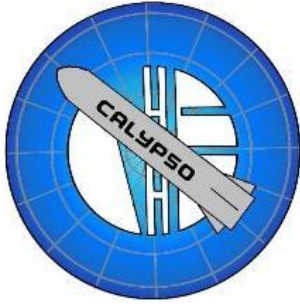




Rapport Final – Calypso

(Minifusée 2019-2021)

Projet réalisé par Agathe Gernez, Diego Norena, Jonathan Ménétrier, Florian Brunet, Fanny Cottave, Paul Chambon, Pierre Segonds, Florian Kissel membres du club ESP (Ensm Space Project) de l'ISAE-ENSMA



Figure 1 – Calypso quitte la rampe de lancement

Le projet de mini-fusée Calypso a débuté en octobre 2019. L'expérience retenue pour Calypso se décompose en deux sous-expériences indissociables l'une de l'autre. Le premier objectif consiste à l'éjection du parachute de la mini-fusée par la coiffe. La seconde expérience, dépendante de la première, est le déploiement de pieds pour permettre à la fusée d'atterrir à la verticale. Afin d'avoir des informations supplémentaires lors du vol de la fusée, des capteurs doivent être ajoutés à la mini-fusée.

L'équipe

En 2019-2020, l'équipe était composée de dix étudiants de l'ISAE-ENSMA (5 A1 et 5 A2). Le projet ayant été repris pour l'année 2020-2021, l'équipe est désormais composée de huit étudiants appartenant aux trois promotions de l'école (3 A1, 2 A2 et 3 A3). Le travail pour la conception de Calypso a été décomposée en quatre pôles :

- Le pôle structure : responsable du dimensionnement de la fusée, des choix techniques de conception de la structure de la fusée.
- Le pôle pieds : responsable du système consacré au déploiement des pieds.
- Le pôle coiffe : responsable du système d'éjection du parachute et de la coiffe, ainsi que le dimensionnement du parachute.
- Le pôle électronique : responsable de la programmation Arduino nécessaire à notre expérience, et de l'électronique au sein de la fusée.

Motivation du projet et COVID-19

Le projet a été initié en octobre 2019 et validé par Planètes Sciences pour participer au C'Space de 2020. Malheureusement, en raison de la crise sanitaire, l'école a été fermée de mars à septembre 2020 et le C'Space de cette même année a été annulé. Ainsi, une équipe, partiellement renouvelée, a repris le projet pour cette fois un lancement lors du C'Space 2021.

Description mécanique

Structure

La structure de Calypso est en mode structure interne porteuse. Cette structure est réalisée à l'aide de deux tiges en aluminium qui maintiennent les bagues à l'emplacement prévu. Les bagues de poussée, de centrage milieu et de centrage haut du propulseur, ainsi que les ailerons ont été usinés par l'école. La structure est ensuite glissée dans une peau en PVC qui est fixée aux bagues. Exceptées les bagues moteurs, l'ensemble des autres bagues ont été imprimées en 3D par nos soins. Un système de goupille avait été imaginé au départ pour retenir les ailerons. Toutefois, ce système était trop fragile pour assurer le maintien des ailerons lors des tests. Il a donc été choisi d'utiliser des petites équerres pour fixer les ailerons à une bague en bois située entre les bagues de poussée et centrage milieu.



