

Lenny BEAURAIN
Responsable Electronique

Antoine CHASSAING
Responsable CAO

Valentin BIGAND
Responsable Parachute

Geoffroy CHAUVIN
Responsable Algorithmique

Timothé BERNY
Tuteur de projet

PROJET CANSAT ESO



Remerciements

Dans un premier temps, nous aimerions remercier M. Didier GIGNAC, responsable de la filière spatiale de l'ESTACA, pour avoir fait confiance à notre tuteur de stage et avoir accepté notre projet PITA 2A.

Dans un second temps, nous aimerions remercier M. Timothé BERNY, étudiant en césure de l'ESTACA, pour nous avoir encadrés durant ce projet et nous avoir accompagnés dans notre processus de réflexion.

Nous souhaitons également remercier Planète Sciences¹ et le CNES² qui ont été amenés à nous superviser dans le cadre des Réunions Club Espace (RCE³), et nous les remercions d'avance pour leur accueil cet été au concours C'Space à Tarbes (65).

Enfin, nous tenons à saluer l'ensemble du bureau de l'ESO⁴ pour leur confiance et leur accompagnement financier tout au long du projet.

Sommaire

Introduction	1
I. Analyse du cahier des charges - Concours CANSAT 2025	2
A. Description et choix des missions	2
II. Réalisation du CANSAT	3
A. Architecture mécanique – Conception CAO ¹⁰	3
B. Algorithmique du CANSAT	4
C. Électronique et systèmes embarqués	7
D. Dimensionnement des parachutes	9
III. Vol du CANSAT	11
A. Missions réalisées	11
B. Difficultés techniques rencontrées	11
C. Déroulement du vol	12
D. Analyse et perspective	12
Conclusion.....	13
Annexes	14
Annexe 1 : Vue du CANSAT sous SolidWorks	14
Annexe 2 : Méthodes de récupération des données	14
Annexe 3 : Comparatif de l'efficacité des technologies de transmission.....	14
Annexe 4 : Schéma électrique des deux modules du CANSAT.....	15
Annexe 5 : Photos de parachutes cruciformes de CANSAT.....	15
Annexe 6 : Heinekan-Sat version final	16
Annexe 7 : Language au C'Space.....	16
Lexique.....	17
Bibliographie	18

Introduction

Dans le cadre de notre projet PITA de deuxième année, nous avons choisi par le biais de l'ESO de participer au concours CANSAT⁵, une compétition éducative internationale organisée par l'organisme Planète Sciences et le CNES.

Ce défi, destiné aux étudiants, consiste à concevoir, fabriquer et lancer un minisatellite de la taille d'une canette de soda de 330 ml. Une fois le largage par drone effectué, notre satellite doit réaliser une mission scientifique ou technique prédéfinie et transmettre des données exploitables à une station sol.

Le projet CANSAT a pour but d'initier les étudiants à la conception, à la réalisation et à l'intégration des systèmes embarqués innovants dans le domaine du spatial. Cela permet de contribuer à la formation des étudiants ingénieurs, en développant des compétences en gestion de projet, en conception technique et en asservissement des systèmes embarqués.

Notre objectif tout au long de l'année a été de répondre au cahier des charges imposé par le concours, tout en optimisant les performances et la fiabilité de notre CANSAT.

Après plusieurs mois de conception et d'itérations techniques, le projet a pu être concrétisé par une participation au concours C'Space 2025 en juillet. Les tests et la campagne de lancement ont permis de valider une grande partie des choix effectués en amont, tout en mettant en lumière plusieurs limites et points d'amélioration. Le présent rapport expose non seulement le processus de conception et de réalisation, mais aussi les résultats concrets du vol et les enseignements tirés de l'expérience.

Nous développerons ainsi les méthodes utilisées durant les phases de modélisation CAO, de programmation, de conception des systèmes embarqués et de dimensionnement de parachute.

I. Analyse du cahier des charges - Concours CANSAT 2025

A. Description et choix des missions

Notre CANSAT doit répondre aux exigences de plusieurs missions. Certaines de ces missions sont obligatoires afin de pouvoir lancer le CANSAT le jour J, d'autres sont facultatives. Dans l'ensemble, les missions rapportent des points pour la grille d'évaluation, qui constituera notre classement parmi les autres candidats.

Les missions principales (obligatoires) :

- Séparation : Le CANSAT doit pouvoir se séparer en deux modules à une altitude comprise entre 40 et 60 mètres. Pour ce faire, nous avons opté pour l'usage d'une ventouse magnétique.
- Transmission : L'un des modules doit pouvoir transmettre en temps réel vers une station sol, son altitude et une donnée quelconque de l'atmosphère. Pour connaître notre position et l'altitude, nous utiliserons le GPS⁶ intégré à notre ESP32⁷. Quant à la communication, elle sera assurée par le module LORA⁸ de l'ESP32.
- Pour l'étude atmosphérique, nous captons l'énergie émise par les UV⁹ à l'aide d'un capteur UV pour étudier la transparence de l'atmosphère. Avec cette étude, nous voulons déterminer la présence de particules capables d'absorber ou de disperser les UV.

Les missions secondaires (optionnelles) :

- Rétrécissement : Cette mission consiste à réduire le volume de notre CANSAT au format de 330 ml. Il s'agit de la mission la plus exigeante, qui valorise sa réussite d'un facteur deux du score technique.
- Instrumentation cassée : Pour la réalisation de cette mission, nous devons trouver une solution pour déterminer l'altitude de notre appareil sans utiliser un altimètre barométrique ou un GPS. Pour ce faire, nous avons décidé d'utiliser un accéléromètre et de nous concentrer sur son accélération verticale pour estimer l'altitude à l'aide des équations de mouvement.
- Distance : Il est demandé d'intégrer de quoi mesurer la distance entre les deux parties du CANSAT une fois la séparation effectuée, puis de communiquer cette distance par télémétrie vers une station sol. Pour ce faire, nous utiliserons les GPS des deux modules pour récupérer la position qui sera redirigée vers le module principal grâce au

LORA pour en déterminer la distance. Cette information sera finalement communiquée à la station sol.

