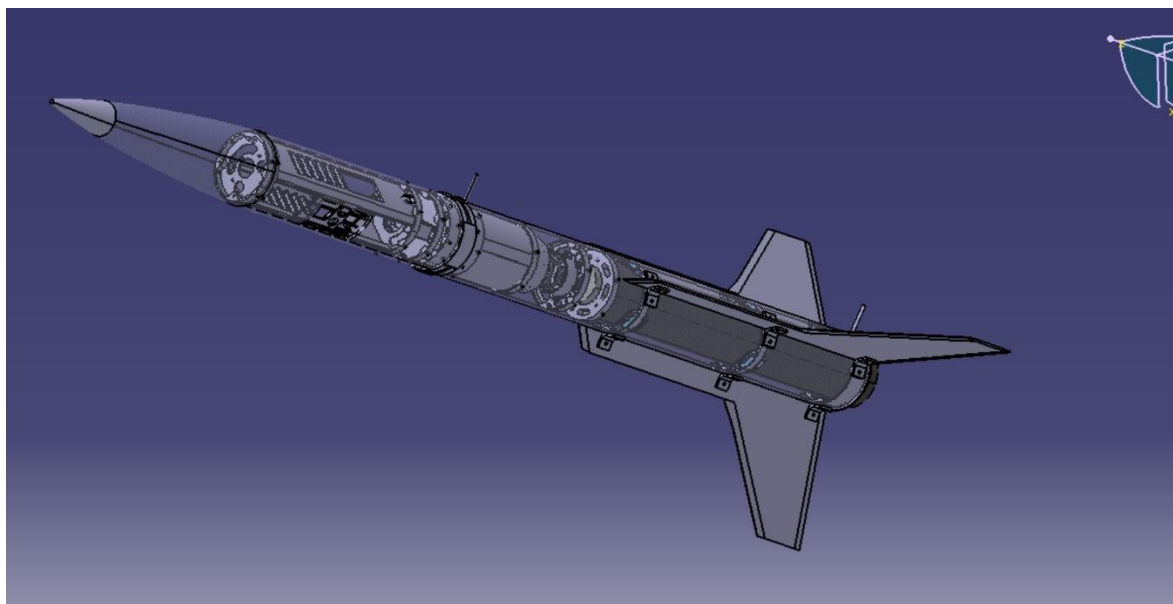


Figure 3 - CAO globale d'Ermes

Le tube est une peau porteuse unie du bas de la fusée jusqu'au système de séparation, où il est prolongé d'un second tube plus court et de la coiffe.

A. Etage propulsif

Pour commencer, l'aspect propulsif de la fusée nécessite une attention pour l'aménagement du propulseur utilisé. Dans ce cadre, le projet prévoyait l'intégration d'un pro75 à l'aide d'un tube de guidage. Une bague de reprise de poussée permet de retenir le propulseur durant la phase de poussée tandis que des loquets placés au bout de tiges filetées sont utilisés pour empêcher le propulseur de s'échapper après insertion et après la phase de poussée.

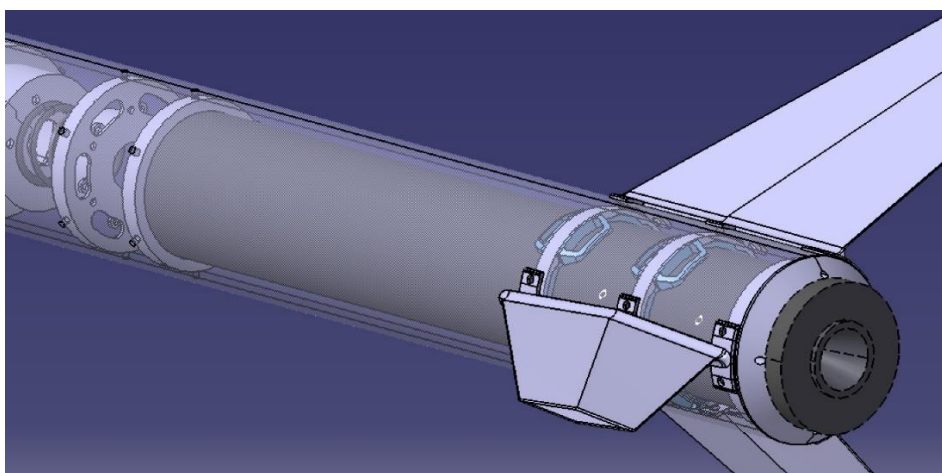


Figure 4 - Aperçu général de l'étage propulsif

B. Etage électronique et coiffe

La fusée a besoin de systèmes électroniques permettant d'assurer la bonne tenue du plan de vol et du fonctionnement de l'expérience. L'ensemble était placé au plus proche de la coiffe. D'une part, la coiffe fabriquée en fibre de verre, était utilisée pour intégrer un tube Pitot et des prises de 1mm pour des capteurs de pression absolues dans le cadre de notre expérience.

A l'intérieur, une bague usinée en aluminium permet la liaison entre le bloc électronique et la coiffe, son design est aménagé pour permettre le passage des câbles utilisés pour les capteurs.

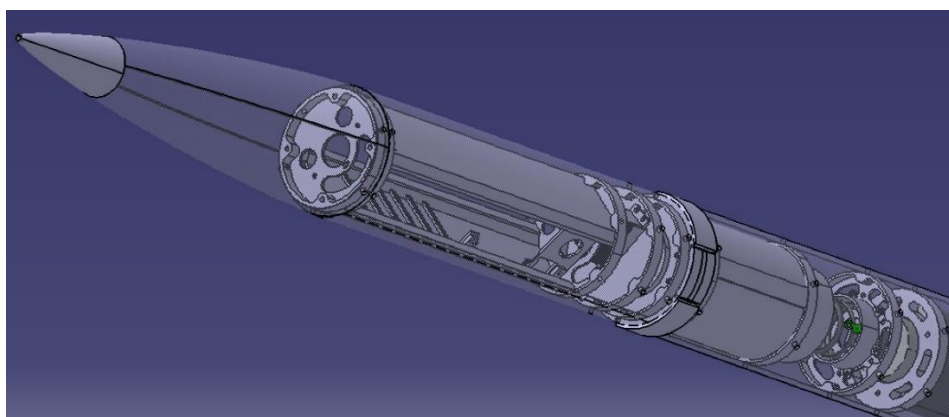


Figure 5 - Aperçu de l'étage électronique et de la coiffe

C. Système de récupération

Nous avons pensé le déploiement de notre parachute de récupération de façon similaire à la séparation du projet SUPER et de la séparation inter-étage de STAR-P. Ce bloc est situé sous l'emplacement de l'électronique. Trois crochets sont utilisés pour bloquer/débloquer la contrainte de liaison des deux tubes. Ces derniers sont déplacés par des tiges de vis, guidées par un disque muni des fentes en spirale.

