

DOSSIER DE CLOTURE
FX08
BERTHA & ODDS
2018-2023

Abstract

Ce document constitue le dossier de clôture du projet Bertha et de son expérience ODDS. Le lancement a eu lieu lors de la campagne du C'Space 2023, le mardi 17 juillet, mettant en œuvre un Pro98 6G XL Red Lightning.



Table des matières

Remerciements	3
1. Introduction.....	4
2. Description mécanique.....	5
3. Description électronique et informatique	9
4. Expérience : ODDS.....	12
4.1. Principe de fonctionnement	13
4.2. Calibration de l'expérience	13
4.3. Calibration de l'IMU.....	15
4.4. Post-traitement des images	17
4.4.1. Détection des pellets	17
4.4.2. Association stéréoscopique	17
4.4.3. Triangulation des pellets.....	18
5. Déroulement du vol.....	19
6. Résultats.....	21
7. Conclusion	22

REMERCIEMENTS

L'équipe du projet Bertha-ODDS tient à remercier de nombreuses personnes sans qui le projet n'aurait pas pu voir le jour.

L'équipe souhaite remercier le professeur Emmanuel Mangin, Franck Faux ainsi que tous les permanents de l'école ESTACA qui ont participé et soutenu le projet durant toutes ces années.

L'équipe souhaite également remercier les membres de Planète Science et du CNES pour leur accompagnement ainsi que leur soutien durant toutes ces années et la campagne du C'Space avec une pensée particulière pour Flavien Denis et Thomas Guérin qui ont suivi, contrôlé, et qualifié la fusée, ainsi que les pyrotechniciens du CNES Nicolas Verdier et Thierry Stillace qui l'ont mise en oeuvre. Également, un grand merci à Anthony Gautier et tous les photographes ayant immortalisés ce moment.

Finalement, l'équipe remercie ses membres ainsi que l'ESO pour le soutien et la participation au projet durant plus de 5 ans.

1. INTRODUCTION

Le projet Bertha et ODDS est le regroupement de deux projets qui ont été menés dans un premier temps séparément au sein de l'ESO (ESTACA Space Odyssey), l'association spatiale de l'école d'ingénieurs ESTACA.

L'idée du projet ODDS a été développée dans le contexte de l'importance croissante de la lutte contre l'accumulation des débris spatiaux en orbite. En effet, de plus en plus de débris sont présents sur les orbites basses les plus convoitées comme notamment celle de l'ISS, ce qui engendre des problèmes de sûreté des orbites pour les opérateurs. Ainsi, de nombreux projets ont vu le jour pour permettre de pallier cette accumulation en détectant puis en désorbitant des débris.

ODDS signifie alors Optical Debris Detection System et a pour objectif principal de repérer les débris dans son environnement. Le projet ODDS a débuté en 2017 dans le cadre d'un Projet PIRATE (Projet d'Initiation à la Recherche Appliquée en Travail Encadré au sein de l'ESTACA. Il a été par la même occasion engagé en tant que projet de recherche au sein de l'ESO. L'objectif initial de ce projet était donc de fabriquer un module démonstrateur permettant de détecter des petits objets assimilés à des débris en orbite.

L'idée de la fusée Bertha comme vecteur de l'expérience ODDS est apparue en 2018 après que ce dernier ne fut pas sélectionné pour un vol sur les fusées sondes du programme Rexus. Etant donné les dimensions et caractéristiques de ODDS, l'utilisation d'un Pro98-6G semblait inévitable pour pouvoir propulser une fusée aux dimensions et à la masse correspondantes.

Notamment par son développement hors norme dans le cadre du C'Space, ce projet s'est étalé sur 5 années durant lesquelles plus d'une cinquantaine de membres se sont succédés. Pendant les premières phases de conception, l'équipe (d'environ 40 personnes) était répartie en 5 pôles chacun dirigé par un responsable :

- **Etage charge utile**, responsable de l'intégration de ODDS dans la fusée et du fonctionnel associé à l'ouverture de la coiffe et à l'éjection du module.
- **Etage récupération**, responsable de la récupération de la fusée à tous points de vue (parachute, mécanique, électronique, etc).
- **Etage propulsion**, responsable de l'intégration, du guidage et maintien du propulseur ainsi que des ailerons.
- **Structure et moyens sols**, responsable de la structure des étages (peaux, coiffe, bagues, etc) ainsi que des moyens sols associés à la fusée (support, transport, stockage, moyens de tests, rampe, etc).
- **Expérience (équipe ODDS)**, responsable du développement complet de ODDS (expérience, électronique et mécanique de récupération, parachute).

