

CygHop, un projet étudiant de fusée expérimentale transsonique

Guillaume Araignon^{*1}, Louis Wu^{†1}, Yannick Tedeschi^{‡2}, Elise Martins Dos Santos[§] et Matthieu Thomas^{**2,3}

*Responsable projet et mécanique, †Responsable mécanique et intégration, ‡Responsable aérodynamique, §Responsable conception électronique,

**Responsable programmation

RÉSUMÉ CygHop est une fusée expérimentale étudiante d'environ 1,60 mètres de haut et propulsée à vitesse transsonique (Mach 0,75 - 0,8 environ).

L'expérience consiste à mesurer la vitesse à l'aide d'une centrale inertielle, qui sera associée à un cône aérodynamique (Aerospike) afin d'étudier ses effets minimiseurs de traînée.

La fusée a été lancée au mois de Juillet 2019 durant le C'Space, campagne nationale de lancements de fusées étudiantes organisée par Planète Sciences, le CNES et l'Armée de Terre.

Nous en profitons également pour remercier l'entreprise Apside Technologies, pour leur soutien financier sur toute la durée du projet.

MOT-CLÉS

Fusée
Aerospike
C'Space
Étudiant

UN PROJET D'AÉROIPSA

Depuis plus de 25 ans, AéroIpsa, association étudiante de l'école d'ingénieurs IPSA, conçoit et réalise des projets fonctionnels en rapport avec le secteur aérospatial. Elle rassemble des étudiants autour de projets, principalement de fusées, mais aussi de Cansats (charges utiles largables d'un litre). Cela leur permet d'appliquer les notions apprises durant leur cursus au profit d'un projet d'envergure et d'acquérir ainsi les compétences nécessaires dans leur futur métier d'ingénieur.

L'association a également pour objectif de transmettre des valeurs de partage de connaissances et d'idées entre étudiants quelle que soit leur promotion ou leurs compétences. Que ce soit en Mécanique ou en Electronique, les nouveaux membres sont soutenus à chaque instant par leurs aînés, au travers de cours ou d'aide plus personnalisée leur permettant de maîtriser les logiciels de conceptions tels que CATIA ou KiCad et d'aboutir à un produit de qualité.

Le but final pour chaque étudiant est de participer au C'Space, la campagne de lancements nationale pour y mettre en oeuvre son projet. Durant une semaine, chaque groupe prépare et présente son travail afin de passer les qualifications et être autorisé à mettre en rampe et lancer sa fusée ou déployer sa Cansat.

La fabrication de fusées sondes amateur, dite astromodélisme, est loin d'être une pratique nouvelle. Elle a démarré en parallèle de la conquête spatiale et les premières campagnes de lancements amateur ont démarré en 1963.



LES MEMBRES DU PROJET

L'équipe est composée d'étudiants de l'IPSA membres d'AéroIPSA, Le projet rentre dans le cadre pour certains d'entre eux du projet de fin d'études du cursus d'ingénieur IPSA.

- Guillaume Araignon :
Étudiant en dernière année de cycle ingénieur en majeure Espace, Lanceurs et Satellites. De formation principalement mécanique et spatiale, son travail porte ainsi sur la structure mécanique et l'étude de stabilité.
- Louis Wu :
Étudiant en seconde année de Bachelor IPSA. Il est chargé de la gestion globale du projet, ainsi que de la fabrication et intégration des différents blocs.
- Yannick Tedeschi :
Étudiant en dernière année de cycle ingénieur en majeure Cellules Aéronautiques, Mécanique et Structures. Son travail inclut la conception de l'Aerospike, l'optimisation générale des ailerons et les études aérodynamiques en CFD.
- Elise Martins Dos Santos :
Étudiante en 1ere année de cycle ingénieur en majeure systèmes embarqués. De formation principalement électronique et programmation, elle s'occupe du traitement des données de vol.
- Matthieu Thomas :
Étudiant en 1ere année de cycle ingénieur en majeure systèmes embarqués. De formation principalement électronique et programmation, il s'occupe de la programmation et conception des systèmes embarqués.

LA STRUCTURE MÉCANIQUE

Les deux principaux ennemis dans la conception mécanique sont les efforts exercés sur la fusée et la masse, il faut que celles-ci soient correctement dimensionnés afin de nous permettre d'atteindre la vitesse supersonique sans rupture de la structure. Les matériaux les plus privilégiés pour leur rapport résistance/masse seront pour les pièces précises l'aluminium et pour les pièces le permettant, des fibres de verre/carbone et époxy.