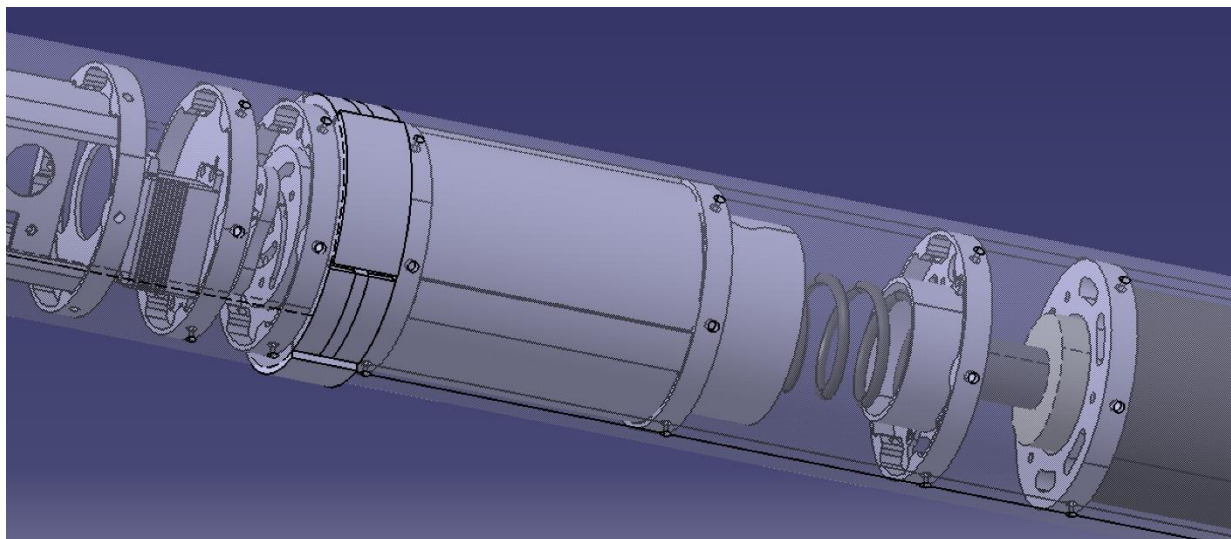


Figure 6 - Aperçu du système de récupération

Le contrôle de ce mécanisme est permis par le servo moteur QY324MG suffisamment puissant pour effectuer le déclenchement de la séparation.



Figure 7 – Vue du dessus du mécanisme du système de séparation (ci-à gauche) Servo QY324MG (ci-à droite)

La case parachute est pressée contre le fond de son emplacement par un ressort fabriqué en carbone. Il sert de guidage vers la sortie de la case parachute lors de son déploiement.

Les deux parties de la fusée effectuent leur redescente sous le même parachute, avec des longueurs de corde suffisantes pour espérer empêcher des chocs entre la coiffe et le reste de la fusée. La partie haute séparée est accrochée à un émerillon sur la voile par une corde fixée sur l'anneau de levage dans la coiffe. Sur ce même émerillon, une seconde corde doublée lie le corps de la fusée au parachute. Cette corde traverse le système de séparation en évitant le loquet et est fixée sur un pontet vissé à la bague haute de la case électronique. Amener le point de fixation plus bas permettrait de ne pas placer le pontet sur le couvercle, où il aurait gêné les suspentes du parachute au-dessus et la rotation du loquet en-dessous qui n'avait que peu d'espace en hauteur.

D. Case électronique

La case électronique doit intégrer 8 cartes dont les fonctions seront détaillées plus tard, 3 batteries, et l'interface permettant l'alimentation. Sept de ces cartes sont toutes intégrées à l'horizontale tandis qu'un PCB placé à la verticale pour assurer les fonctions d'interface requises.