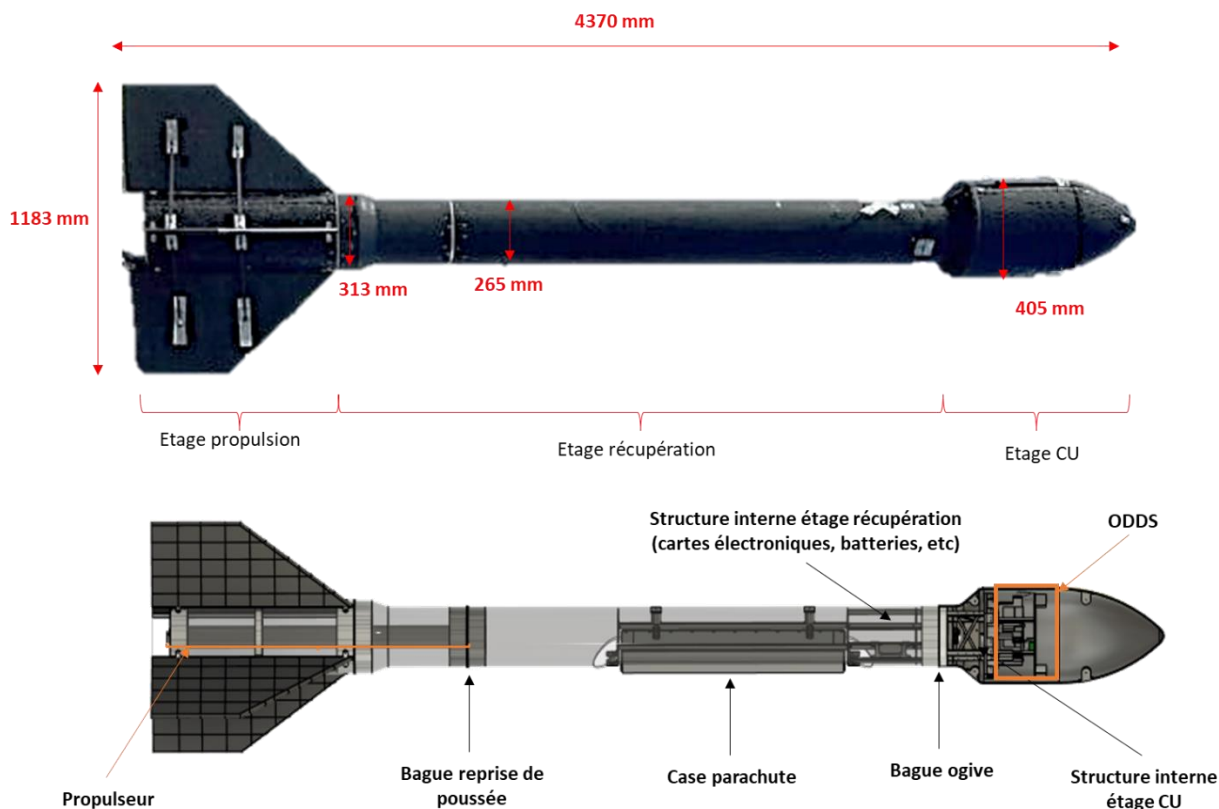
L'ensemble de ces équipes était également sous la supervision d'un responsable ingénierie système.

2. DESCRIPTION MECANIQUE

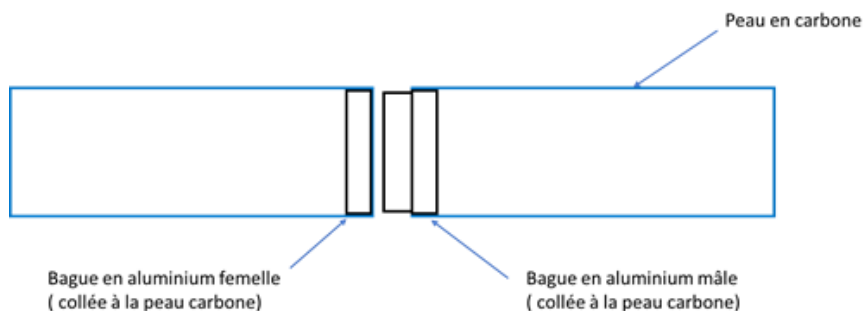
Bertha est une fusée expérimentale monoétage composée de 3 ensembles principaux :

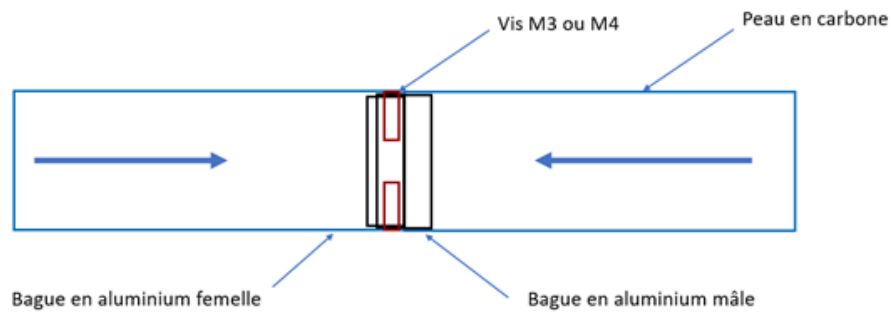
- L'étage propulsion,
- L'étage récupération,
- L'étage charge utile.

Elle pèse 51,2 kg à vide pour une longueur totale de 4,37 m.