Figure 2– Structure interne de Calypso

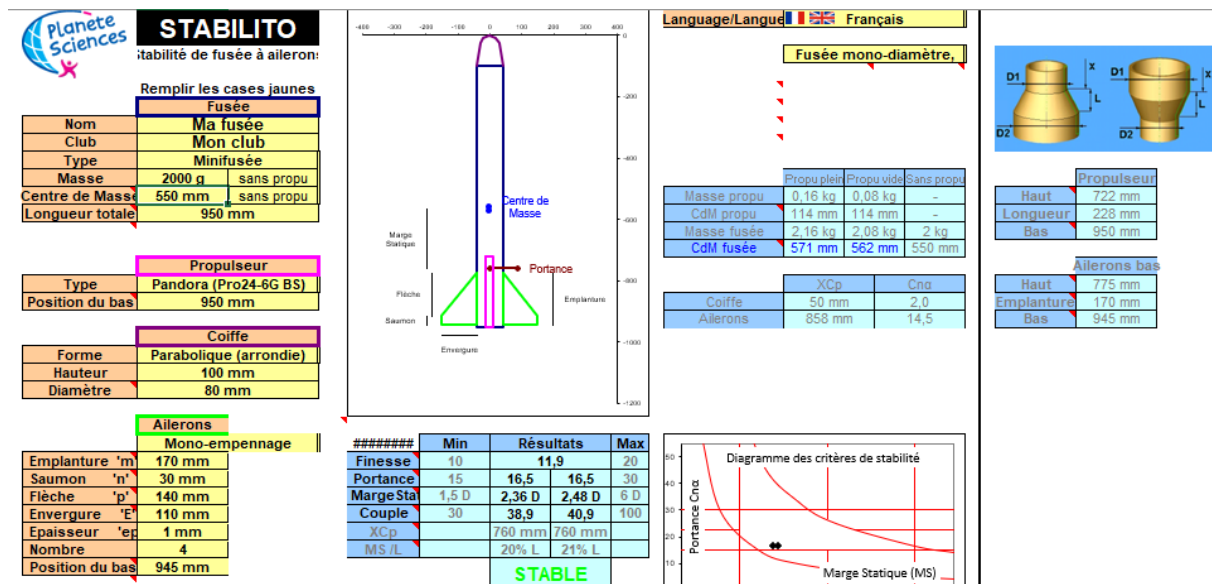


Figure 3 – Stabilité de Calypso

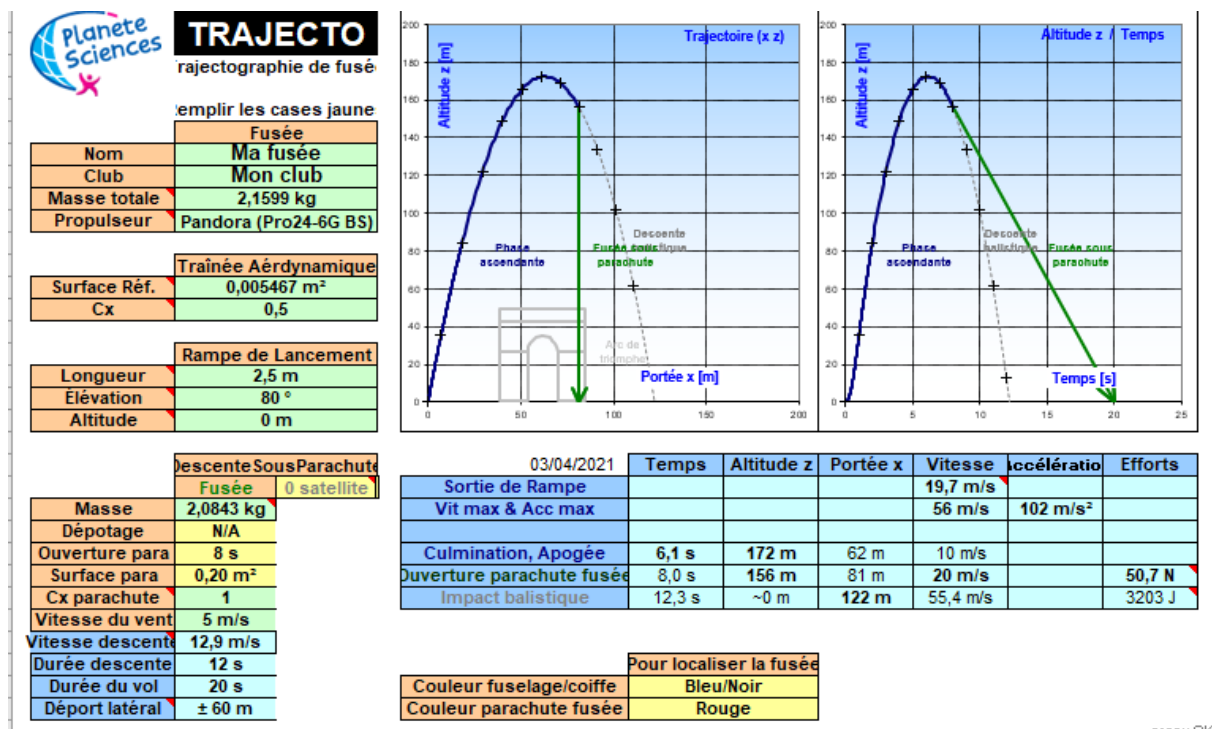


Figure 4– Trajectoire de Calypso

Les ailerons sont de forme triangulaire.