- Mission libre : Cette mission est libre et laissée à l'initiative des équipes participantes. De notre côté, nous avons choisi de ne pas réaliser de mission libre, estimant que les missions que nous menons déjà sont suffisamment nombreuses et complexes.

II. Réalisation du CANSAT

A. Architecture mécanique – Conception CAO¹⁰

L'enjeu principal de la conception CAO est de respecter le volume maximal de 330 ml imposé par le cahier des charges. Pour répondre à ce besoin, nous avons opté pour un satellite à section circulaire, car cette solution offre deux avantages majeurs :

1. Elle optimise l'espace interne du CANSAT, permettant d'intégrer davantage de composants électroniques et mécaniques, tout en réduisant les pertes de volume dues aux angles droits.
2. Elle améliore la résistance mécanique en répartissant mieux les chocs lors de l'impact au sol, grâce notamment à la présence de congés. Ces derniers visent à préserver la structure du satellite sur plusieurs tests. Bien que la pénétration dans l'air ne soit pas un facteur déterminant, la forme cylindrique reste privilégiée.

Nous avons décidé de prendre les dimensions qui nous ont été conseillées lors de la RCE2, à savoir un rayon de 30mm et une hauteur de 116.5mm.

La seconde mission de la conception CAO a été de dimensionner la taille des deux modules qui composent le CANSAT. En effet, le cahier des charges impose que le satellite se sépare en deux modules en altitude. La taille du module principal a été dictée par l'emport d'un ESP32-S3, élément central du système embarqué, nécessitant un espace suffisant pour son intégration et son câblage. Afin de préserver un volume optimal pour le module secondaire, qui accueille les autres composants essentiels à la mission, la hauteur du module principal a été réduite au strict minimum.

Le troisième défi de la conception CAO a été d'assurer l'accessibilité des boutons de commande. Ces derniers, essentiels pour la mise sous tension et l'arrêt du satellite, doivent être accessibles à la main sans possibilité de déclenchement accidentel. Cette démarche s'ajoute au CONOPS¹¹ du système, nécessaire dans notre projet, car il vise à être utilisé par les étudiants du projet TRIPLEX¹².

Sur ce même principe, nous avons décidé de mettre une vitre sur l'enveloppe du CANSAT pour avoir un contrôle visuel sur l'exécution des processus réalisés par l'ESP32. Nous avons aussi décidé de rallonger le bouton situé à côté de l'écran. Ce dernier permet de le contrôler et d'activer la télémétrie. L'ajout de ces fonctionnalités s'inscrit dans une volonté d'améliorer l'ergonomie du CANSAT.

L'avant-dernière mission de la conception CAO est d'assurer une communication optimale entre les deux modules du CANSAT. Cela nous a conduits à positionner les antennes face à face après séparation, afin de limiter les pertes de signal et de garantir une liaison stable. Pour réduire l'encombrement, elles s'imbriquent dans les modules, préservant leur orientation tout en maximisant l'espace disponible et la fiabilité des transmissions.

Enfin, la conception CAO a pour objectif d'optimiser les formes du CANSAT, afin de garantir une manipulation sécurisée et une impression 3D sans difficulté. Les volumes ont été simplifiés au maximum pour réduire les contraintes liées à l'impression 3D et minimiser les supports nécessaires, optimisant ainsi la durée d'impression. (**Annexe 1 : Vue du CANSAT sous SolidWorks**)

B. Algorithmique du CANSAT

La mission principale de la partie logicielle est de collecter les données des différents capteurs, de les traiter et enfin de les envoyer à la station sol. Pour ce faire, le code sur les deux modules ESP32 est fait en C++. L'autre langage envisagé est le Python, mais notre expérience sur le C et le grand nombre d'aides existantes sur Internet nous ont fait choisir le C++.

Vue d'ensemble des capteurs sur le CANSAT (Annexe 2 : Méthodes de récupération des données)

- MPU6050 : IMU¹³ 6 axes qui permet de déterminer l'altitude du CANSAT ainsi que la température extérieure ;
- GUVA-S12SD : réalise la mission de collecte d'une donnée de l'atmosphère en mesurant le spectre de lumière UV (entre 240 et 370 nm). Ce capteur, comme tous les capteurs du CANSAT, fonctionne en analogique, c'est-à-dire qu'il renvoie un nombre entre 0 et 1023 pour chaque mesure, linéaire à la tension mesurée ;
- UC6580 : GPS intégré à l'ESP32, permet le positionnement relatif entre les deux modules. L'antenne est, elle aussi, intégrée dans l'ESP32, ce qui est un gain de place conséquent. L'altitude est récupérée par l'IMU du fait du manque de précision de cette donnée par le GPS. Le module M100-5883 est le GPS placé dans le module secondaire. Ils seront calibrés aux coordonnées suivantes le jour du vol : 43°13'17.4"N 0°03'06.9"W (site de lancement à Tarbes, coordonnées imposées par le concours) ;
- SX1262 : module de transmission LoRa intégré dans l'ESP32, permet de capter les informations transmises par le module secondaire et d'envoyer toutes les données à la station sol. Le module RFM9x est l'équivalent pour le module secondaire.