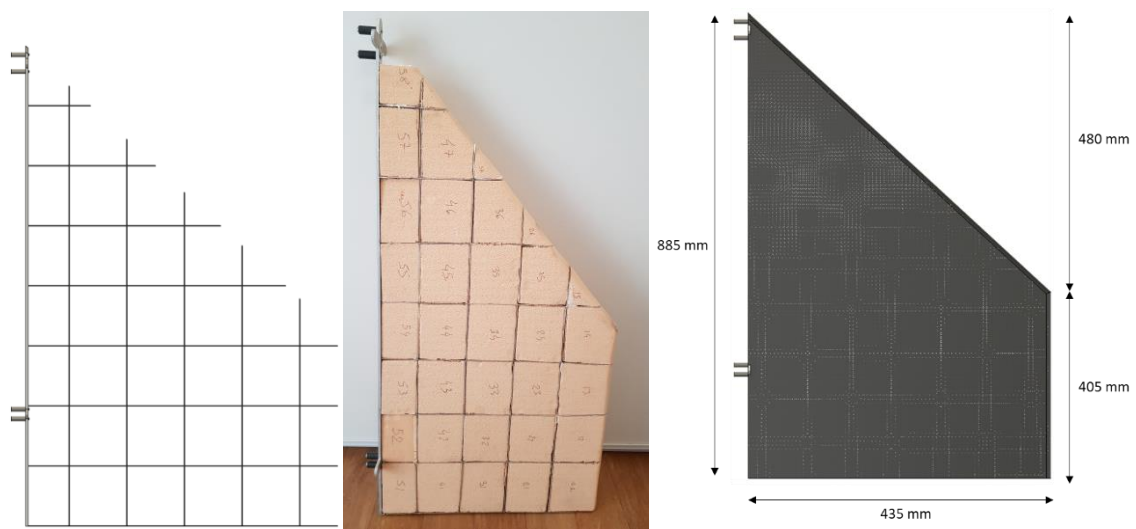


Les trois étages ont des diamètres différents ce qui implique la fabrication de retraits entre les différents étages. L'étage propulsion est fabriqué en composite sandwich à base de fibre de carbone et de mousse Airex, tout comme l'étage récupération et le changement de diamètre entre ces deux étages. La coiffe, quant à elle, est fabriquée en sandwich à base de fibre de verre et de mousse Airex également. Toutes les peaux sont porteuses et reliées par un système de bagues en aluminium mâle/femelle comme présenté sur les figures suivantes :

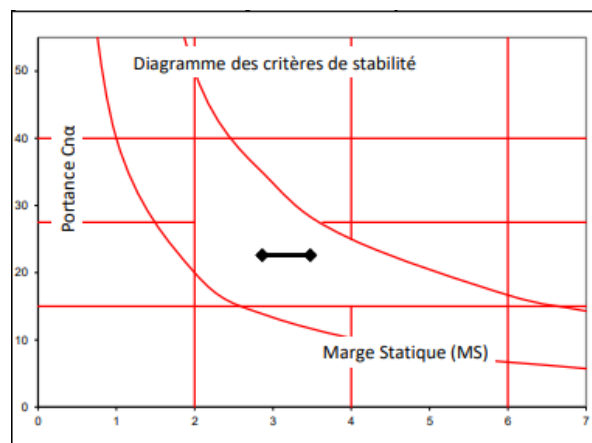




Les ailerons sont fabriqués à partir d'une structure grillagée interne en aluminium dont les interstices ont été comblés par des blocs de mousse. Enfin le tout est recouvert de fibre de carbone.



Ils ont été dimensionnés à partir d'un diamètre de référence spécifique différent du diamètre de référence habituel qui est le diamètre à la base de l'ogive. Avec ces dimensions, le gradient de portance était de 22,6 et la marge statique comprise entre 2,86 et 3,48 garantissant un domaine de stabilité idéal.



Les ailerons sont assemblés à la structure de l'étage propulsion par quatre pions en acier qui traversent peau et bagues pour être repris sur des ergots internes, eux aussi en acier. Des vis viennent également aider à la mise en position et au maintien des ailerons sur la structure.

Le propulseur est guidé et maintenu par un ensemble de bagues internes en PLA et aluminium. La reprise de poussée est effectuée sur une bague en aluminium à la base de l'étage récupération.



Le système de récupération de Bertha est intégré au sein de l'étage du même nom. Une structure interne ainsi qu'une case en composite sandwich fibre de verre/liège sont intégrés à l'intérieur de la structure pour y loger le parachute ainsi que la minuterie d'éjection. L'éjection du parachute est latérale par l'ouverture d'une trappe. Cette dernière est retenue par trois ventouses magnétiques qui sont séparés par une minuterie analogique. Un ressort vient donner la première impulsion pour l'éjection de la trappe qui va entraîner le parachute à l'extérieur.

Le parachute est une croix de 10,95 m². Les pourtours et les coins ont été renforcés avec de la sangle noire cousue de part et d'autre de la toile. La toile est une voile maritime.



Figure 1: Parachute de Bertha (le spécimen allongé fait environ 1m80)

Le maintien et l'ouverture de l'ogive est réalisé à l'aide de 5 ventouses magnétiques contrôlées par une minuterie analogique (similaire à celle de la récupération). Ces électroaimants sont situés sur le pourtour de la coiffe, intégrés dans des supports imprimés en PLA et collés/vissés dans la coiffe. Par ailleurs, des pièces de guidage ont également été installées sur le pourtour de la coiffe pour aider à l'alignement des ventouses. ODDS et les différents éléments électroniques sont positionnés sur une structure interne en aluminium (présente sur le fond de la coiffe sur les photos suivantes).

Lors de l'ouverture, un ressort situé en bout de coiffe permet d'initier le mouvement de celles-ci. L'engouffrement de l'air va alors venir faire pivoter les coiffes qui sont montées sur charnière et ainsi tendre un boudier situé sous ODDS pour le catapulter.



3. DESCRIPTION ELECTRONIQUE ET INFORMATIQUE



L'électronique embarquée du projet Bertha est un ensemble de minuteriers analogiques indépendantes contrôlant les différents systèmes de récupération et d'éjection de l'expérience. Au total, 3 minuteriers ont été lancés :

- La minuterie de récupération de la fusée, qui contrôle les ventouses de la trappe parachute et permettant son éjection à l'apogée.
- La minuterie d'éjection de l'expérience, celle-ci contrôle les ventouses de la coiffe de la fusée qui permettent l'ouverture et le catapultage d'ODDS.
- La minuterie de récupération de l'expérience, qui contrôle le fil chaud permettant l'éjection du parachute d'ODDS.