Le système de récupération est un parachute en croix de 21 cm de côté qui sort par la coiffe. Celui-ci était plié en accordéon dans la coiffe.

Des bagues imprimées en 3D soutiennent les éléments internes de la fusée tels que le servomoteur qui gère la libération des pieds, l'électronique et les batteries.

Éjection du parachute par la coiffe

Le système de récupération de Calypso a connu des évolutions tout au long de sa conception et fabrication. En effet, pour permettre un atterrissage vertical de la fusée, il est nécessaire d'éjecter le parachute par la coiffe de la fusée. La première solution retenue fut l'utilisation d'électroaimants permanents qui maintiennent la coiffe en position lors de la phase propulsive de la fusée. Pour cela, deux électroaimants sont insérés de part et d'autre d'une bague coiffe. Le parachute est inséré dans un tube au centre de la bague et est poussé vers l'extérieur à l'aide d'un piston et d'un ressort. Cette solution, bien qu'élégante, nous a posé quelques problèmes. En effet, de faibles vibrations entraînent un déséquilibre de la coiffe ce qui met à mal le système de récupération de Calypso. De plus, lors des RCE avec Planète Sciences, il nous a été déconseillé d'utiliser des électroaimants car une aimantation résiduelle pouvait subsister malgré l'alimentation de ces derniers et donc

empêcher l'ouverture du parachute. Il est donc préférable d'éviter un système avec électroaimants (permanent ou non) pour les prochaines mini-fusées.

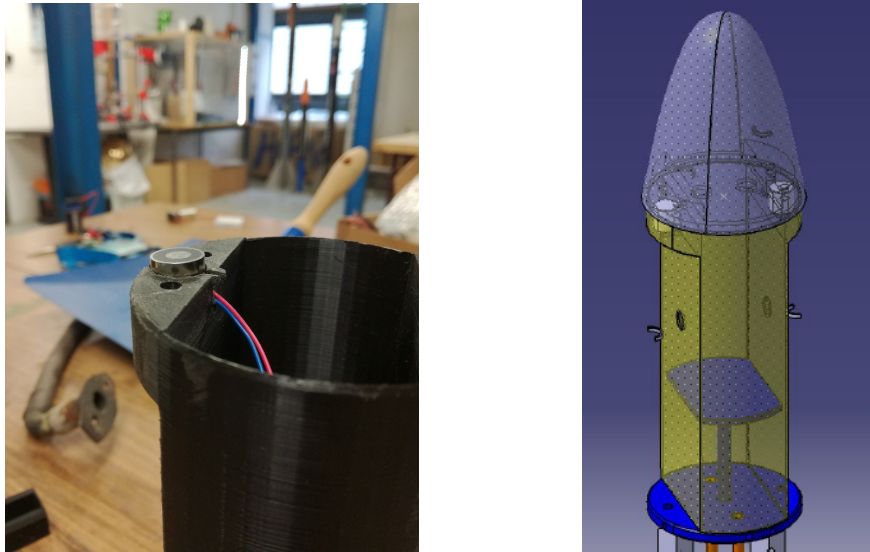


Figure 5 – Système d'éjection de la coiffe avec électroaimants

Afin de pallier ce problème, nous avons conçu un second système avec une nouvelle bague coiffe comportant un servomoteur. Ce servomoteur permet une rotation de la coiffe qui permet de libérer l'espace nécessaire à l'éjection du parachute. Ce système n'a tout de même pas été retenu car l'excentration de la coiffe lors de son ouverture était trop faible et donc l'espace pour le parachute trop étroit. Par ailleurs, trouver des ressorts aux bonnes propriétés pour l'éjection du parachute peut être difficile. Dans cette configuration, il y avait également un risque que les suspentes du parachute s'emmêlent avec le ressort pouvant empêcher l'ouverture correcte du parachute.