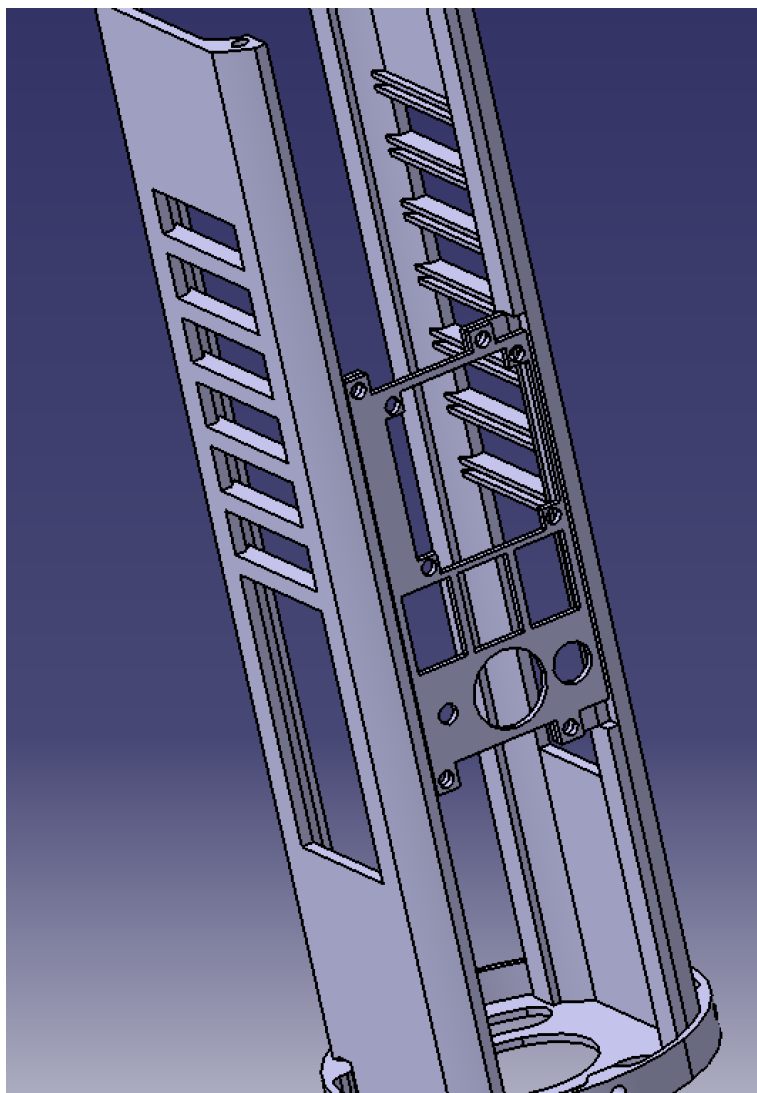


Figure 8 - Aperçu du support de la case électronique

Les deux pièces permettant d'intégrer les cartes sont imprimées en PETG et conçues pour laisser autant de place que possible à l'électronique. Les bagues sont percées en plusieurs endroits pour permettre de connecter le jack, le servo mais également les éléments associés aux capteurs et à la télémétrie (antenne d'émission LoRa, AHRS, tubes d'entrée d'air) au moment de l'intégration.

Les batteries sont intégrées sous les trois cartes sur la bague basse de la case. La place centrale de la case électronique dans la fusée permet de connecter le servo moteur pour la séparation.

IV. Systèmes électroniques

Les systèmes embarqués sur Ermes ont pour objectif de contrôler les opérations au sol et au cours du vol. Pour ce faire, ils doivent remplir les missions suivantes :

- Présenter une interface de contrôle et de communication pour les capteurs et les modules de communication
- Orchestrer le plan de vol à partir de la détection du décollage à l'aide d'un module séquenceur
- Sauvegarder les données de vol à bord et au sol
- Enregistrer une vidéo en vol

A. Architecture générale

Ces tâches à bords sont réparties entre sept modules qui agissent de manière complémentaire et coordonnée pour assurer le bon déroulement du vol :

- Le séquenceur ("Timer module") responsable des opérations en vol (décollage à la récupération)
- Le superviseur ("Main module") qui régule les opérations de bord entre capteurs et télécommunication entre les modules et tient compte de tout ce qui se passe.
- Le transmetteur LoRa ("Telem module"). Les données relevées par le superviseur lui sont transmises et sont à leur tour réémises sous la forme d'onde radio modulée par LoRa.
- La plateforme capteur ("Sensor module") qui est une carte qui sert de support aux appareils de mesures des dynamiques et de l'environnement de vol.
- L'enregistreur ("Recorder module") qui est utilisé pour communiquer avec les capteurs embarqués.
- Le support des batteries ("Power module") qui est équipée de connecteurs XT30 coudés pour connecter des batteries
- Le support des caméras ("Camera module") qui dispose d'un emplacement pour y poser un module tout intégré pour l'interface d'une petite caméra embarquée

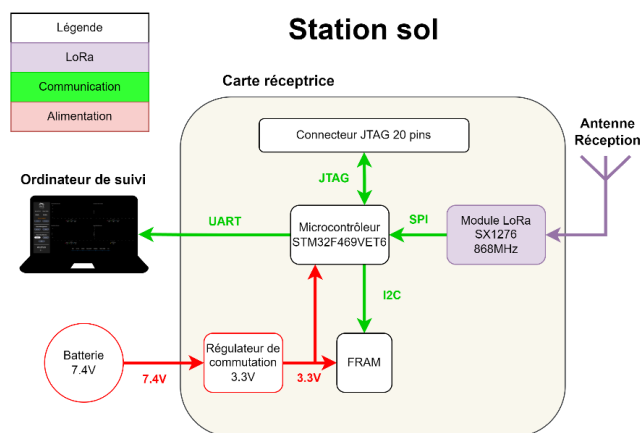


Figure 9 - Architecture électronique globale de l'électronique au sol

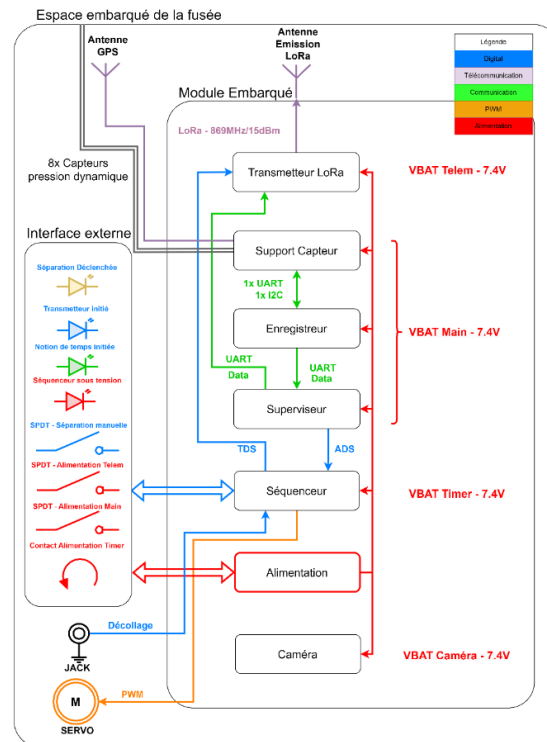


Figure 10 - Architecture générale à bord de la fusée

La station sol dispose de deux blocs pour répondre aux besoins de l'équipe :

- Un PCB contenant le module LoRa récepteur
- Une interface graphique permettant d'afficher les données récoltées en vol

L'intégration des cartes dans la case électronique impose quelques contraintes de conception. Nous sommes partis sur le choix d'une forme d'un cercle de 70mm de diamètre entrecoupé sur 4 côtés pour optimiser l'espace, faciliter le placement de connecteurs et la pose de l'interface externe et le rangement de l'ensemble dans son support.