La structure est de type peau porteuse. C'est-à-dire que le tube de la fusée porte la structure interne et reprend les efforts d'accélération (dû à la masse de la structure et les composants), de poussée et aérodynamiques.

La fusée se compose de plusieurs blocs avec chacun leur fonction.

La structure de chaque bloc se compose globalement d'un ensemble de bagues sur lequel repose les différents composants. Ces bagues sont souvent reliées entre elles afin d'avoir un bloc homo-

gène ; ceci permet une intégration plus pratique du bloc.

Les bagues sont finalement vissées par leur tranche au tube en afin de permettre la reprise des efforts par celui-ci.

Le bloc moteur et ailerons

Ce bloc à la base de la fusée a pour objectif d'assurer la stabilité par le biais des ailerons, d'assurer leur résistance et d'intégrer le propulseur ainsi d'assurer la reprise de la force de poussée.

La reprise de poussée se fait par le haut, les trois ailerons sont vissés sur 4 bagues en aluminium.

Les ailerons sont des plaques en aluminium de 4 mm d'épaisseur afin de simplifier de design et surtout les coûts de fabrication.

La coiffe et l'Aerospike

La coiffe sert à intégrer l'Aerospike et les batteries.

Elle devra donc résister à des efforts très importants, notamment de flexion et sa forme est optimisée de façon à améliorer l'espace disponible à l'intérieur sans dégrader de manière significative la traînée ; dont la fonction réductrice est principalement remplie par l'Aerospike.

La coiffe est fixée sur une bague d'interface avec le tube, servant aussi de fixation pour l'Aerospike.

La case électronique

L'intégration de l'électronique se fait de façon horizontale. Les cartes sont placées dans des rails parallèles aux bagues afin de faciliter le débogage.

La case est composée de 2 cartes électroniques, une carte séquenceur qui gère l'ouverture du parachute, et une carte expérience qui collecte les données inertielles pour faire la trajectographie. La prise jack est situé dans la case, et est relié à une petite trappe se fermant automatiquement au décollage.

LA STABILITÉ ET PRÉVISION DE TRAJECTOIRE

Afin d'assurer la sécurité du vol, nous devons analyser la stabilité de la fusée ainsi que sa trajectoire prévue, ces deux analyses se font de façon séparée.

La stabilité

La stabilité permet à la fusée de rester sur sa trajectoire et ce malgré des perturbations aérodynamiques qu'elle pourrait rencontrer.

La forme de la coiffe, l'influence de l'Aerospike, la longueur du tube et en particulier la forme des ailerons doivent être conçus de façon à respecter ces propriétés.

La trajectoire

L'estimation de la trajectoire est importante pour plusieurs raisons.

- Premièrement, cela permet de valider la limite inférieure de 20 m/s en sortie de rampe (STAB1), condition pour la stabilité.
- Le déploiement du parachute se fait traditionnellement à l'apogée du vol, où la vitesse dans l'air est la plus faible et donc les contraintes exercées. Le déploiement se faisant en utilisant la minuterie de vol, il faut donc savoir à l'avance à quel temps de vol aura lieu l'apogée.
- La zone autorisée pour le vol durant la campagne de lancements n'est pas illimitée. Il est donc important d'avoir une idée de la distance et l'altitude atteinte par la fusée, également pour connaître la taille de la zone où chercher la fusée pendant la récupération.

Le Stabtraj donne une vitesse maximale annoncée d'environ 250 m/s, une apogée atteinte à 17 s et une portée balistique de 840 mètres pour un Cx de 0,6.

LE CÔNE ET LE DESIGN AÉRODYNAMIQUE

L'objectif de ce projet est de démontrer l'efficacité d'un système de réduction de traînée en forme d'Aerospike.

Ce système est couramment utilisé par les missiles balistiques Trident (américain) et M51 (français), ce dernier constituant la force de dissuasion française. Ces projets étant militaires, les connaissances civiles dans ce système restent vagues et plutôt méconnues. Nous voulons donc rendre l'Aerospike plus accessible en termes de données et de tests.

Le principe de l'Aerospike est relativement ancien. Dès les années 1960 la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) procède à des tests pour démontrer la faisabilité d'un tel système. Suite à ces tests, aucun intérêt notable n'est pourtant reconnu à ce système.