Transmission LoRa

La transmission des mesures du CANSAT est réalisée par la technologie de modulation LoRa. Elle a été choisie pour sa faible consommation comparée au Wi-fi ou à la 4G et pour sa grande portée en environnement rural à la différence du Bluetooth par exemple (**Annexe 3**). Dans le CANSAT, la transmission s'effectue selon le mode opératoire suivant (pour un cycle) : le « SLAVE » envoie ses données brutes au « MASTER » via le module LoRa RFM9x. Après réception, le « MASTER » envoie à son tour les données des deux modules à la station sol via son module LoRa SX1262. L'opération respecte les normes françaises d'émission d'ondes (433MHz ou 868MHz), notamment celle du « Duty Cycle »¹⁴. Le débit qui résulte de cette opération est relativement faible, il a donc été décidé de n'émettre à la station sol que lorsqu'un certain nombre de données ont été captées par les deux modules. L'envoi sous forme de paquets plus conséquents résout un autre problème : le bruit et les interférences produits par les autres émetteurs présents le jour du lancement seront filtrés par la clé placée en début de paquet qui différencie les signaux parasites des signaux utiles.

Altimètre par IMU

La centrale inertielle placée sur le module principal renvoie l'accélération et la vitesse de rotation sur les trois axes. Pour obtenir l'altitude, il faut donc intégrer deux fois l'accélération et une fois la vitesse de rotation sur chacun des axes afin d'obtenir un déplacement et une rotation temporelle. À partir de là, on effectue un calcul matriciel pour passer d'une base sphérique à une base cartésienne et on récupère la coordonnée en $\hat{z}$ pour obtenir l'altitude en fonction du temps. Cette partie calculatoire sera effectuée par l'ESP32, qui a une puissance de calcul suffisante pour alléger la quantité de données à envoyer par LoRa.

$$\begin{bmatrix} \sin(\theta)\cos(\phi) & \rho\cos(\theta)\cos(\phi) & -\rho\sin(\theta)\sin(\phi) \\ \sin(\theta)\sin(\phi) & \rho\cos(\theta)\sin(\phi) & \rho\sin(\theta)\cos(\phi) \\ \cos(\theta) & -\rho\sin(\theta) & 0 \end{bmatrix}$$

Matrice de changement de base sphérique vers cartésienne

Calibration et étalonnage des capteurs

L'ensemble des capteurs doit être étalonné en amont du concours CANSAT, mais ils doivent aussi être capables de se calibrer le jour J. Pour ce faire, un protocole de mise en route du GPS est nécessaire et une calibration de l'IMU est impérative. Ces précautions sont primordiales pour la fiabilité des données, mais ne sont pas suffisantes pour obtenir des résultats satisfaisants. Un filtre comme celui de Kalman¹⁵ est donc à l'étude, mais son implémentation ne se fera qu'après le vol du CANSAT, avec les données récoltées durant celui-ci. Les étalonnages des différents capteurs seront quant à eux réalisés lors de vols tests pour la centrale inertielle et avec des protocoles simples pour la température, le rayonnement UV et le GPS.

Sécurité des protocoles

Pour s'assurer du bon fonctionnement des systèmes avant le lancement, le règlement CANSAT impose un certain nombre de sécurités. Ainsi, l'ajout d'un écran ST7735 et d'interrupteurs couplés à des LEDs permet de vérifier visuellement l'alimentation des systèmes. Un bouton présent sur l'ESP32 permettra de contrôler les émissions radio du satellite.

C. Électronique et systèmes embarqués

Le premier système embarqué abordé est le système d'alimentation du CANSAT. La mission principale de ce projet étant la séparation en 2 modules, nous avons imaginé deux systèmes d'alimentation distincts.

Schéma électrique de l'ensemble du CANSAT (Annexe 4)

Lors de l'étude du cahier des charges, nous avons fait des choix de composants qui nous ajoutent des contraintes vis-à-vis de l'alimentation du module principal :

- Alimentation d'une ventouse magnétique qui demande une tension de 12V et consomme une puissance de 3.5W lorsqu'elle est activée, à savoir un courant passant d'environ 292mA pendant quelques secondes.
- Alimentation de notre ESP32-S3 avec une tension nominale de 5V tout au long de l'exercice, avec une consommation estimée à la hausse à 200mAh.
- Taille de la batterie avec le meilleur rapport autonomie/puissance pour subvenir à la consommation de notre CANSAT pendant au moins 1 heure (le règlement impose 45 minutes minimum) tout en gardant une masse et surtout un volume réduit.

Nous avons opté pour l'utilisation d'une pile 9 volts au lithium, qui présente plusieurs avantages. D'abord celui d'avoir un volume faible de 2.25 cl, tout en ayant une autonomie nettement supérieure aux piles alcalines, avec une capacité de 1200 mAh. Elle présente également l'avantage d'être rechargeable.

De plus, afin d'alimenter la ventouse magnétique, nous devons atteindre une tension de 12 volts. Pour ce faire, nous avons choisi d'intégrer un booster de tension, convertissant un courant continu de 9 volts en 12 volts. L'utilisation de ce module affecte le courant, selon un principe similaire à celui d'un transformateur, de sorte que la batterie fournisse un courant de 390 mAh. Cette valeur reste acceptable pour une utilisation de quelques secondes. Quant au module lui-même, il peut délivrer jusqu'à 2A, ce qui correspond parfaitement à sa plage d'utilisation. Enfin, pour alimenter le reste du circuit, nous devons avoir un courant continu de 5 volts. C'est pourquoi nous utilisons un régulateur de tension de référence LM7805.

Le montage du module secondaire est quant à lui simplifié, du fait de l'absence des contraintes rencontrées précédemment. Ainsi, la principale mission consiste à choisir la batterie la plus adéquate. La solution retenue, car plus simple et plus économique, est l'utilisation d'une batterie au lithium polymère, délivrant une tension nominale de 3.7 volts et une capacité de 820 mAh. Ces caractéristiques sont adaptées pour une utilisation de courte durée, ce module devant descendre bien plus rapidement que le module principal. Par ailleurs, l'ensemble des composants de ce module nécessite une alimentation en 3.7 volts, c'est pourquoi nous ne sommes pas confrontés à des contraintes supplémentaires.