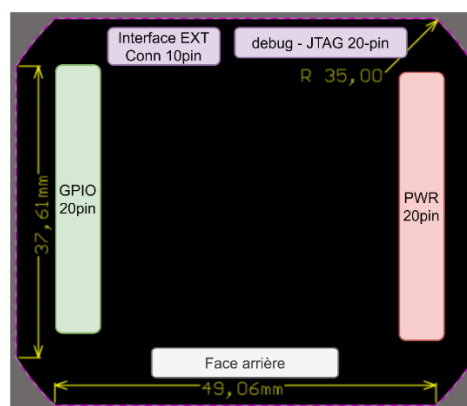


Figure 11 - Dimensions des PCB

Les modules sont empilés entre eux par des connecteurs de deux rangées de 10 broches. L'un d'entre eux permet l'échange des signaux d'alimentation des batteries tandis que le second est utilisé dans le cadre de la communication numérique entre les modules et les capteurs.

Quatre modules possèdent un microcontrôleur STM32F4 pour implémenter la logique de vol et les interfaces de communication. Ces PCB disposent de connecteurs JTAG à 20 broches et soudés directement utilisables depuis l'extérieur avec l'outil de programmation STLINK V2. Chacune dispose d'un convertisseur « buck » pour abaisser la tension nominale des batteries et obtenir une tension continue régulée à 3.3V.

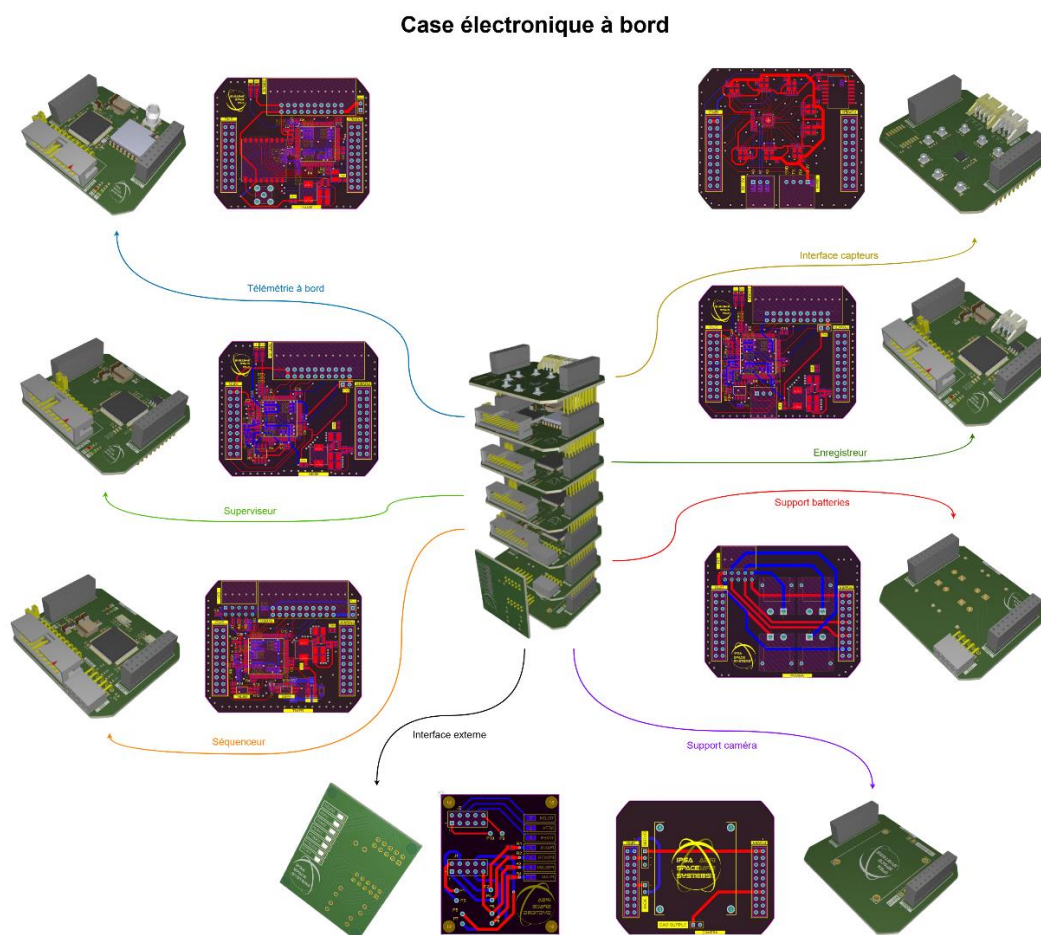


Figure 12 - Représentation générale d'électronique embarquée d'ERMES

Les cartes du séquenceur et du support de l'alimentation disposent d'un connecteur de 10 broches soudées. Ces embases servent à connecter l'interface externe.

Les trois batteries sont chacune composées de deux cellules Li-Ion de référence LG INR18650-MJ1 et soudées ensembles à la main. Un pack d'alimentation possède une tension nominale de 7.4V et d'une capacité typique de 3500mAh. Chacun est muni d'un BMS connecté pour assurer la protection de la batterie. L'une des batteries s'occupe de la mise en marche du séquenceur. Une deuxième est utilisée pour le fonctionnement du module de télémetrie. Enfin, une batterie alimente les éléments non-cités restants (cartes superviseur, interface capteurs, support caméra).

Figure 13 - Représentation 3D de la carte Séquenceur

Figure 14 - Représentation 3D de la carte Superviseur

Figure 15 – Support FRAM FM25V05-GTR

D. Enregistreur

L'interface des capteurs est chargée de communiquer avec tous les composants permettant d'obtenir les données de vol de la fusée qui sont relatives à sa trajectoire et son environnement. Il stocke les données de vol sur un support FRAM.

