

A photograph of a rocket launch. A tall, lattice-structured tower stands on the left, with cables extending from its top to a rocket. The rocket is positioned vertically, pointing upwards, and is in the process of launching, with a bright orange flame and a trail of white smoke behind it. The background is a hazy, overcast sky. In the foreground, there is a line of dark evergreen trees and a misty or smoky ground level.

Présentation Projet

AERIS II

FX10

*Étude d'un système de Yo-Yo despin sur
Fusée expérimentale en atmosphère dense*

Par :
Robin PIEBAC
Augustin COUDRAY
Killian MELLE
Pierre-Louis GAUTIER
Nicolas DELIRY

4A ESTACA
2017 / 2018



SOMMAIRE

2	Introduction
3	AERIS I
5	Expériences proposées sur AERIS II
8	Phases de Développement/Tests envisagés
9	Idées sur la conception
10	Conclusion

Introduction

Ce document présente le projet Aeris II de l'Estaca Space Odyssey. Ce projet est réalisé à la fois au sein de l'association et en tant que projet de 4ème année. Nous sommes un groupe d'anciens membres du projet de fusée expérimentale AERIS I s'étant déroulé tout au long de l'année scolaire 2016-2017, soit durant notre troisième année.

Cette fusée a décollé en Juillet 2017 (photo de couverture) durant la campagne de lancement du C'space, à Tarbes. L'expérience principale à bord était le test atmosphérique d'un système d'annulation de roulis appelé « Yo-Yo De-spin ». Malheureusement, l'électronique de bord liée à l'expérience n'a pas détecté la sortie de rampe de la fusée. De ce fait, le système d'annulation de roulis ne s'est pas activé durant le vol et est resté passif. L'expérience n'a donc pas pu être validée en vol, bien que nos tests au sol furent plus que concluants.

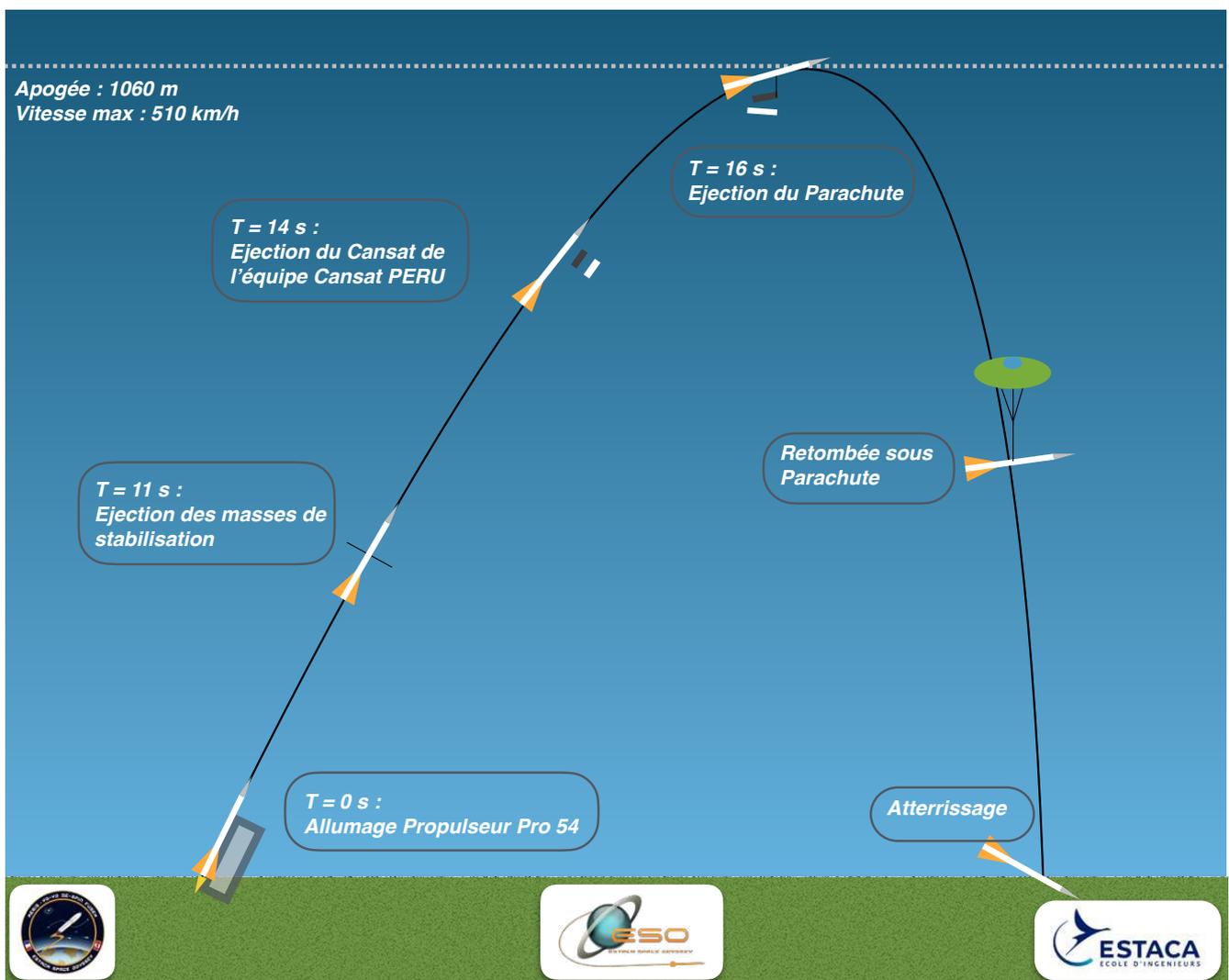
C'est dans ce contexte qu'est né le projet de la Fusée Expérimentale AERIS II, souhaitant renouveler l'expérience d'AERIS I, avec des améliorations majeures, notamment une plus grande fiabilité des systèmes électroniques.