Le second système embarqué du CANSAT est la détection de la séparation en deux modules. Ce système est indispensable pour pouvoir détecter qu'il y a bien eu une séparation physique.

Trois solutions ont ainsi été étudiées :

- La première solution est d'ajouter une ligne de code après l'activation de la ventouse, mais cette solution ne garantit pas que les modules se sont séparés physiquement.
- La seconde solution, la plus évidente à nos yeux, est d'utiliser un capteur à effet Hall¹⁶, parfaitement adapté pour une utilisation avec une ventouse magnétique. Or, nous n'avions pas ce composant à disposition et, afin de limiter l'enveloppe budgétaire du projet, nous avons écarté cette solution.
- Finalement, nous avons opté pour une photorésistance. Ce composant fait varier sa résistance en fonction de la luminosité qui lui parvient. En amont de la séparation, nous pouvons considérer que la photorésistance est plongée dans le noir complet.

Puis, après la séparation, la face inférieure du module principal devient exposée à la lumière et la valeur de la photorésistance varie. En plaçant une résistance de valeur constante en amont, nous pouvons relever la tension à ses bornes. Ainsi, l'ESP32 détecte une variation de tension, et nous interprétons cette donnée comme la séparation physique du satellite. Cette information sera le point de départ de l'activation des fonctionnalités de la seconde partie du CANSAT.

Le troisième système embarqué mis en place concerne la détection du largage du CANSAT. Ce dispositif permet de déterminer précisément le moment où notre satellite se

détache du drone de largage et entame sa chute libre. C'est une étape essentielle qui nous indique le début de l'ensemble des missions ainsi que le commencement de l'épreuve.

Pour concevoir ce système, nous nous sommes inspirés du principe des languettes d'isolation en plastique, couramment utilisées dans les appareils électroniques à piles. Ces languettes empêchent la mise en contact entre les piles et le circuit électrique. Nous avons adapté ce mécanisme afin de bloquer la connexion entre deux plaques conductrices qui, à l'état initial, sont naturellement en contact.

Ce morceau de plastique est fixé au drone grâce à un câble court, pour éviter les accidents liés au drone. Il est suffisamment fin pour éviter toute adhérence aux plaques, afin qu'il se détache uniquement sous l'effet du poids du CANSAT lors de la chute libre. Une fois la languette retirée, les plaques entrent en contact et un courant électrique circule, indiquant que notre CANSAT a bien été largué.

D. Dimensionnement des parachutes

La mission principale du pôle parachute est de dimensionner, concevoir, et de penser le maintien des parachutes nécessaires aux 2 modules du CANSAT lors de leur descente. Les prérequis du cahier des charges pour la conception des parachutes ont été :

- La stabilité lors de la descente, avec une vitesse de descente comprise entre 2m/s et 15m/s ;
- La facilité de conception, puisque nous voulions en concevoir plusieurs pour réaliser plusieurs tests de largage et posséder plusieurs exemplaires du CANSAT ;
- Un faible encombrement.

Après avoir considéré différents choix pour la forme des parachutes et après avoir étudié les points forts et les défauts de chacun, il a été décidé de concevoir des parachutes cruciformes. Il est nécessaire de concevoir deux parachutes, un pour chaque module. Le module effectuant les mesures est le plus important. Par conséquent, il doit descendre plus lentement que le second afin d'allonger la durée d'acquisition des données.

Concernant le calcul de la surface nécessaire de chaque parachute, nous avons procédé comme suit :

En partant de la 2ème loi de Newton :

$$\sum \vec{F}_{ext} = m \cdot \vec{a}$$

Avec d'une part :

$$\sum \vec{F}_{ext} = \vec{F}_{gravité} + \vec{F}_{traînée}$$

Et d'autre part : $\|\vec{F}_{traînée}\| = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot S \cdot v^2$ et $\|\vec{F}_{gravité}\| = m \cdot g$

- S = section transversale en m^2 .
- C_d = coefficient de traînée du parachute, sa valeur dépend de la forme/géométrie du parachute, elle a été fixée à 1 par défaut.
- ρ = densité de l'air, considérée constante dans l'étude à $1.225 \text{ kg} \cdot m^{-3}$.
- v = vitesse de chute du CANSAT comprise entre $2 \text{ m} \cdot s^{-1}$ et $15 \text{ m} \cdot s^{-1}$.
- m = masse du système en kg.
- g = valeur normale de la pesanteur terrestre fixée à $9.81 \text{ m} \cdot s^{-2}$.

Durant les premières secondes suivant le largage, cette somme des forces n'est pas nulle, car le CANSAT accélère juste après le largage et décélère après quelques secondes. On décide cependant de négliger cette phase et de considérer que le CANSAT a une vitesse de chute constante durant toute la descente.

On a donc l'accélération : $a = 0 \text{ m} \cdot s^{-2}$.

Ce qui équivaut à la relation suivante : $m \cdot g - \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 = 0$

Finalement, on obtient :

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot g}{C_d \cdot \rho \cdot v^2}$$

Pour le module principal, nous avons choisi une vitesse de $5 \text{ m} \cdot s^{-1}$ pour une masse du module de 235g, et pour le module secondaire, une vitesse de $8 \text{ m} \cdot s^{-1}$ pour une masse de 135g. Après calcul, en tenant compte des incertitudes, nous avons besoin d'une surface alaire¹⁷ de 1511 cm^2 pour le module principal et d'une surface de 339 cm^2 pour le module secondaire.