Dans les années 1980, *Lockheed Martin* développe le missile *Trident I* qui sera intégré à la flotte de sous-marins américains et britanniques. Par un souci d'efficacité, différentes méthodes ont été étudiées pour rendre les missiles plus efficaces et performants tout en tenant compte des contraintes d'espace d'un sous-marin. L'Aerospike, par sa capacité à se déployer en vol, permet de réduire considérablement la taille de la coiffe du missile, ce qui signifie en un gain de portée et/ou de charge utile.

Le cône aérodynamique permet donc d'avoir un niveau de traînée plus ou moins équivalent à celui d'une coiffe classique optimisée, comme par exemple des formes de Haack-Karman.

La mesure se fait par un capteur de pression pour mesurer l'altitude et une centrale inertielle pour effectuer une trajectographie, le tout pour essayer d'obtenir une mesure de la performance de la fusée avec Aerospike (accélérations, altitude, vitesse et trajectoire) par rapport à l'estimation du Stabtraj qui ne prévoit



Figure 1 Exemple de coiffe avec un Aerospike (Missile M51)

pas d'Aerospike.

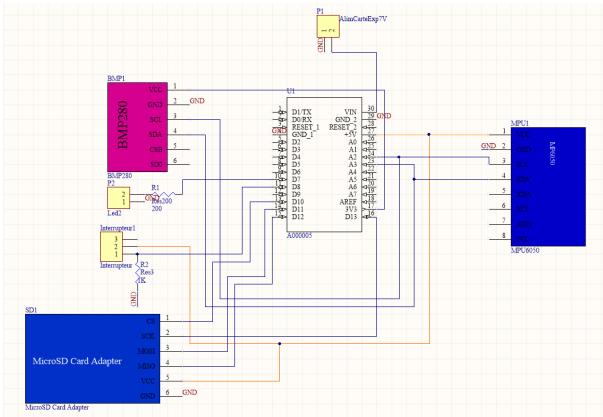
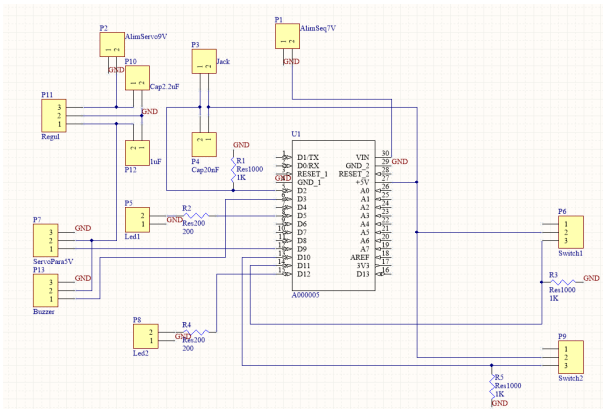
L'expérience principale de ce projet était de vérifier les caractéristiques aérodynamiques du système aerospike lors d'un vol transsonique. Les analyses CFD donnaient des résultats incongrus, probablement à cause de la complexité du calcul demandé sur un domaine délicat et turbulent comme celui du transsonique. Le manque de machines de calculs dédiés a aussi accru la difficulté à obtenir des convergences rapides sur les calculs. Néanmoins, le lancement devient alors plus important qu'avant : c'est le seul moyen de vérifier les hypothèses empiriques, alors que nous étions en manque de calculs concrets.

ÉLECTRONIQUE

L'électronique de CygHOP est composée de 2 cartes, séquenceur et expérience elles sont indépendantes.

Le séquenceur est fait à partir d'une Arduino nano, elle utilise un servo-moteur qui ouvre la trappe parachute après un temps déterminé. Le décollage est détecté par le décrochage d'un Jack. L'alimentation de la fusée est composée de 3 batteries lipo 2S, et l'enregistrement à bord se fait à l'aide d'une carte micro SD.





surtout qu'elles étaient sous le soleil dans la coiffe tout ce temps, ce qui en a dégradé les performances, d'autant qu'aucun test ou dimensionnement d'autonomie n'avait été effectué. Cette hypothèse reste la plus privilégiée.

Nous avons demandé spécifiquement aux pyrotechniciens de vérifier l'état de la trappe parachute lors de l'installation d'un propulseur de remplacement.