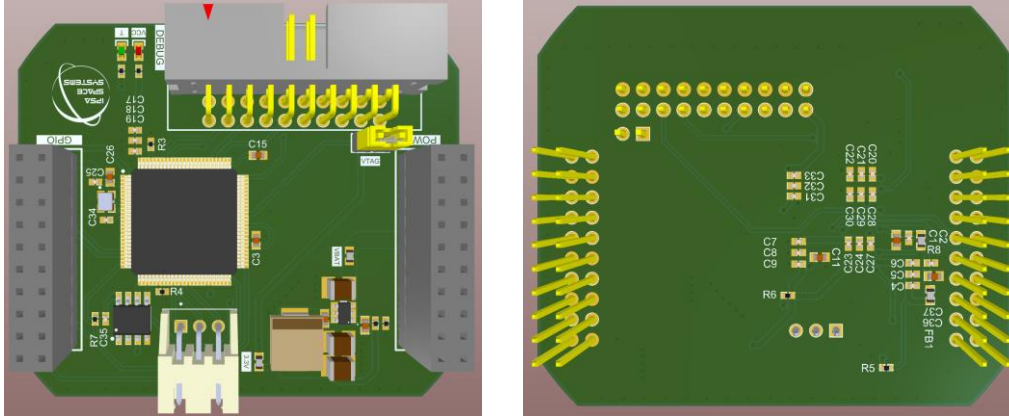


Figure 16 - Représentation 3D de la carte Enregistreur

E. Support capteurs

Le support capteurs est un PCB qui présente l'ensemble des modules utilisés pour les données de vol. D'une part, un AHRS de référence WTGAHRS1 permet de suivre le mouvement et l'attitude de la fusée. De l'autre 8 capteurs de pression de référence MS583702BA01-50 sont utilisés dans le cadre de l'expérience.

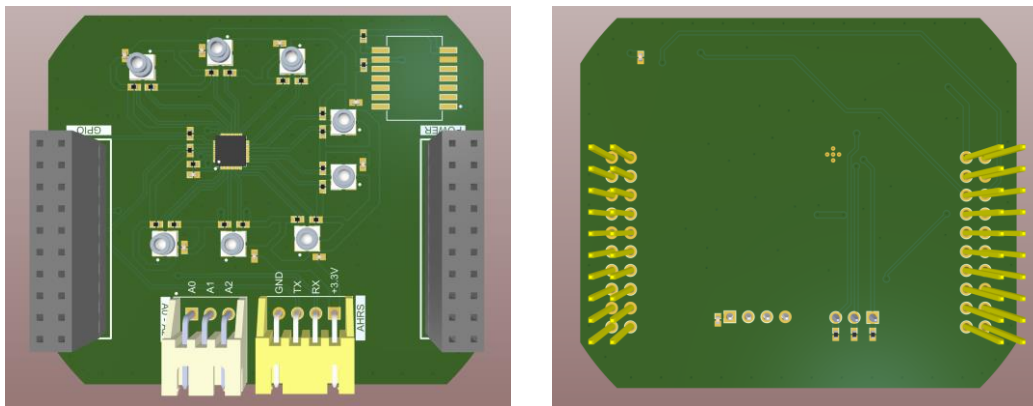


Figure 17 - Représentation 3D de la carte Interface Capteurs

L'AHRS choisi par l'équipe est équipé de plusieurs fonctions :

- Accéléromètre 3 axes d'une résolution de 0.01g/LSB
- Gyroscope 3 axes d'une résolution de 0.05°/s
- Inclinomètre 3 axes d'une précision de 0.2°
- Magnétomètre 3 axes
- GPS d'une précision de 2.5m de position



Figure 18 - module WTAHRS1 de Wit Motion

Les capteurs de pression quant à eux bénéficient d'une précision de 0.5 mbar et sont prévus pour mesurer jusqu'à 2 bars. Ils sont à l'épreuve de niveaux pouvant aller jusqu'à 10 bars. Un ADC de 24-bit est intégré pour fournir la donnée au format numérique à travers un bus I2C. La gestion de la communication s'effectue à l'aide d'un multiplexeur de 8 canaux de référence TCA9548ARGER.



Figure 19 – Capteur de pression MS583702BA01-50

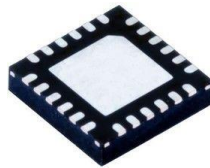


Figure 20 – Multiplexeur I2C TCA9548ARGER

F. Télémétrie

La télémétrie d'Ermes fonctionne autour de la technologie de modulation LoRa. Nous utilisons un module de référence RA-01H qui intègre un transmetteur-récepteur LoRa de référence SX1276 couramment utilisé pour des communications longues distances LoRa. Il fonctionne sur la bande 868Mhz et peut émettre un signal d'une puissance amplifiée de 20 dBm.



Figure 21 - Module LoRa RA-01H d'AI Thinker

1. A bord

La télémétrie à bord possède un module LoRa qui a pour vocation de transmettre les données de vol au sol.

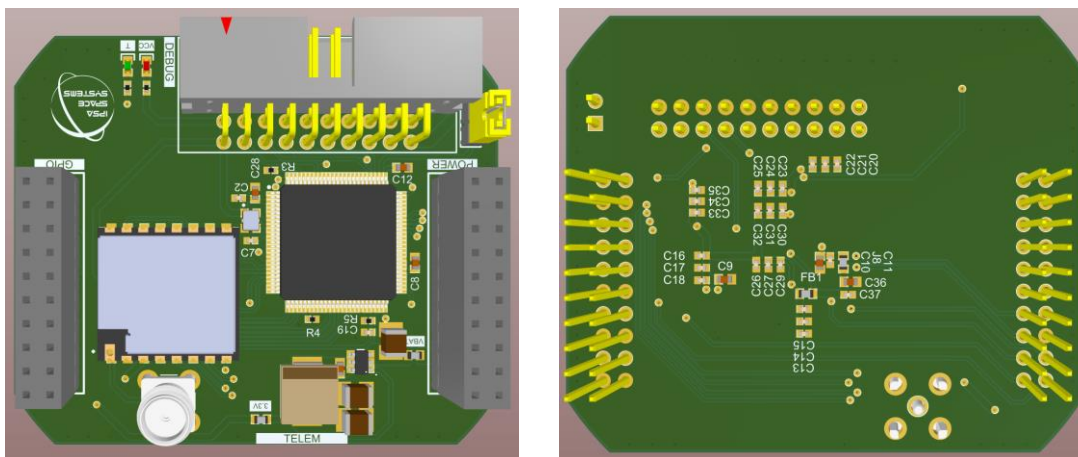


Figure 22 - Représentation 3D de la carte Télémétrie Sol

2. Au sol

La réception est assurée par un PCB conçu pour intégrer le même modèle de module LoRa en mode récepteur.