La mesure de temps de ces minuteriers repose sur le chargement d'un condensateur et donc l'augmentation de la tension à ses bornes. Cette tension est comparée à une tension de référence prise aux bornes d'une résistance variable réglée selon les dernières valeurs de temps du Stabtraj. Lorsque la tension condensateur dépasse la tension REV, la dernière partie du circuit est alimentée.

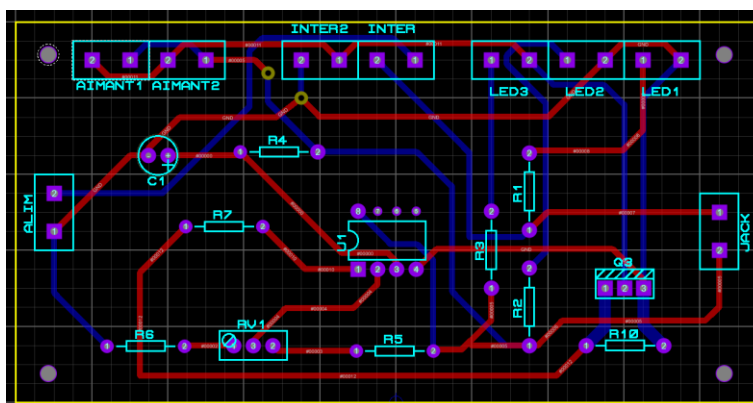
Le décollage de la fusée est détecté par l'arrachage d'un jack relié à la rampe de lancement par un câble. Cette prise jack est utilisée comme interrupteur, en position ouverte lorsque le jack est inséré et se fermant pour mettre en tension la minuterie au moment du décollage.

Chacune des minuteriers peut être monitorée par 3 voyants lumineux visibles depuis l'extérieur de la fusée même lorsque celle-ci est en rampe et érigée :

- La première LED verte est allumée dès l'enclenchement de l'interrupteur et témoigne que l'alimentation du circuit est opérationnelle.
- La LED jaune s'allume à l'arrachage du jack et indique que la minuterie est en marche.
- Enfin lorsque le temps est écoulé, la LED rouge s'allume en même temps que le mécanisme associé à la minuterie est enclenché.

Les alimentations sont indépendantes et propres à chaque minuterie. Ainsi, chaque circuit utilise une lipo 3S 11.1V associée à son circuit de protection BMS.

Les composants électroniques des minuteriers sont soudés sur des circuits imprimés sur-mesure. Des borniers permettent de tirer des câbles depuis le circuit de contrôle vers les différents éléments du circuit (panneau de contrôle lumineux, jack, et système utile).



La minuterie d'ODDS présente une particularité en comparaison aux autres circuits de la fusée. En effet, le séquençage n'est pas donné directement par le circuit. Le fil chaud est dimensionné pour casser la corde retenant le parachute en 3 secondes, temps souhaité de chute libre du module. Ainsi, la minuterie sert en fait de sécurité et a pour fonction de couper l'alimentation de la résistance chauffante pour éviter tout risque de départ de feu. Ce circuit est obtenu à partir de la minuterie originale simplement en inversant les bornes du comparateur. Le système est alors enclenché dès l'arrachage du jack et désactivé une fois le condensateur chargé.

De plus la minuterie d'ODDS ne détecte pas le décollage de la fusée mais son catapultage hors de la coiffe. La solution technique est la même que pour Bertha, un jack est inséré sur le module le temps du vol et une corde fixée dans la fusée le débranche à la séparation de la charge utile.

Lors du vol la chronologie était la suivante :

- T-0s : décollage de Bertha
- T+13s : Ouverture coiffe et éjection ODDS
- T+15s : Ouverture trappe et déploiement parachute Bertha
- T+16s : Déploiement parachute ODDS
- T+19s : Arrêt du fil chaud d'ODDS

Après le vol, la corde du jack a été retrouvée rompue sur la rampe de lancement. Il est possible que le jack soit resté inséré dans la prise de la fusée sans lancer les minuteriers. Cependant, l'analyse des photos du lancement confirme sans aucun doute possible le bon fonctionnement de l'électronique embarquée de Bertha. Les LED jaunes qui témoignent du déclenchement des minuteriers récupération et coiffe sont parfaitement visibles et allumées. Sur une autre photo, le jack est visible, bloqué entre la prise et la peau de la fusée. Enfin, l'éjection du parachute d'ODDS est nominale déclenché à l'arrachage de son jack au moment de l'ouverture prématurée de la coiffe.