La trappe semblait encore bien fermée, et le buzzer indiquant l'alimentation des systèmes sonnait toujours. Pourtant, le moteur gardant la trappe en place aurait pu déjà avoir lâché et une question d'inertie aurait maintenant la trappe fermée sur sa position. Autant de plus que nous avons jamais plié le parachute aussi bien que les autres fois, il ne poussait pas sur la trappe autant que lors des tests.

Ce qui en résulte, c'est que lors de la deuxième tentative de lancement, la trappe s'est ouverte lors de la phase propulsée. L'effort aérodynamique du parachute à des vitesses près de Mach 0.8 ont rapidement arraché la suspente. Évidemment, le reste de vol est dégradé et les performances s'en ressentent. Lors de la descente balistique de la fusée, les membres de Planète Sciences ont réussi à suivre sa trajectoire. Nous avons pu localiser sa position finale. Avec ceci, en mesurant la distance par satellite entre ses coordonnées et celle de la rampe de tir, nous avons obtenu une portée balistique d'environ 950m. Cette valeur est plutôt intéressante, sachant que le StabTraj nous donnait 840m.

DÉROULÉ DU VOL

Lors du lancement, nous avons rencontré un problème de nature technique et extrinsèque à notre lanceur : les poudres du moteur ne se sont pas correctement allumées et le propulseur n'a donc pas démarré comme prévu. Selon les normes de sécurité mises en place pour ces cas spécifiques, nous devons attendre près d'une heure pour confirmer qu'il n'y ait pas d'allumage imprévu.

Pendant toute cette période, depuis la mise en rampe, la fusée était en mode « internal power », c'est-à-dire qu'elle tirait le courant depuis ses batteries. Ceci ne serait pas un souci si nous nous approchions pas de l'autonomie limite prévue. Le dimensionnement de batteries dont l'autonomie est supérieure à deux heures commence à devenir prohibitif du point de vue du budget de masse.

Deux hypothèses concernent la carte séquenceur, le régulateur de tension entre la batterie et le servomoteur ne pouvant tenir que 1A, et que le servomoteur pouvait demander plus de courant, le régulateur a pu brûler et couper l'alimentation du moteur. La dernière hypothèse est que les pistes du PCB n'étais pas dimensionnées pour supporter le courant maximal que le servomoteur, et l'une d'elle a pu subir le même sort que le régulateur.

Ainsi, étant donné la nature du système d'ouverture de la trappe parachute est fermé par le servomoteur celui-ci forçait très légèrement, ce qui a pu dégrader l'énergie des batteries,

RÉSULTATS ET CONCLUSION SUR LE PROJET

Cette différence peut signifier deux choses : soit le système aerospike a fonctionné mieux que prévu et même en ayant subi un ralentissement à cause du parachute, on a obtenu des performances de vol bien meilleures que prévues, ce qui validerait l'aerospike comme un système efficace.

On peut noter que l'ouverture du bloc parachute a dû significativement augmenter la trainée, et le régime de vol étant proche du régime transsonique le Stabtraj perd en précision (les résultats du Stabtraj deviennent optimistes par rapport à la réalité), la fusée était donc sensée avoir une portée balistique réelle encore inférieure, ce qui n'a visiblement pas été le cas.

Une autre hypothèse était que le parachute a changé l'angle d'attaque de la fusée en vol en la rendant plus « horizontale » gagnant ainsi en portée balistique sans pour autant démontré la validité de l'aerospike.

On peut voir sur la vidéo du drone que la trajectoire n'a pas été changée par son ouverture.

En résumant, certes la fusée n'a pas suivi un vol nominal comme on l'attendait, mais nous avons pu confirmer qu'un aerospike ne détruit pas la stabilité ni les performances d'une fusée qui en soit équipé. Combien l'aerospike a pu contribuer

à l'augmentation de la portée balistique, cela reste inconnu. D'autres lancements, intégration de télémétrie, amélioration de la fiabilité de l'électronique, ou bien études CFD plus approfondies seront nécessaires pour obtenir des données plus concrètes.

L'ouverture de parachute en phase propulsée n'est pas rare pour les fusées transsoniques, une idée d'expérience pour l'année prochaine est, entre autres, de concevoir un tel système fiable à ce régime de vol et surtout à étudier et chiffrer les chargements mécaniques qui s'exercent sur la trappe.

GALERIE PHOTO