AERIS I

AERIS I, conçue durant l'année scolaire 2016-2017, est une fusée mesurant 2m60 pour un diamètre de 100 mm. Elle a été propulsée par un moteur Pro 54 de la marque Cesaroni Technology. Elle a atteint une apogée de 1060 m avec une vitesse maximum de 510 km/h.

Le but principal était de tester un système de stabilisation de roulis, le Yo-Yo De-spin. L'expérience devait être vérifiée tout d'abord visuellement grâce à une caméra montée sur le côté de la fusée, mais aussi avec des données enregistrées sur carte SD à bord venant d'une centrale inertielle.

AERIS I avait aussi comme mission secondaire de larguer un Cansat (petit module autonome) peu avant son apogée, conçu par une équipe péruvienne. La fusée devait également transmettre ses coordonnées GPS durant le vol à une station au sol par antenne radio.



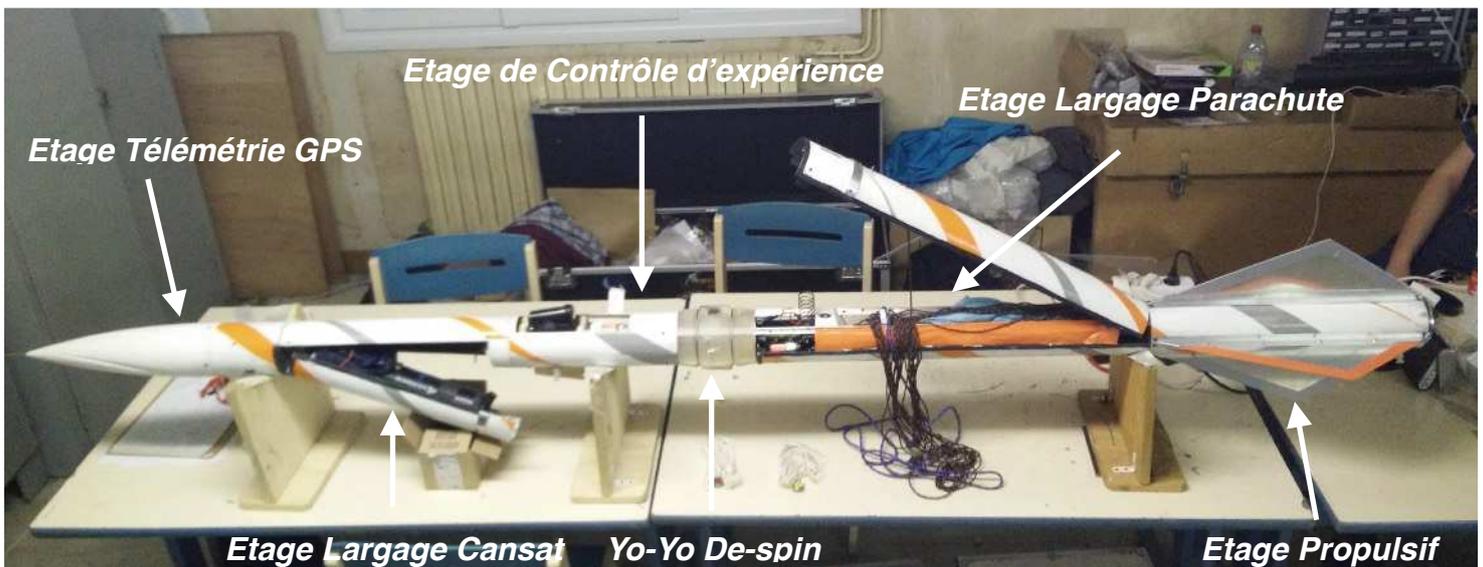
Profil de Vol d'AERIS I

Malheureusement, le vol ne s'est pas déroulé comme prévu. En effet, l'électronique de bord n'a pas détecté la sortie de rampe du véhicule et ainsi, n'a pas déclenché les expériences (le parachute, lui, s'est bien déclenché car alimenté par une autre carte). La cause de cet échec peut être probablement directement lié à une défaillance du capteur à effet Hall qui, à l'aide d'un aimant s'éjectant au décollage, permet de détecter l'instant précis du décollage de la fusée.

Du côté mécanique, des erreurs de conception ont été faites sur les treillis porteurs de la fusée (treillis U 11,5x11,5 aluminium de 2m50). AERIS I avait initialement trop de flèche et des renforts en acier ont été nécessaires afin de respecter la tolérance mise en place par le cahier des charges de l'organisme qui nous encadre durant la campagne de lancements.