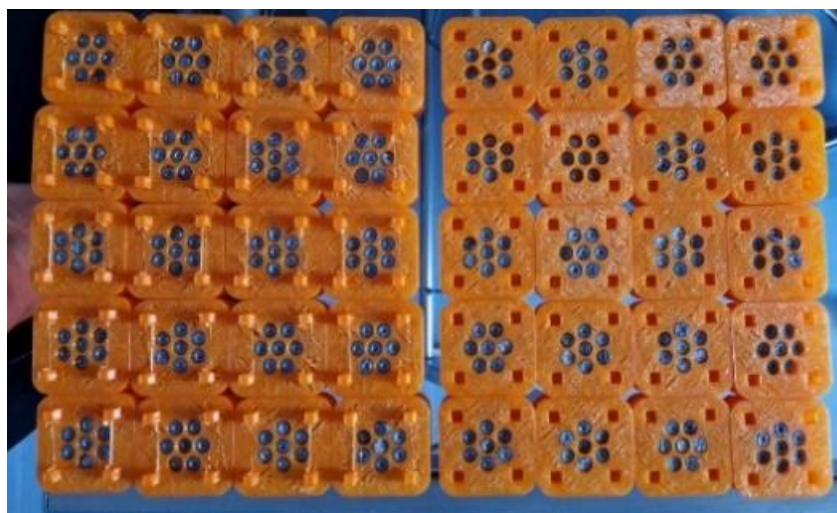
L'électronique a démontré par ailleurs une robustesse exceptionnelle. La carte électronique positionnée à la base de la coiffe, et donc exposée après l'ouverture prématurée de celle-ci, a été retrouvée intacte bien qu'enfoncée dans le champ après un impact frontal au sol sous une fusée de 50kg et 4m de long. Après nettoyage, elle a été testée et reste fonctionnelle au timing initialement réglé.



4. EXPERIENCE : ODDS

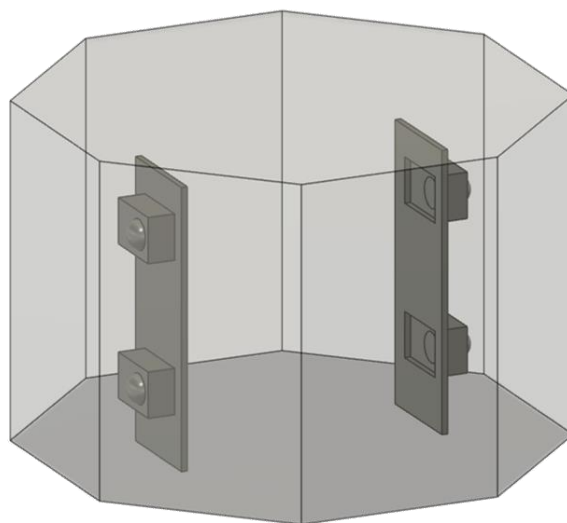
L'idée du projet ODDS (Optical Debris Detection System) a été développée dans le contexte de l'importance croissante de la lutte contre l'accumulation des débris spatiaux en orbite. En effet, de plus en plus de débris sont présents sur les orbites basses les plus convoitées comme notamment celle de l'ISS, ce qui engendre des problèmes de sûreté des orbites pour les opérateurs. Ainsi, de nombreux projets ont vu le jour pour permettre de pallier cette accumulation en détectant puis en désorbitant des débris. De plus, la majorité de ces débris sont de très petite taille ce qui rend leur détection depuis la Terre impossible. Il est donc nécessaire de les repérer et cartographier depuis l'espace.

ODDS se présente donc comme un démonstrateur de détecteur de débris. Dans le cadre du lancement au C'Space, l'objectif du module est de pouvoir identifier des pellets, objets assimilés à des débris spatiaux, lors d'une phase de chute libre, 20 pellets étaient intégrés à la coiffe. L'identification signifie ici de pouvoir détecter les objets et d'en déterminer leurs positions, à minima par rapport au module lui-même. Enfin, la connaissance des différentes distances des pellets détectés par rapport à ODDS permet de réaliser une cartographie des débris autour du module pendant la phase de détection prévue.



4.1. Principe de fonctionnement

La détection des pellets s'effectue premièrement par la prise de vidéos par quatre caméras intégrées par paires dans le module. Placées dans un même plan, l'une au-dessus de l'autre, les deux caméras d'une même paire sont ensuite utilisées pour faire de la stéréoscopie. Ainsi, le module est équipé de deux paires de caméras sur deux de ses phases opposées.



Les images de chaque caméra sont traitées par un programme informatique de manière à identifier les pellets vus durant la chute. Ensuite les images sont comparées par paire de caméra pour faire correspondre les pellets observés. Une fois les associations de pellets réalisées, leur distance par rapport au module peuvent être déterminées. Enfin, à partir des distances mesurées sur chaque image, les positions des pellets sont retracées dans l'espace en fonction du temps.

Le fonctionnement de ces deux programmes est détaillé dans la suite du document.

Par ailleurs, ODDS intègre une centrale inertielle qui permet également d'établir la position des pellets et du module dans l'espace par rapport au repère terrestre.

4.2. Calibration de l'expérience

Comme introduit précédemment, le fonctionnement de l'expérience repose sur le fait que les paires de caméras sont dans un même plan avec seulement un décalage vertical. En plus de ce positionnement, et de la connaissance de cette distance entre les deux objectifs, un ensemble d'éléments permet de définir la précision de l'expérience et de calibrer les images pour permettre leurs études :

- **La résolution des images.** Celle-ci est définie à 720 pixels et 120 FPS. Cette résolution a été choisie pour garantir une autonomie de stockage et batterie suffisante en plus d'un nombre d'images considéré suffisant pour le temps de chute libre.
- **Synchronisation des images.** La stéréoscopie demande la meilleure synchronisation possible entre les caméras d'une paire. Nous avons à notre disposition des caméras dites "action cam" donc synchroniser l'exposition des prises de vue directement n'était pas possible. Nous avons donc utilisé des leds visibles par toutes les caméras qui clignotent en même temps. Cette synchronisation n'est pas parfaite car elle est à l'image près. Toutefois, avec 120 images par seconde, la synchronisation est suffisante pour avoir des résultats précis (au décimètre). Dans le logiciel de post-traitement, cette synchronisation se fait en calculant la valeur médiane de la valeur du canal vert des pixels autour de la led de synchronisation.