Nous sommes ensuite passés à la réalisation des parachutes. Chaque parachute est composé de 5 carrés de surfaces identiques cousus ensemble en forme de croix. Nous avons choisi le nylon comme matière principale pour sa souplesse et sa solidité. Des ourlets ont été rajoutés aux extrémités et à la liaison des carrés pour apporter de la rigidité aux parachutes. Les parachutes ont été installés en respectant leur sens d'ouverture. Les suspentes du parachute du module principal, composées de fil de pêche, ont été fixées au bouchon de ce dernier, tandis que celles du parachute du module secondaire ont été attachées à la base du carter du module. ([Annexe 5](#))

III. Vol du CANSAT

A. Missions réalisées

Lors du lancement effectué en juillet au C'Space 2025, les missions suivantes ont été intégrées et déployées :

- Séparation des deux modules
- Instrumentation cassée : la mesure de l'altitude a été réalisée avec succès par l'exploitation des données de l'accéléromètre, validant l'approche de calcul sans GPS
- Rétrécissement : le satellite respectait bien le volume imposé de 33 cl, confirmant la pertinence de la conception CAO
- Mesure des UV grâce au capteur embarqué

En revanche, la télémétrie et la mesure de la distance n'ont pas pu être réalisés par manque de temps.

B. Difficultés techniques rencontrées

Si le vol a confirmé la validité de plusieurs choix techniques, il a également révélé certaines faiblesses :

- Chaîne d'alimentation : les LEDs montées en série pour indiquer l'état des systèmes se sont révélées trop énergivores et peu fiables.
- Gestion de la ventouse magnétique : le régulateur de tension assurant le lissage s'est montré insuffisant, entraînant une instabilité lors de l'activation.
- Erreurs de câblage : une mauvaise interprétation du GND général a affecté le fonctionnement de certains interrupteurs.

Ces problèmes, bien que non bloquants pour le vol, ont compromis la fiabilité globale et devront être corrigés avant une future campagne.

C. Déroulement du vol

Le vol du CANSAT s'est déroulé dans des conditions nominales au C'Space.

- Détection du largage : le système de languette a fonctionné correctement, déclenchant la mise en marche des systèmes dès la libération par le drone.
- Séparation des modules : elle a eu lieu comme prévu, aux alentours de 50 mètres d'altitude, validant la mécanique de la ventouse.
- Descente du module principal : le parachute s'est correctement déployé, assurant une chute contrôlée et une collecte de données satisfaisante.
- Descente du module secondaire : le parachute n'a pas réussi à s'ouvrir. Celui-ci a donc chuté librement, ce qui a conduit à la perte de données complémentaires et à une dégradation mécanique du module à l'atterrissage.

Globalement, l'expérience a permis de démontrer la faisabilité du concept, tout en mettant en évidence des marges de progression importantes.

D. Analyse et perspective

Les résultats du vol mettent en évidence un bilan contrasté. La séparation a fonctionné et les capteurs à l'intérieur du module principal ont tous bien fonctionné.

Cependant, plusieurs points restent critiques. La non-ouverture du parachute secondaire est le principal échec, limitant la redondance des données et mettant en péril la récupération complète des deux modules. De plus, certains choix de conception électronique (alimentations, LEDs, gestion du GND) devront être revus pour renforcer la robustesse du système.

À l'avenir, le projet pourrait être intégré dans une fusée expérimentale type TRIPLEX développée par l'ESO, capable d'atteindre des altitudes beaucoup plus importantes (jusqu'à 2000 m). Cela permettrait non seulement d'augmenter la durée et la fiabilité des mesures, mais aussi d'élargir le champ des applications scientifiques (étude de la couche d'ozone, mesures atmosphériques en altitude, etc.). Avant cela, une série d'améliorations mécaniques et électroniques est nécessaire pour fiabiliser le système lors de prochains vols.

Conclusion

Le projet Heinekan-Sat a représenté une expérience riche et formatrice, tant sur le plan technique que sur celui de la gestion d'équipe. Après plusieurs mois de conception, de calculs et de tests, le lancement au C'Space a été nominal, tout en révélant des points d'amélioration cruciaux.

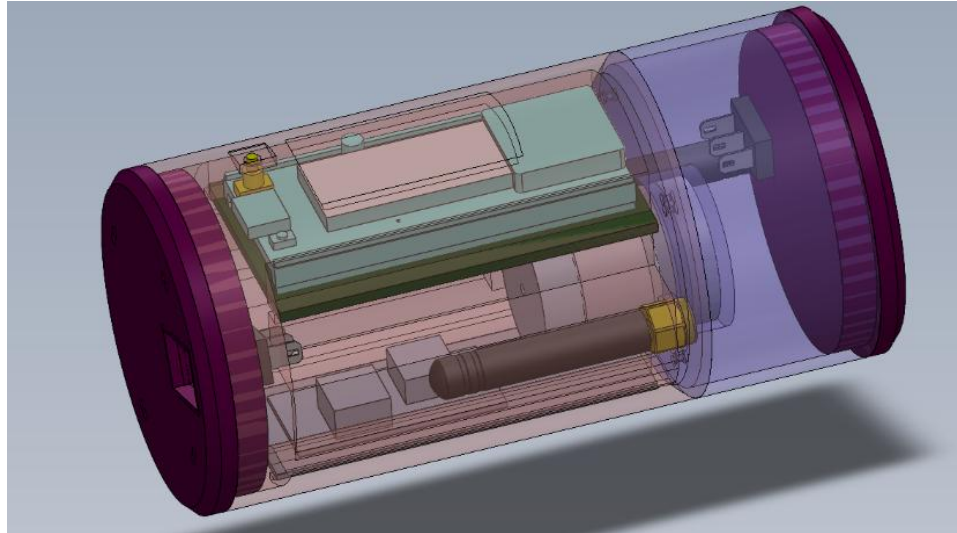
La séparation des modules a fonctionné comme attendu, et l'intégration de capteurs a permis d'obtenir des données atmosphériques pertinentes. L'échec du parachute secondaire et de la transmission a cependant montré la nécessité de renforcer la fiabilité mécanique et électrique et de revoir le conditionnement des systèmes critiques.