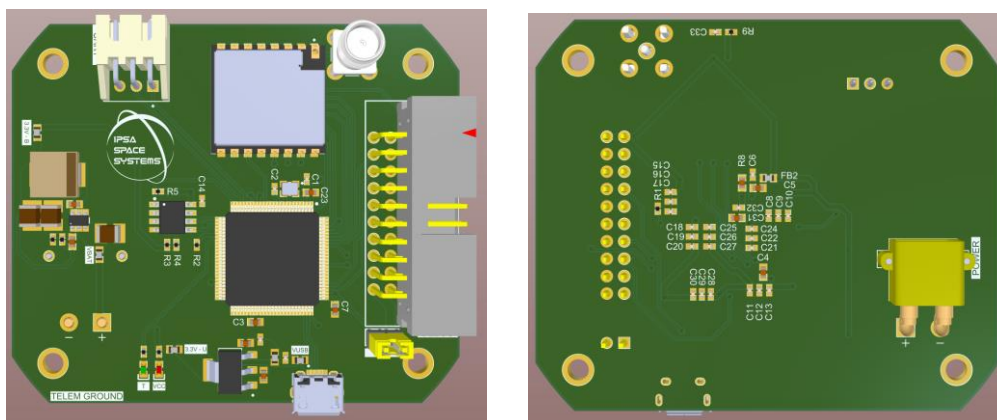


Figure 23 - Représentation 3D de la carte Télémétrie Sol

L'antenne choisie pour obtenir les données transmises par la fusée possède un gain de 13dBi et d'un VSWR de 1.8.



Figure 24 - Antenne YaGi dans le cadre de la réception LoRa

Les données sont communiquées à l'ordinateur puis affichées et enregistrées localement par une interface graphique conçu et développé avec Flutter. Il s'agit d'une technologie développée par Google pour le développement d'application multiplateforme. Elle est simple d'utilisation et open source. De nombreuses bibliothèques existent et peuvent permettre par exemple de manipuler des communications série et USB.

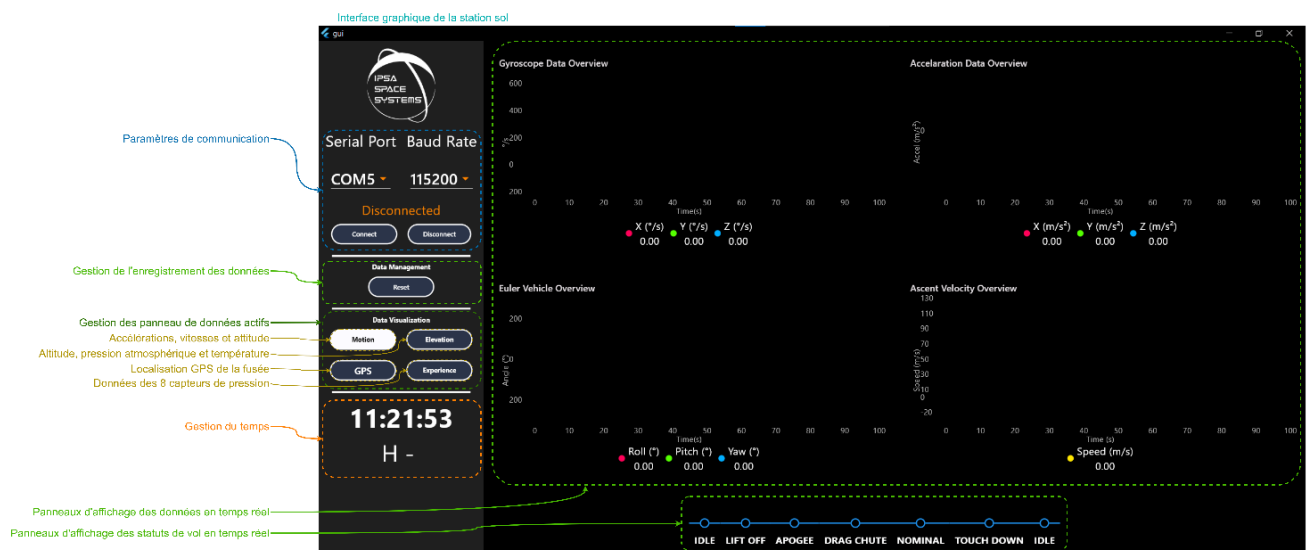


Figure 25 - Aperçu de l'interface graphique

G. Support caméra

Le support caméra est un PCB qui reçoit et alimente le module responsable de l'enregistrement vidéo à bord de la fusée. Trois prises DuPont supplémentaires sont présentes :

- 1 connecteur de 3 broches pour l'alimentation et le contrôle du servo moteur de notre système de séparation
- 1 connecteur de 2 broches pour le jack utilisé dans le cadre de la détection du décollage
- 1 connecteur de 2 broches permettant d'offrir une alimentation au module responsable de l'enregistrement vidéo