- **Rectification des images.** Dans l'idéal les caméras doivent être parfaitement coplanaires pour pouvoir trianguler la position des pellets. Après intégration dans ODDS nous nous sommes rendu compte qu'il était difficile de réduire le désaxage des caméras, on a donc utilisé un algorithme de rectification. Pour rectifier les images nous avons besoin d'une matrice de transformation en translation et rotation du repère de la caméra du bas vers celle du haut. Pour l'obtenir nous utilisons une calibration à l'aide d'un damier d'une taille connue et le plus plat possible. Grâce à plusieurs images de ce damier prises à plusieurs endroits pour couvrir l'entièreté des deux capteurs, nous pouvons déterminer les matrices de transformation ainsi que des matrices de correction des aberrations de l'objectif de chaque caméra. Cette calibration est effectuée avant le vol (ou avant chaque essai).



4.3. Calibration de l'IMU

Une centrale inertielle est intégrée au module pour connaître, à minima, son attitude lors de la chute libre. De cette manière, l'orientation du module et donc la position des pellets peut être retracée avec plus d'informations que simplement les pellets par rapport aux caméras. Par ailleurs, les données d'accélération linéaires permettent également de retracer la position du module et donc celles des pellets par rapport au repère Terre.

La centrale inertielle choisie est une BO055 permettant d'obtenir les données grâce à un accéléromètre trois axes, un magnétomètre et un gyromètre trois axes.

La centrale doit être calibrée de la manière suivante pour traiter les données :

- Maintenir le module posé sur une surface plane pour calibrer les gyromètres,
- Réaliser des mouvements en 8 pour calibrer les magnétomètres,
- Maintenir le module à 45° par rapport à l'axe Z (suivant la hauteur du module), fixe pendant au moins 2 secondes sur une face, puis changer pour une face à 90° de la première et ainsi de suite jusqu'à la fin de la calibration globale,
- Si la calibration n'est pas complète, il faut continuer la manipulation jusqu'à ce qu'elle fonctionne.

Les différentes étapes de calibration sont suivies grâce à un système de LED clignotantes ou fixes (selon l'état : non calibré - en cours de calibration - calibré) avec des couleurs spécifiques :

- Vert pour les accéléromètres,
- Orange pour les gyromètres,
- Rouge pour le magnétomètre,
- Blanc pour le système complet.

Après plusieurs essais d'enregistrement et de post-traitement des données brutes par des filtres classiques (filtre complémentaire, puis filtre de Kalman), il a été décidé d'utiliser l'algorithme de filtrage propriétaire du constructeur du BNO055, et accessible depuis la bibliothèque arduino. La carte IMU commande également l'allumage des LEDs de synchronisation des caméras servant à détecter les pellets. Ainsi, les données d'attitude (quaternion d'attitude), les données brutes d'accélération, et l'état des LEDs de synchronisation sont enregistrées sur une carte SD.

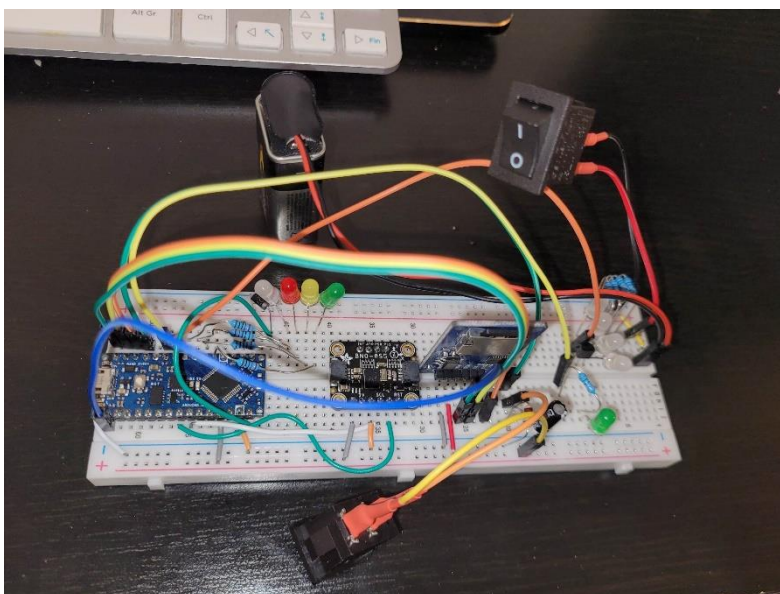


Figure 2 : Circuit IMU en prototypage

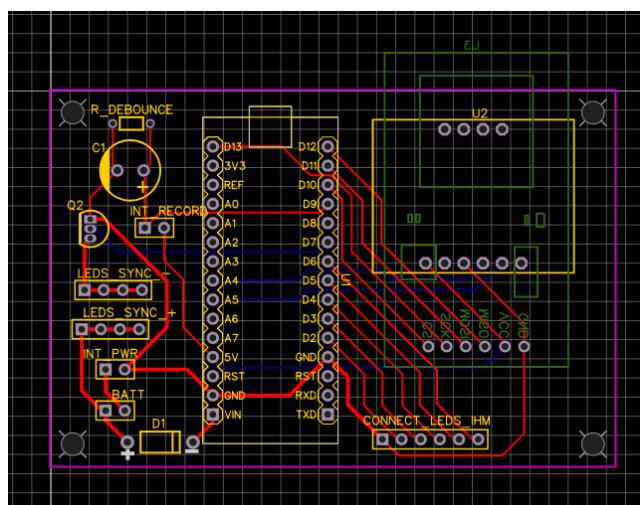


Figure 3 : Schéma du PCB



Figure 4 : Carte interface intégrée dans ODDS

4.4. Post-traitement des images

Le post-traitement est fait principalement avec la librairie *opencv* programmée en Python. Une fois que les vidéos sont récupérées, il y a différentes étapes de traitement des images considérant les calibrations décrites précédemment.