Cette expérience constitue une base solide pour les projets futurs, notamment dans le cadre de la fusée expérimentale TRIPLEX. Avec des correctifs ciblés sur les problèmes identifiés, le concept développé par l'équipe a le potentiel de devenir un outil fiable et polyvalent pour des expériences scientifiques embarquées en altitude.

Avec un lanceur encore plus puissant capable de dépasser la stratosphère, nous pourrions estimer l'épaisseur de la couche d'ozone localement pour diverses études scientifiques médicales ou météorologiques.

Annexes

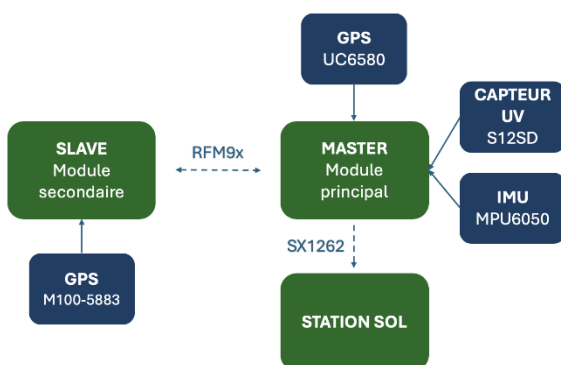
Annexe 1 : Vue du CANSAT sous SolidWorks



Annexe 1 : La partie rose saumon correspond au module principal et à la partie violette au module secondaire. En pourpre, les bouchons possèdent des cavités qui contiennent les interrupteurs. À l'intersection des deux modules, la ventouse magnétique est visible. En noir sont représentées les antennes. Enfin, en bleu cyan, nous avons l'ESP32 monté sur sa carte PCB, représentée en vert.

Annexe 2 : Méthodes de récupération des données

Annexe 3 : Comparatif de l'efficacité des technologies de transmission

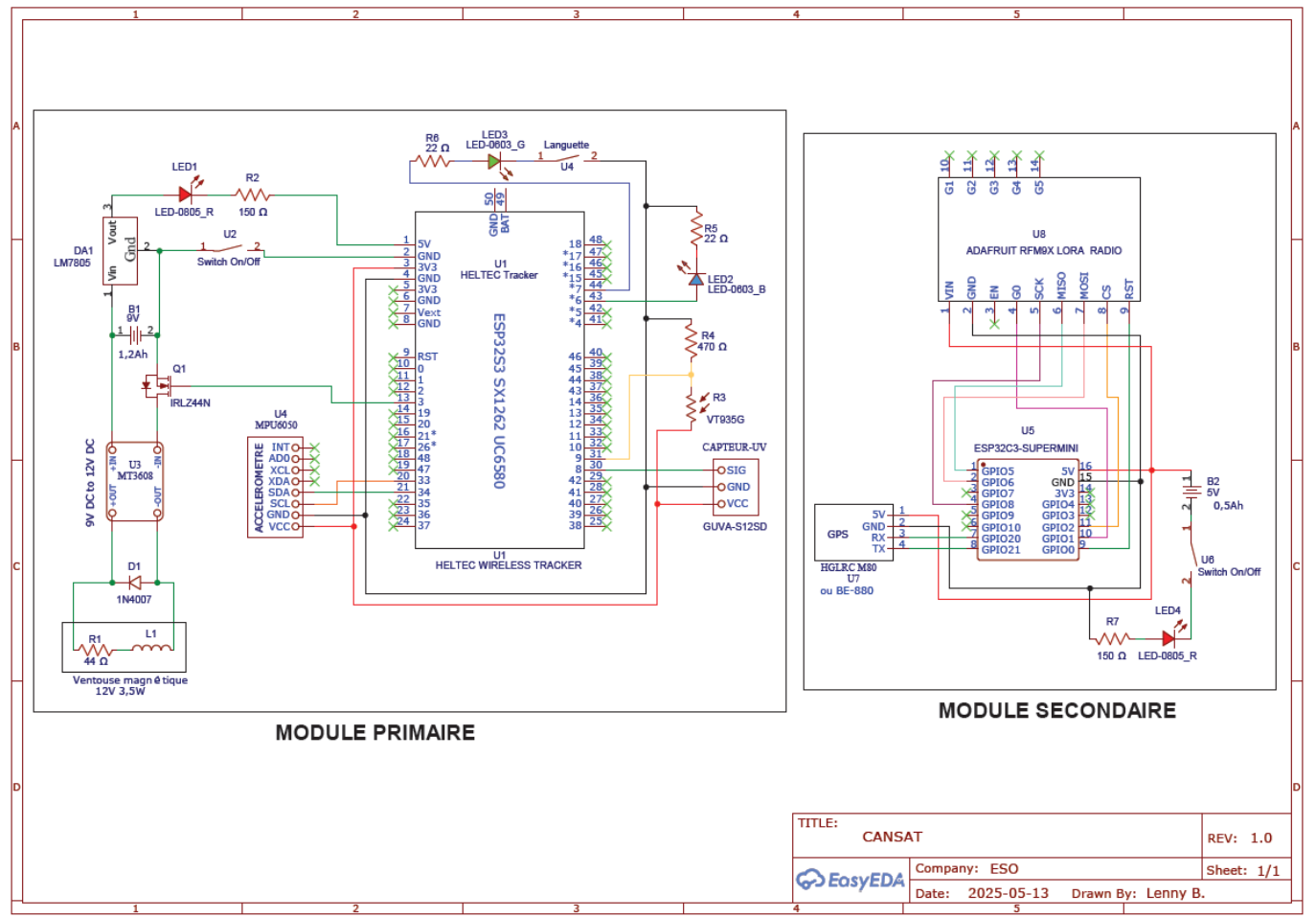


Annexe 2 : Organigramme du fonctionnement MASTER/SLAVE avec leurs capteurs associés