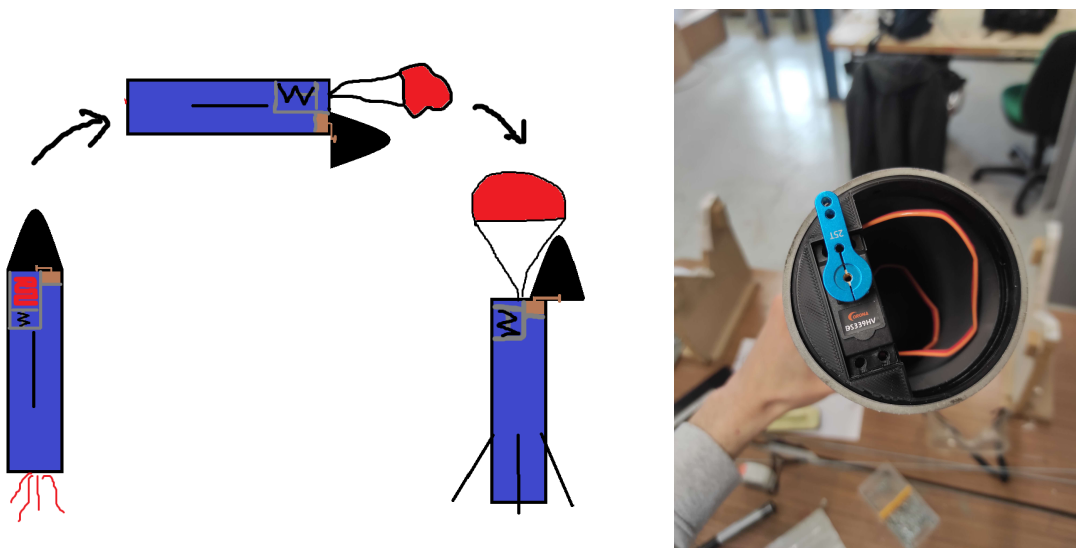


Figure 6 – Système d'éjection du parachute avec servomoteur

Finalement, le système retenu est un système entièrement réalisé en impression 3D. Un servomoteur entraîne un système bielle-manivelle, qui pousse un piston permettant la sortie

du parachute, et entraîne l'ouverture de la coiffe en deux parties. Le parachute est inséré principalement dans la coiffe.



Figure 7 – Système final retenu pour l'éjection du parachute par la coiffe

Ce système est cependant imparfait, du fait de l'impression de toutes les pièces en 3D les jeux mécaniques sont importants ce qui conduit à une ouverture possible de la coiffe de quelques millimètres quand le servomoteur est en position « coiffe fermée ». Pour pallier ce problème nous avons modifié la valeur du servomoteur lorsque la coiffe est fermée et nous avons replié sur lui-même un morceau de scotch dans la longueur ce qui forme une bande en partie adhésive sur une face. Nous avons alors collé cette bande sur une demi-coiffe, la partie non adhésive est alors au-dessus de l'autre demi-coiffe et lors du lancement le scotch est plaqué contre la coiffe ce qui bouche tout interstice entre les deux demi-coiffes.

Déploiement des pieds

Lors de la phase propulsive de la mini-fusée, les pieds sont repliés le long du corps. Ceux-ci sont maintenus grâce à une bague mobile, commandée en translation par un servomoteur linéaire. Pour empêcher les pieds de se replier sur eux-même, deux systèmes ont été étudiés. Le premier est l'utilisation d'un système roue à rochet et cliquet. Ce système a été abandonné car les pièces imprimées en 3D étaient trop petites et fragiles pour supporter les efforts s'exerçant sur les pieds à l'atterrissage. Le second est l'utilisation d'une bague à bascule bloquant les pieds une fois dépliés.