Cette partie décrit ces étapes.

NB: Dans ce texte nous parlerons toujours du repère de la caméra du haut (axe Z) comme étant l'origine des repères et la caméra de référence.

4.4.1. Détection des pellets

Les techniques traditionnelles de stéréoscopie reposent sur de la détection de similarité entre les pixels des deux caméras. Cette technique est sujette à beaucoup d'imprécisions et n'est pas performante pour les petits objets. Nous avons donc décidé de détecter les pellets sur chacune des images à l'aide d'une intelligence artificielle basée sur le modèle YoloV8. L'intelligence artificielle a été entraînée avec 200 images de pellets dans des situations similaires au vol.

4.4.2. Association stéréoscopique

Un des principaux défis de la stéréoscopie est le "matching" des objets d'une image avec l'autre. En effet, l'intelligence artificielle nous donne les coordonnées des pellets sur chaque image mais pour trianguler la position d'un pellet associer ces coordonnées sur une image avec celles sur l'autre image.

De plus, il peut y avoir des "faux positifs" ou des "faux négatifs" sur chaque image (des détections erronées), donc le nombre de détections sur l'image de la caméra haute n'est peut-être pas le même que sur l'image de la caméra basse. Il ne faut donc pas faire correspondre une mauvaise détection avec une bonne au risque de décaler toutes les autres correspondances.

Notre algorithme d'association se base sur le fait qu'un objet vu d'en haut sera forcément plus bas que le même objet vu avec la caméra basse.

Également, les deux vues des pellets doivent avoir les mêmes coordonnées x (selon l'horizontale) car les deux caméras sont décalées seulement verticalement.

Voici une description de cet algorithme :

Le "match" d'un pellet étant son pellet associé sur l'autre image. Un pellet invalide est un pellet qui n'arrive pas à trouver son image sur l'autre image, c'est donc sûrement un "faux positif".

Pour chaque pellet vue d'en haut (pellet_H):

 Pour chaque pellet vue d'en bas (pellet_B):

 Si le pellet_H est plus bas que le pellet_B et qu'ils ont une distance horizontale raisonnable (dans l'incertitude de la rectification):

 Si le pellet_B n'a pas de match:

 On associe le pellet_H avec le pellet_B

 Sinon, Si la distance horizontale entre le match du pellet_B et du pellet_H est plus grande qu'entre le pellet_H et le pellet_B:

 On associe le pellet_H avec le pellet_B

 On déclare l'ancien match de le pellet_B comme invalide*

Si après avoir essayée de s'associer avec tous les pellet_B, le pellet_H n'a toujours pas trouvé de match, on le marque comme invalide

* Sachant qu'un pellet_H ne match qu'avec le pellet_B valide le plus proche horizontalement de lui, si son pellet_B trouve un meilleur match, ça veut dire que ce pellet_H ne peut pas avoir de match valide. Il est donc invalide.

4.4.3. Triangulation des pellets

Après avoir récupéré les coordonnées x et y en pixel de chaque pellet et identifié les couples de pellets entre les deux images il nous reste à trianguler leur position.

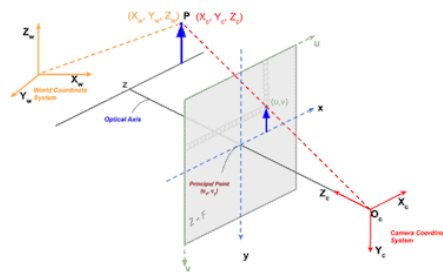
Pour obtenir de meilleurs résultats, nous avons observé qu'il est préférable de laisser l'algorithme de triangulation faire la rectification des images plutôt que de donner à cet algorithme des coordonnées déjà rectifiées et lui dire que les caméras sont parfaitement coplanaires. Nous appliquons néanmoins une correction de distorsion de la lentille.

Pour trianguler la position des pellets nous avons d'abord besoin d'une matrice de projection qui va faire correspondre des coordonnées en pixels sur une image à des coordonnées physiques.

Pour construire cette matrice de projection on multiplie la matrice caméra (celles qui contiennent la distance focale et le centre optique) par la concaténation de la matrice de transformation en rotation et translation. La matrice de translation de la caméra du haut étant nulle et sa matrice de rotation étant l'identité.

Nous utilisons ensuite la fonction opencv "triangulatePoints" à laquelle on donne les coordonnées x et y d'un pellet sur les 2 images ainsi que les matrices de projection des deux caméras. Cette fonction utilise l'algorithme "DLT" (Direct Linear Transform) pour trianguler les points.

Les coordonnées renvoyées sont dans le référentiel de la caméra du haut.