	Long Range	Low Power	Continuous Availability	High Bandwidth	Low Latency
Ethernet	●	●	●	●	●
Wi-Fi	●	●	●	●	●
Cellular IoT	●	●	●	●	●
LoRa	●	●	●	●	●
BLE	●	●	●	●	●

Annexe 3 : Comparatif des différentes technologies de transmission

Annexe 4 : Schéma électrique des deux modules du CANSAT



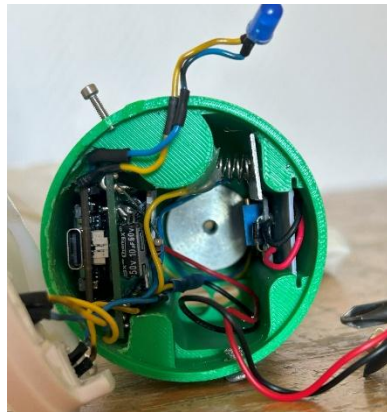
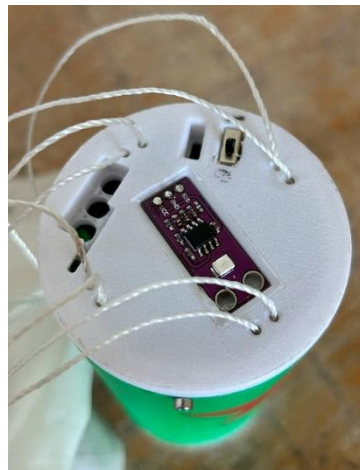
Annexe 5 : Photos de parachutes cruciformes de CANSAT



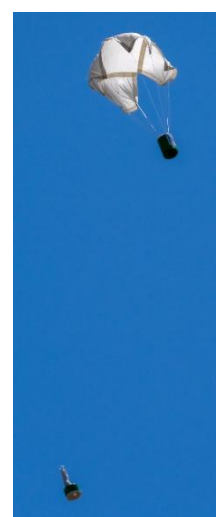
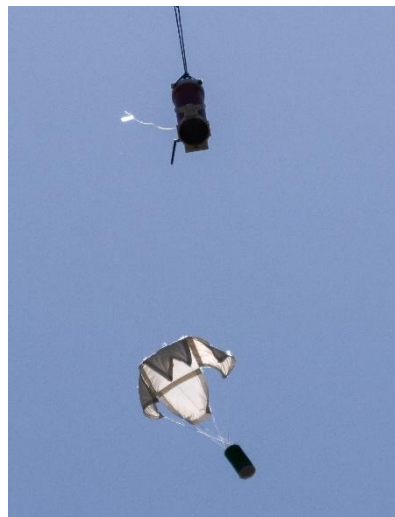
Annexe 5 : À gauche : Exemple de CANSAT avec parachute cruciforme déployé.

À droite : Parachute du module principal, ouvert à plat.