D'autres modifications mineures ont aussi été nécessaire durant la semaine précédant le lancement.

Tout ces points nous ont permis d'accumuler un grand nombre de connaissances et l'expérience que nous avons pu en tirer ne peut être qu'une excellente voie d'amélioration, vis-à-vis de la seconde itération de ce concept, AERIS II.



Architecture finale d'AERIS I

Expériences Proposées sur AERIS II

Le Yo-Yo Despin

Cette expérience était l'expérience principale d'AERIS I et la raison de cette proposition de projet. L'idée principale est de stabiliser la fusée en injectant du roulis tout au long de l'ascension, puis d'arrêter ce dernier afin de permettre une séparation propre d'un module/parachute.

Le concept est très simple : à un moment du vol, des ventouses magnétiques libèrent des masses (de l'ordre de 20 g) attachées à des fils se déroulant le long de la fusée. Ces masses sont ensuite larguées lorsque les câbles arrivent en bout de course.

Ce système permet d'augmenter le moment d'inertie de la fusée jusqu'à un point où, si les masses et les câbles sont bien dimensionnés, la vitesse roulis de la fusée tend vers zéro.

Ce système est communément utilisé sur des fusées sondes ou encore sur des satellites. Il a les qualités d'être très simple et aussi d'être une méthode passive de contrôle de roulis. En effet, pour que celui-ci fonctionne, aucune connaissance de la vitesse de roulis initiale de la fusée n'est nécessaire si l'on souhaite la stopper totalement.

Le modèle mathématique est le suivant ($r = 0$ pour un arrêt complet) :

$$\frac{1+r}{1-r} = \frac{I}{m(d+a)^2},$$

where

r = spin reduction ratio (final spin rate/initial spin rate),

I = spacecraft moment of inertia about the spin axis,

m = mass of weights plus 1/3 mass of wires,

d = cord length,

a = spacecraft radius.