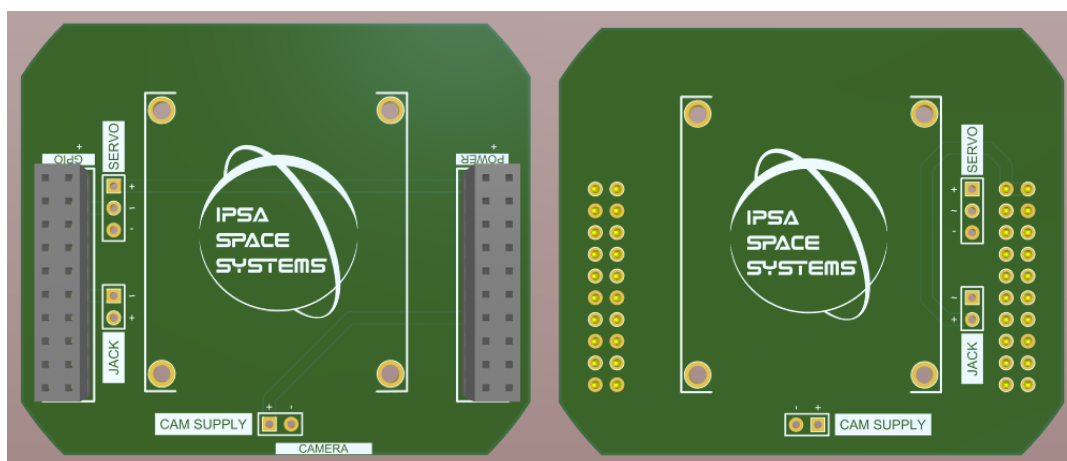


Figure 26 - Représentation 3D de la carte Support Caméra

Le support intègre le module caméra runcam split 4 qui offre une qualité audio-visuelle plutôt bonne ainsi que d'un large champ de vision de 140°.

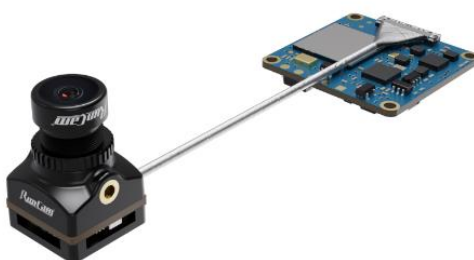


Figure 27 - Module caméra Runcam Split 4

Le support des batteries intègre des connecteurs XT30 mâles coudés pour chaque batterie. Le connecteur coudé de 10 broches relie les signaux d'alimentation aux interrupteurs de l'interface externe.

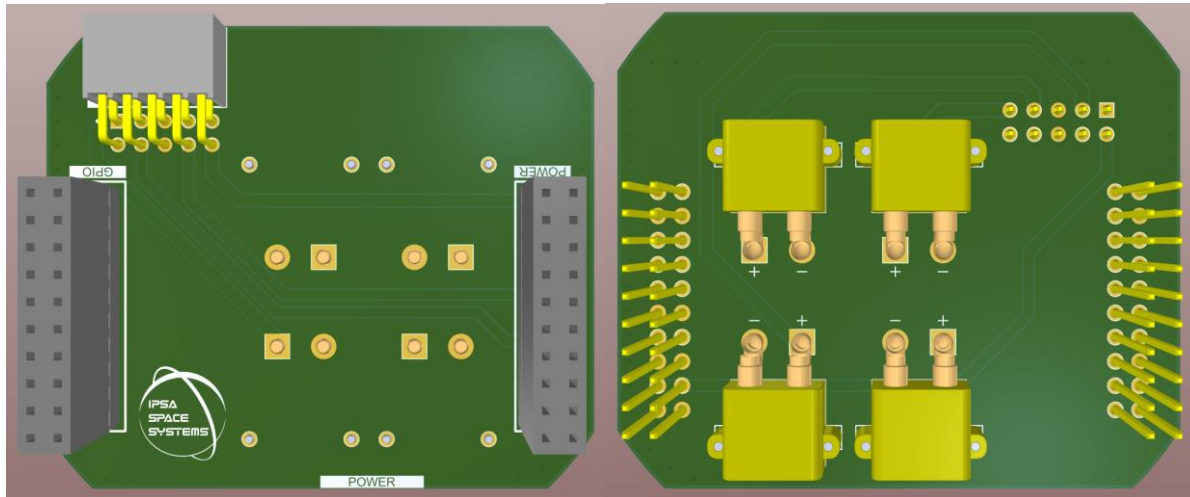


Figure 28 - Représentation 3D de la carte Support Batterie

I. Interface externe

L'interface externe prévoit un PCB permettant la mise en œuvre de voyant lumineux et le passage de signaux numériques et d'alimentation traversant les interrupteurs externes.

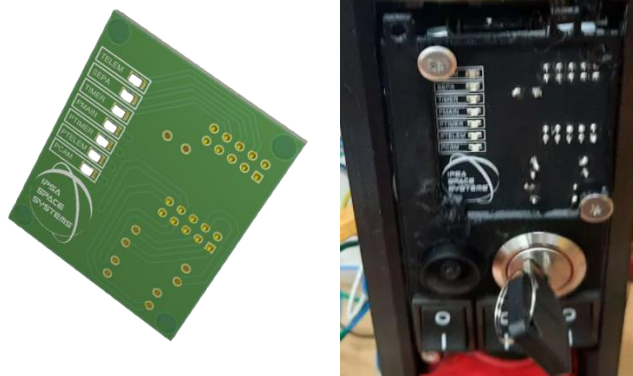


Figure 29 - Représentation 3D de la carte d'interface externe et assemblage complet

V. Résultats et analyse du vol

Malheureusement Ermes avait toutes les conditions pour effectuer un vol supersonique mais lors du C'Space 2025 une pénurie de moteur Pro 75 a eu lieu et ainsi notre fusée n'a pas pu obtenir de Pro 75 malgré une qualification obtenue le mardi 8 juillet.

Cependant après quelques modifications sur la fusée et une dérogation obtenue notre fusée a pu être apte au vol avec un Pro 54 le mercredi 9 juillet. Ce changement a grandement affecté la physionomie du projet. La vitesse maximale atteinte était de 262 m/s, très inférieure à un régime supersonique ou encore transsonique malgré une vitesse de sortie de rampe supérieure à celle d'un Pro75. L'équilibre reste stable et facilement adaptable pour l'équipe à la fois d'un point mécanique que logiciel. L'insertion du nouveau propulseur est guidée par le boîtier d'un Pro75 tandis que le blocage est assuré par deux nouvelles tiges filetées plus longues à celles initialement prévues.