Annexe 6 : Heineken-Sat version final



Annexe 7 : Language au C'Space

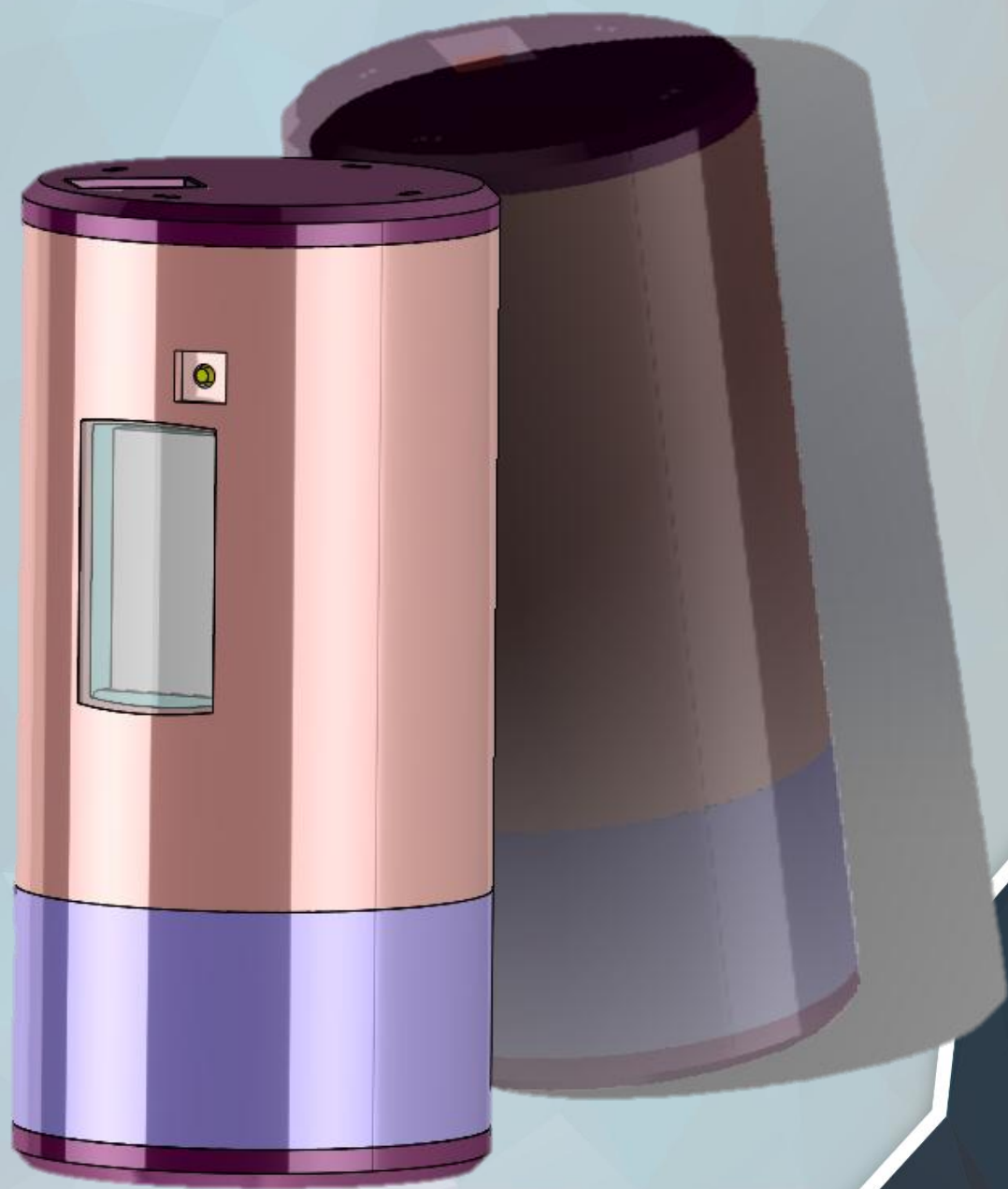


Lexique

1. **Planète Sciences** : Association de loi 1901 destinée à permettre aux jeunes de 5 à 25 ans de réaliser des projets expérimentaux de sciences et technologies à travers différentes thématiques : astronomie, espace, environnement, robotique et numérique.
2. **CNES** : **C**entre **N**ational d'**E**tudes **S**patiales, agence spatiale française.
3. **RCE** : **R**éunion **C**lub **E**space, réunion organisée par Planète Sciences, au cours de laquelle les étudiants présentent l'avancement de leur projet aux contrôleurs Planète Sciences.
4. **ESO** : **E**staca **S**pace **O**dyssée, unique association spatiale du campus de Saint-Quentin
5. **CANSAT** : Acronyme de **C**anette **S**atellite, satellite au format d'une canette de 330ml.
6. **GPS** : **G**lobal **P**ositioning **S**ystem, système de positionnement par satellite.
7. **ESP32** : MCU, **M**icro**C**ontroller **U**nit, 2 cœurs, intégrant le Wi-Fi, le Bluetooth, un GPS et compatible LoRa. Notre modèle est le Wireless Tracker V1.1 de la marque Heltec.
8. **LORA** : **L**ong **R**ange, technique de radiocommunication.
9. **UV** : **U**ltra**V**iolet, rayonnement électromagnétique de longueur d'onde comprise entre 100 et 400nm.
10. **CAO** : **C**onception **A**ssistée par **O**rdinateur. Dans notre cas, elle est réalisée sur SolidWorks.
11. **CONOPS** : **C**oncept d'**O**pérations, document qui décrit les caractéristiques d'un système du point de vue utilisateur. Provient à l'origine du domaine militaire.
12. **TRIPLEX** : Fusée de l'ESO permettant de larguer 3 satellites de type CANSAT.
13. **IMU** : **I**nertial **M**easurement **U**nit, appelé centrale inertielle en français. Le but est de permettre la navigation du système dans un repère local.
14. **Duty Cycle** : Terme qui désigne le rapport entre le temps de transmission et le temps mort sur un cycle. En France, le Duty Cycle est fixé à 1%.
15. **Filtre de Kalman** : Filtre hérité du programme spatial Apollo et dont le but est de prédire la trajectoire d'un système avec les points précédemment atteints.
16. **Capteur à effet Hall** : Capteur qui mesure une variation de champ magnétique.
17. **Surface alaire** : la surface alaire est la surface de l'aile/du parachute, ou du profil générateur de portance.

Bibliographie

- LeeMinHo. (2024). *GUVA-S12SD UV sensor module*. GRABCAD.
<https://grabcad.com/library/guva-s12sd-uv-sensor-module-1>
- vivekanand Dhakane. (2020). *MPU6050*. GRABCAD.
<https://grabcad.com/library/mpu6050-4>
- Guilherme Florencio. (2024). *ESP32-C3 Super Mini*. GRABCAD.
<https://grabcad.com/library/esp32-c3-super-mini-1>
- DroneBot Workshop *LoRa - Long-Range Radio for IoT | Arduino, ESP32, RPI Pico*
<https://www.youtube.com/watch?v=YQ7aLHCTeeE>
- Andreas Spiess *LoRa / LoRaWAN De-Mystified / Tutorial*
<https://www.youtube.com/watch?v=hMOWbNUpDQA>
Dimitri Fajal, *Projet Hellfire*
<https://github.com/Acelspace-Projects/Hellfire>
- Keystone. *Languettes isolantes pour supports de batteries*. DigiKey.fr.
https://www.digikey.fr/fr/product-highlight/k/keystone/battery-insulating-pull-tabs?srsltid=AfmBOortNDISiXvLnTyT_-78Rxr2EzZ6obmE9YxKUfKAtpCCodV0VII6
- Heltec. *Wireless Tracker*. Heltec.org. <https://heltec.org/project/Wireless-Tracker/>
- Sidharthmohannair. (2024, Nov 25). *Tutorial: ESP32-C3 Super Mini*. GitHub.
<https://github.com/sidharthmohannair/Tutorial-ESP32-C3-Super-Mini>
- Vishay. *IRLZ44 Power MOSFET*. Vishay.com.
<https://www.vishay.com/docs/91328/irlz44.pdf>
- MagicDuino. *MT3608 2A Max DC-DC Step Up Power Module Booster Power Module*. Components101.com
https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/MT3608-Step-Up-Power-Module-Datasheet.pdf
- Roithner LaserTechnik. *GUVA-S12SD*. Adafruit
<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/1918guva.pdf>
- ESA Education. (2018). *Teach with space, conçois ton parachute* [Support de Cours]. European Space Agency / ESERO France / CNES / Planète Sciences.
https://esero.fr/wp-content/uploads/2020/12/T10_Concois_ton_Parachute_ESEROFr.pdf
- Chutes.nl. *Parachute design for CanSat*. Chutes.nl
<https://chutes.nl/Readers/Cansat%20parachute%20design%20template.pdf>



ESO
ESTACA SPACE ODYSSEY