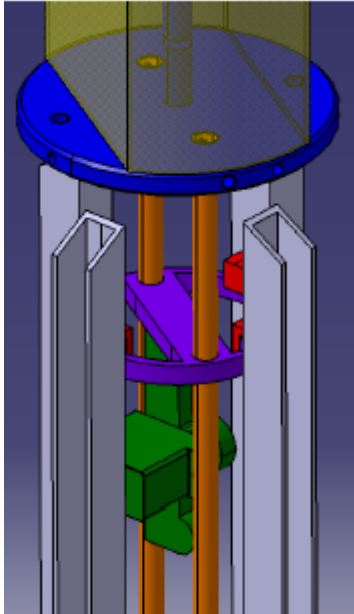


Figure 8 – Bague mobile + servomoteur



Figure 9 – Logement pieds + bague bascule

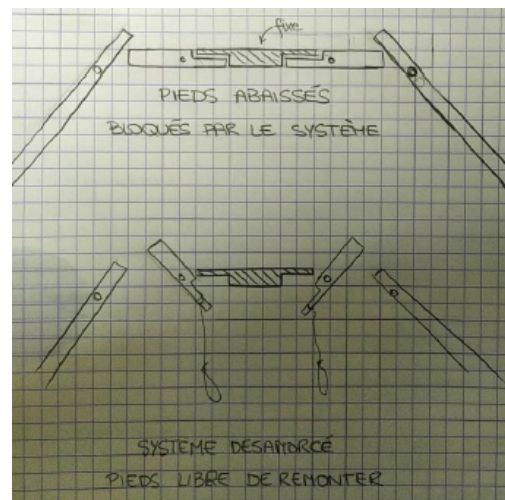
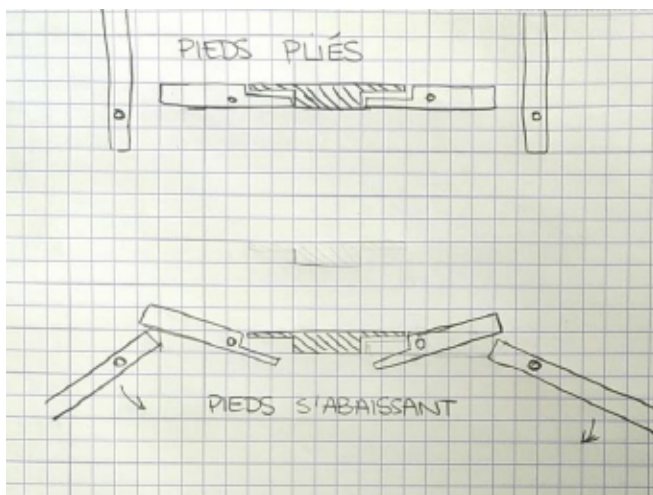


Figure 10 – Système bague bascule

Le système de blocage des pieds est imprimé en 3D mais nous n'avons pas réussi à trouver les bonnes formes et dimensions pour que le blocage soit efficace. Le montage de l'ensemble de la fusée avec ses 4 pieds s'est révélé très compliqué, en raison de nombreux jeux mécaniques, et du fait qu'une fois repliés, les pieds dépassent de la peau. Il a donc été décidé de lancer avec seulement 2 pieds.

Electronique

L'électronique de Calypso se compose de deux cartes Arduino Nano, l'une d'elle gère uniquement la centrale inertielle et l'enregistrement des données de la centrale sur une carte SD. Cette carte a été mise en place peu de temps avant le C'Space, et l'acquisition des données n'a pas pu être testée correctement. Un problème d'enregistrement des données sur la carte SD a été observé le matin du lancement, problème que nous n'avons pu

résoudre avant le vol. L'acquisition des données de vol n'a donc pas fonctionné. Pour les projets futurs, l'acquisition de données devra donc être testée et vérifiée largement en amont du C'space, pour garantir le bon fonctionnement le jour J. Ce problème est demeuré cependant sans gravité car il n'a pas impacté les fonctions essentielles au vol de la fusée, assurées par la seconde carte, indépendante électriquement et fonctionnellement de la première. L'autre carte gère donc la séquence de vol et les fonctions essentielles de la fusée, en commandant les deux servomoteurs (coiffe et pieds) ainsi que les LED, buzzer et le jack qui forment le système de gestion de vol (FMS) de la fusée.

La séquence de vol se déroule comme suit : sur la rampe de lancement, la led verte atteste que le système est sous tension, et la led rouge et le buzzer indiquent que le jack est branché. Au décollage, le jack est arraché et la séquence de lancement est initialisée. 6 secondes après le décollage, le servomoteur coiffe est commandé pour libérer le parachute. 2 secondes plus tard, le servomoteur pieds est commandé pour libérer les pieds en faisant translater la bague pieds.

L'alimentation électrique est assurée par deux piles 9V en parallèle, dont la tension est abaissée à 5v grâce à un régulateur linéaire de type 7850, avec deux condensateurs permettant de filtrer le signal pour limiter les variations de tension. L'alimentation est commune aux deux cartes, ainsi qu'aux servomoteurs. Il serait largement préférable dans un futur projet impliquant des moteurs, ou d'autres éléments pouvant provoquer des appels de courants importants (et pouvant provoquer une chute de tension), d'utiliser une alimentation indépendante pour ces éléments. On aurait ainsi pu ici dédier une pile à l'alimentation des arduinos et l'autre à l'alimentation des 2 servos, ce qui aurait limité les risques de chutes de tension d'entrée du régulateur et donc de perturbation de l'alimentation des arduinos.