Figure 30 - Aperçu du train arrière intégrant l'adaptation muni du propulseur de test inséré

A. Déroulement du vol

Le vol s'est déroulé le vendredi 11 juillet de façon nominale. Le parachute de récupération s'est parfaitement déployé au moment de l'apogée de la fusée. Nous disposons d'une caméra embarquée qui a enregistré le vol. Nous avons observé depuis le sol et à l'aide de la vidéo embarquée un roulis très important.



Figure 31 - Aperçu d'ERMES au décollage

Durant la récupération, nous avons retrouvé la fusée avec des dommages principalement au niveau de la coiffe.



Figure 32 - Aperçu de la pointe après la récupération

Notre adaptation du propulseur Pro 54 a fortement subi les efforts du propulseur déformant fortement les tiges de maintien. La fusée était toujours active d'un point de vue électronique après 3h d'activité.



Figure 33 - Aperçu du train arrière après récupération

B. Analyse du vol

Nous avons malheureusement rencontré des soucis logiciels durant cette campagne pour lesquels nous n'avons pas été en mesure de corriger concernant la réception LoRa et la communication avec notre support de mémoire embarqué FRAM.

Cependant, nous avons constaté au moment de l'ouverture que les tubes en plastique utilisés avec les capteurs de pression étaient défaits pour la majorité.

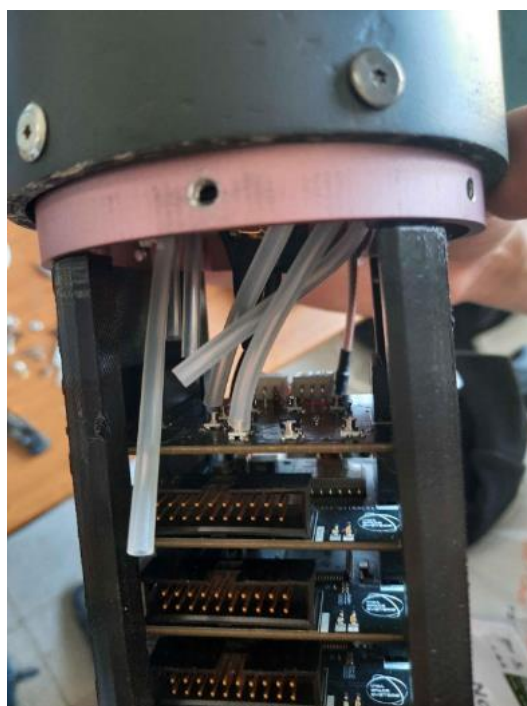


Figure 34 - Etat des tubes d'entrée d'air après ouverture de la fusée

L'extrait vidéo que nous a montré un léger vacillement durant la phase d'ascension comportant un roulis très important. Nous suspectons un léger défaut d'alignement et un déséquilibre transversal étant à l'origine de ce phénomène constaté. Grâce à l'audio de l'enregistrement, nous avons pu entendre le mécanisme de la séparation se déclencher sans difficulté.

VI. Conclusion et perspectives

En une année et demie de développement, nous avons gagné en expérience sur la conception, la fabrication et la résolution de problèmes de nos systèmes mécaniques et électroniques. Confrontés à de nombreux imprévus et ralentissements, une nouvelle génération a eu l'occasion de se familiariser en profondeur avec les procédés de développement de l'association.

Cette première conception de fusée pour la majorité des membres de l'équipe qui y ont participé s'achève sur un vol nominal et nous permet de retenir de précieuses conclusions pour les projets à venir, en mécanique comme en électronique/logiciel.

ISS a l'ambition de participer à l'EuRoc 2026 et s'y concentre en ce moment même pleinement avec la totalité des membres des équipes d'ERMES, STAR-P mais également des nouvelles recrues de l'association.



Table des illustrations

Figure 1 - page Stabilito du Stabtraj Sauvegarde ERMES avec Pro75	3
Figure 2 - Tableau récapitulatif des paramètres d'Ermes	3
Figure 3 - CAO globale d'Ermes	4
Figure 4 - Aperçu général de l'étage propulsif	5
Figure 5 - Aperçu de d'étage électronique et de la coiffe	5
Figure 6 - Aperçu du système de récupération.....	6
Figure 7 – Vue du dessus du mécanisme du système de séparation (ci-à gauche) Servo QY324MG (ci-à droite)	6
Figure 8 - Aperçu du support de la case électronique	8
Figure 9 - Architecture électronique globale de l'électronique au sol.....	9
Figure 10 - Architecture générale à bord de la fusée	10
Figure 11 - Dimensions des PCB.....	10
Figure 12 - Représentation générale d'électronique embarquée d'ERMES	11
Figure 13 - Représentation 3D de la carte Séquenceur	12
Figure 14 - Représentation 3D de la carte Superviseur.....	12
Figure 15 – Support FRAM FM25V05-GTR.....	12
Figure 16 - Représentation 3D de la carte Enregistreur	13
Figure 17 - Représentation 3D de la carte Interface Capteurs	13
Figure 18 - module WTAHRS1 de Wit Motion	14
Figure 19 – Capteur de pression MS583702BA01-50.....	14
Figure 20 – Multiplexeur I2C TCA9548ARGER	14
Figure 21 - Module LoRa RA-01H d'AI Thinker	15
Figure 22 - Représentation 3D de la carte Télémétrie Sol	15
Figure 23 - Représentation 3D de la carte Télémétrie Sol	15
Figure 24 - Antenne YaGi dans le cadre de la réception LoRa	16
Figure 25 - Aperçu de l'interface graphique	16
Figure 26 - Représentation 3D de la carte Support Caméra.....	17
Figure 27 - Module caméra Runcam Split 4	17
Figure 28 - Représentation 3D de la carte Support Batterie.....	18
Figure 29 - Représentation 3D de la carte d'interface externe et assemblage complet	18
Figure 30 - Aperçu du train arrière intégrant l'adaptation muni du propulseur de test inséré	19
Figure 31 - Aperçu d'ERMES au décollage	19
Figure 32 - Aperçu de la pointe après la récupération	20
Figure 33 - Aperçu du train arrière après récupération	20
Figure 34 - Etat des tubes d'entrée d'air après ouverture de la fusée	21