5. DEROULEMENT DU VOL

Le vol a eu lieu le mardi 18 juillet 2023 à 15h30. Un premier rouge météo à cause du vent a été annoncé pendant la chronologie au moment de l'haubanage. Le vent s'est ensuite calmé, autorisant le vol. Par ailleurs, le temps était globalement nuageux avec une couverture estimée à environ 1km d'altitude.

Lors du vol, la coiffe s'est ouverte plus tôt que prévue dans notre chronologie ; lors de la phase propulsée (alors que cela était prévu quelques secondes avant l'apogée). Cette ouverture intempestive des coiffes semble due au vent qui se serait infiltré à l'intérieur malgré la présence d'un joint bloquant les entrées d'air et/ou à la rupture d'une des demi-coiffe au niveau du changement de diamètre (voir séquence image par image ci-dessous). A noter que la partie collée du joint n'était pas dans la bonne direction par rapport au vent (on le voyait se soulever lorsque Bertha était en rampe). Les coiffes se sont alors arrachées et ont éjectées prématurément ODDS et les pellets.

Par la suite, la trappe du parachute de Bertha s'est également ouverte trop tôt dans la chronologie, libérant le parachute de la fusée en phase propulsée. Cette ouverture est difficile à expliquer mais elle pourrait être due à un choc mécanique qui aurait pu contraindre ou désactiver les ventouses de la trappe. Le parachute est ensuite allé se loger dans le feu du propulseur, le consommant quasiment entièrement en une fraction de seconde.

La fusée est restée stable durant toutes les phases de vol, notamment avec ou sans la coiffe.

Par ailleurs, les pellets ont bien été dispersés autour de ODDS, dont le parachute s'est déployé comme prévu après quelques secondes de chute libre. En revanche, il a dérivé à cause du vent vers la forêt proche des rampes fusex. Le module ODDS a été retrouvé dans la forêt mais il est accroché à la cime d'un arbre et est donc hors de portée. A ce jour, une aide a été demandée aux officiers du camp militaire afin de faire venir un élagueur et descendre le module. Toutefois, due aux vacances du mois d'août, cette récupération n'a pas encore eu lieu à ce jour (29/08/2023).





6. RESULTATS

La fusée emportait une caméra dans sa coiffe qui devait filmer l'éjection de ODDS. Toutefois, à la suite de la destruction de la coiffe lors de l'atterrissage la caméra a été détruite et les données ne sont pas exploitables.

Quant au module, comme expliqué dans la partie précédente, l'éjection de ODDS ainsi que des pellets a été réussie. Nous pensons donc que de nombreuses données sont exploitables dans les caméras et dans la centrale inertielle.

Toutefois, nous n'avons toujours pas pu récupérer le module et nous ne savons pas si l'électronique a pu supporter les conditions climatiques potentiellement pluvieuses depuis le vol.

Le module sera récupéré au plus tôt et un rapport secondaire sera transmis sur SCAE si les données sont exploitables.

Il est néanmoins nécessaire de rappeler que ce projet a permis d'acquérir de nombreuses compétences nouvelles au sein de l'ESO. En effet, nous avons dû développer de nouveaux procédés et utiliser de nouveaux matériaux pour fabriquer cette fusée de grande taille. Ainsi, nous avons pu développer :

- De nouvelles méthodes de fabrication
 - Le sandwich fibre de verre – mousse
 - Le sandwich fibre de carbone – mousse
 - Le sandwich fibre de verre – liège
 - La fabrication de structures sous vide
- Des bagues permettant une meilleure tenue mécanique et à la fatigue liée aux assemblages/désassemblages successifs,
- Des ailerons profilés, avec une épaisseur conséquente dont les efforts à tenir étaient considérables,
- Des bancs et méthodes de tests permettant d'appliquer plusieurs centaines de Newton de force sur une structure,
- Les logiciels d'analyses en stéréoscopie basés sur de l'intelligence artificielle,
- Fabrication additive en plastique souple (TPU),
- Construction d'éléments de grande taille,

7. CONCLUSION

Bertha est une fusée expérimentale mettant en œuvre un Pro98 6G XL Red Lightning. C'est une fusée monoétage dont la masse et les dimensions générales la rendent hors normes et ont demandé à revoir la manière de concevoir, fabriquer et qualifier ce type de fusée. Une des particularités de Bertha est d'avoir une coiffe qui s'ouvre pour permettre l'éjection de l'expérience : ODDS.

ODDS est un module expérimental de détection de débris spatiaux. Equipé de deux paires de caméras, l'objectif de l'expérience est de cartographier lors d'une chute libre des objets largués (pellets) également au moment de l'ouverture de la coiffe. Le principe de fonctionnement repose sur la stéréoscopie d'une paire de caméra et d'un traitement d'image à posteriori grâce à une intelligence artificielle entraînée pour reconnaître ces pellets.

Ce projet a permis à l'ESO de gravir un échelon dans l'élaboration et la mise en œuvre d'une fusée de plus grandes dimensions. Par ailleurs, le projet ayant duré 5 ans, une importante prise de recul est possible sur la manière de concevoir et de gérer un projet de cette ampleur. De plus, Bertha été également l'occasion d'expérimenter de nouvelles techniques de fabrication avec notamment la mise en place de bagues collées ou la fabrication de peaux en composite sandwich sous vide.

Parmi tout ce retour d'expérience, de nombreuses choses pourraient être améliorables et principalement le fait d'aller plus à l'essentiel dans la conception, garder un esprit de pragmatisme et d'efficacité dans la conception pour faciliter la fabrication et l'assemblage.

Nouvelle idée d'expérience pour l'année prochaine : Bertha optimisée ?