(Note de rappel pour les futurs projets : Des erreurs (réinitialisation principalement) dans le fonctionnement des Arduinos peuvent survenir si leur tension d'entrée tombe en dessous de la tension d'alimentation nominale)

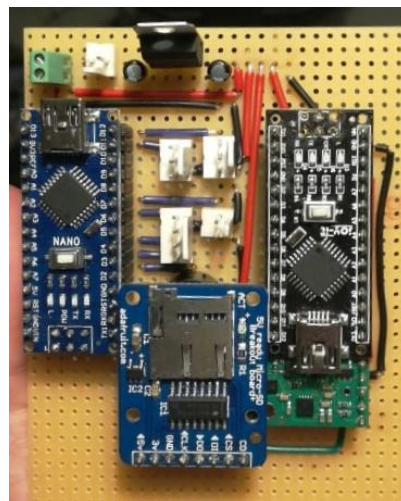


Figure 11 – Carte électronique de la fusée Calypso

Expérience

Calypso ne comporte pas d'expérience scientifique, son but est de tester une solution pour l'ouverture de parachute par la coiffe et le déploiement de pieds. L'expérience acquise avec cette mini-fusée pourrait permettre au club de concevoir dans un futur proche une Fusex mettant en œuvre un système de pied et de récupération par la coiffe.

C'Space 2021

Malgré les difficultés rencontrées lors de cette année, notamment en raison de la crise sanitaire, le C'Space 2021 a eu lieu et Calypso a été qualifiée pour être lancée. Le décollage a eu lieu le 17 juillet à 15H30 par beau temps et sans vent. Le vol fut nominal avec ouverture du parachute et atterrissage en douceur. Les deux pieds ont correctement été libérés mais ils n'ont pu se verrouiller à cause du vent relatif. La fusée a finalement atterri sur ses ailerons puis s'est couchée, une partie de la coiffe n'a pas résisté au choc avec le sol mais le reste de la fusée a pu être récupéré en bon état. Comme dit précédemment, l'acquisition des données de vol, expérience secondaire du projet, n'a pas fonctionné, une mesure précise d'altitude et de vitesse, n'a donc pu être réalisée.

Cependant, grâce à une vidéo prise durant le décollage il est possible d'estimer la vitesse ascensionnelle de la fusée par pointage vidéo, grâce à l'outil PyMecaVideo. A partir du pointage, on a obtenu des positions et on a pu tracer la vitesse de la fusée en fonction du temps, sur la première demi seconde suivant le décollage (la fusée sortait du cadre après 0,5s).

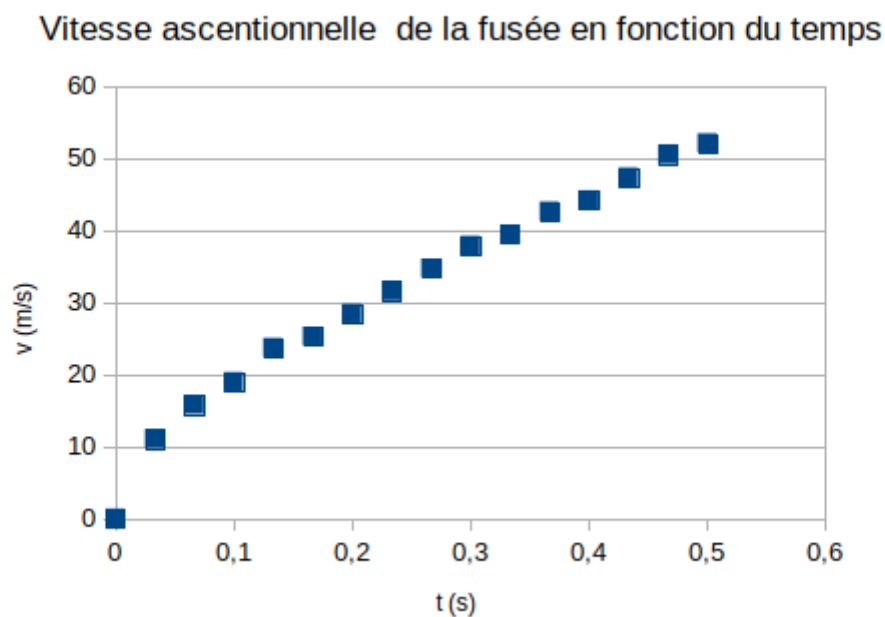


Figure 12 – Courbe donnant la vitesse ascensionnelle de Calypso

Ainsi, une demi seconde après le décollage, Calypso avait atteint une vitesse de 52 m/s, ce qui est proche de la vitesse maximale prévue par le StabTraj qui était de 56 m/s. En considérant l'accélération constante une fois "l'à-coup" du décollage passé, on peut linéariser la vitesse après 0,1 s, et estimer l'accélération moyenne de la fusée sur la période

allant de 0,1 à 0,5s. On trouve une accélération de $81,6 \text{ m/s}^2$ ce qui est inférieur à l'accélération maximale donnée par le StabTraj, qui était de 102 m/s^2 .

Si il aurait été intéressant de pouvoir comparer en profondeur le modèle donné par StabTraj et les mesures que nous aurions obtenues si les données de vol avaient pu être enregistrées, les quelques mesures, imprécises certes, pouvant être obtenues par pointage vidéo concordent plutôt bien avec le modèle donnée par StabTraj, ou du moins ne le contredisent pas.



Figure 13 – Descente et atterrissage de Calypso

Conclusion et remerciements

Ce projet a été une très bonne expérience pour l'ensemble de l'équipe. Malgré les nombreux problèmes rencontrés lors de la construction, des solutions ont à chaque fois été trouvées. La pandémie n'a pas facilité l'aboutissement du projet, mais grâce à des réunions en ligne et l'investissement d'un bon noyau, le projet a pu aboutir dans de bonnes conditions.

L'ensemble de l'équipe Calypso tient à remercier Mme Chocinski pour son encadrement, son soutien et ses conseils tout au long des deux années de travail. Par ailleurs, nous tenons à remercier M. Petit et M. De Geay pour leurs conseils et l'usinage de l'ensemble des pièces métalliques nécessaire à Calypso. Nous remercions également les clubs des autres écoles que nous avons croisé durant le C'space et qui nous ont aidé dans la dernière ligne droite de ce projet, un grand merci aussi à notre sponsor GO Tronic et à tous les bénévoles du C'space et de Planète Sciences.

Annexe 1 : Chronologie de préparation au lancement



Chronologie CALYPSO



Quand ?	Où ?	Qui ?	Quoi ?
T-60 min	Public	P1, P2	Arrivée sur l'aire de lancement.
T-45 min	Tante Club	P1	Dicte la chronologie à P2
		P2	Mettre l'interrupteur « Alimentation » sur Arrêt. Insérer pile neuve ou batterie.
		P2	Plier le parachute et fermer l'ogive.
		P1	Plier les pieds de la fusée
		P1	Prend un tournevis pour l'écrou frein, l'initialisateur et la fiche de contrôle
T-30 min	Zone Rampe	P1, P2, lanceur	Rejoindre la zone rampe.
T-20 min	Zone Rampe	P2 et lanceur	Mettre la fusée en rampe. Effectuer le test de compatibilité rampe.
		P1	Continuer à dicter la chronologie à P2.
		P2	Attacher l'initialisateur à la rampe, vérifier qu'il s'arrache facilement lors de la sortie de rampe de la fusée.
T-10 min	Pupitre	P1	Rejoindre le pupitre de lancement.
	Zone Rampe	Lanceur	Eriger la rampe à 80°.
		P2	Mettre en place l'initialisateur. Mettre l'interrupteur « Alimentation » sur Marche. Vérifier que la Led verte soit allumée. Vérification du buzzer. Attendre deux fois le temps de minuterie. Vérifier que la Led rouge soit éteinte. Laisser le tournevis au lanceur.
T-5 min	Pupitre	P1 et P2	Rejoindre le pupitre de lancement.
	Zone Rampe	Lanceur	Aller chercher le propulseur en zone de stockage. Mettre en place le propulseur. Mettre en place l'inflammateur.
T-2 min	Pupitre	Lanceur	Rejoindre le pupitre.
		P1 et P2	Ecouter les consignes de sécurité.
T-10 s		Lanceur	Décompte final
T		P1	Appuyer sur le bouton de mise à feu.