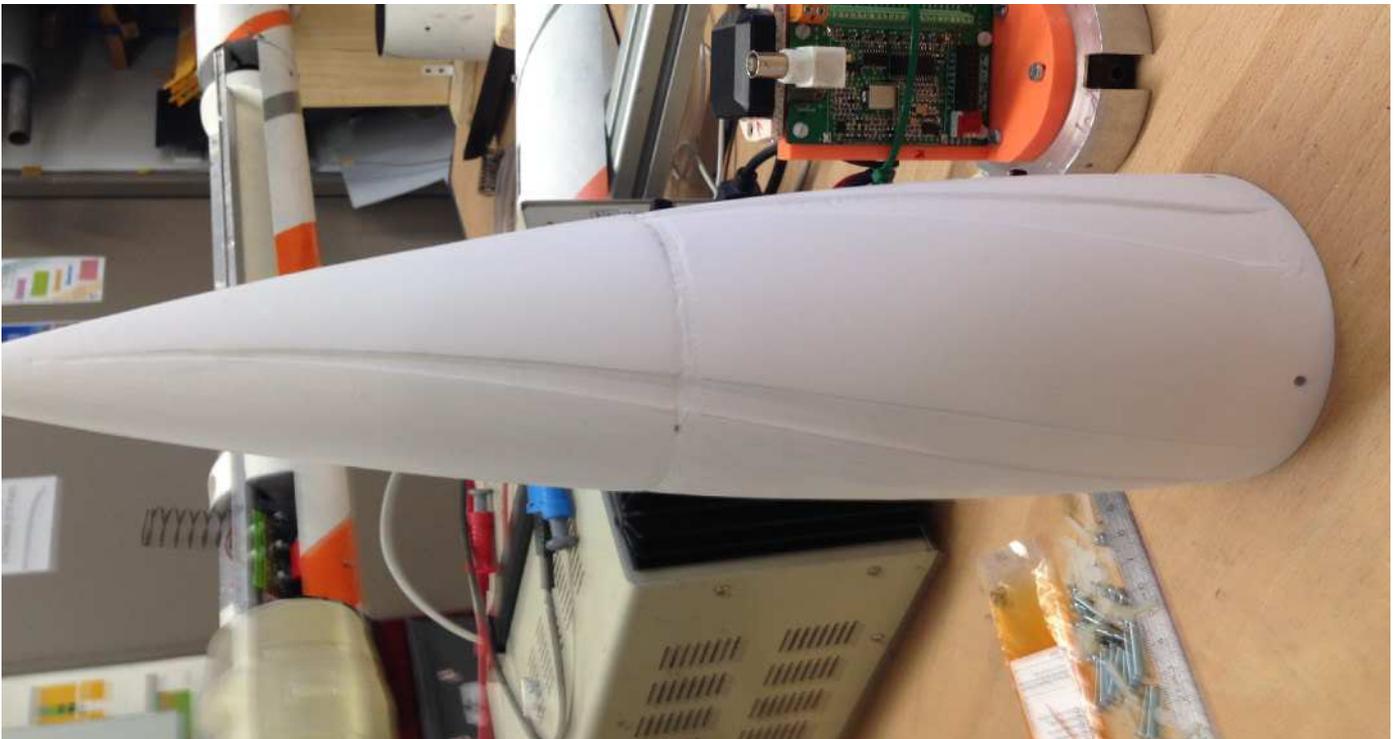
Sur AERIS I, l'inertie de la fusée était estimée via le logiciel Catia, mais n'était pas d'une très grande précision. Une des améliorations sur AERIS II sera l'estimation précise de l'inertie de la fusée.

La vérification du bon fonctionnement de cette expérience sera à la fois visuelle via une caméra montée sur le côté de la fusée, mais aussi grâce à une collecte de données envoyées par d'une centrale inertielle se trouvant à bord de la fusée.

L'ogive rainurée

Un des points les moins approfondis d'AERIS I était la mise en roulis initiale de la fusée. Notre solution sur ce problème a été dans un premier temps de partir sur l'hypothèse que, de base, toute fusée de cette catégorie a un certain roulis à cause de sources diverses. Il se trouve que notre système de Yo-Yo De-Spin fonctionne mieux dans un certain sens de rotation dû au sens d'enroulement des câbles des masses. Afin de favoriser un sens de rotation, nous avons porté notre attention vers une modification de la géométrie de l'ogive. Nous avons donc fabriqué en impression 3D une ogive rainurée en spirale, ce qui nous semblait être une bonne option.

Or il se trouve qu'aucune étude réelle n'a été faite sur l'impact de cette forme d'ogive sur le roulis, en partie par manque de temps. Cette étude, en CFD et en soufflerie est un des objectifs d'AERIS II, afin de pouvoir initier un roulis favorable durant la phase propulsive. Collecter des données sur ce type d'ogive pourrait être par ailleurs utile à d'autres fusées de l'ESO nécessitant un sens de roulis « déterminé » .



Ogive d'AERIS I

La mise en roulis par gaz froid

La dernière expérience que nous souhaitons mettre en place est aussi en rapport avec le Yo-Yo De-spin. Elle consisterait à injecter de manière tangente des jets de gaz froid afin d'augmenter la vitesse de roulis de la fusée. Ce système permettrait à AERIS II d'atteindre des vitesses de rotation plus intéressantes pour tester le De-spin (en plus du roulis naturel et celui théoriquement induit par l'ogive). Ce système s'activerait juste après la phase de propulsion.

Nous pouvons dès à présent imaginer un système simple à base de cartouches de gaz comprimé, s'activant via une électrovanne menant le gaz vers des tuyères localisées sur le corps de la fusée.

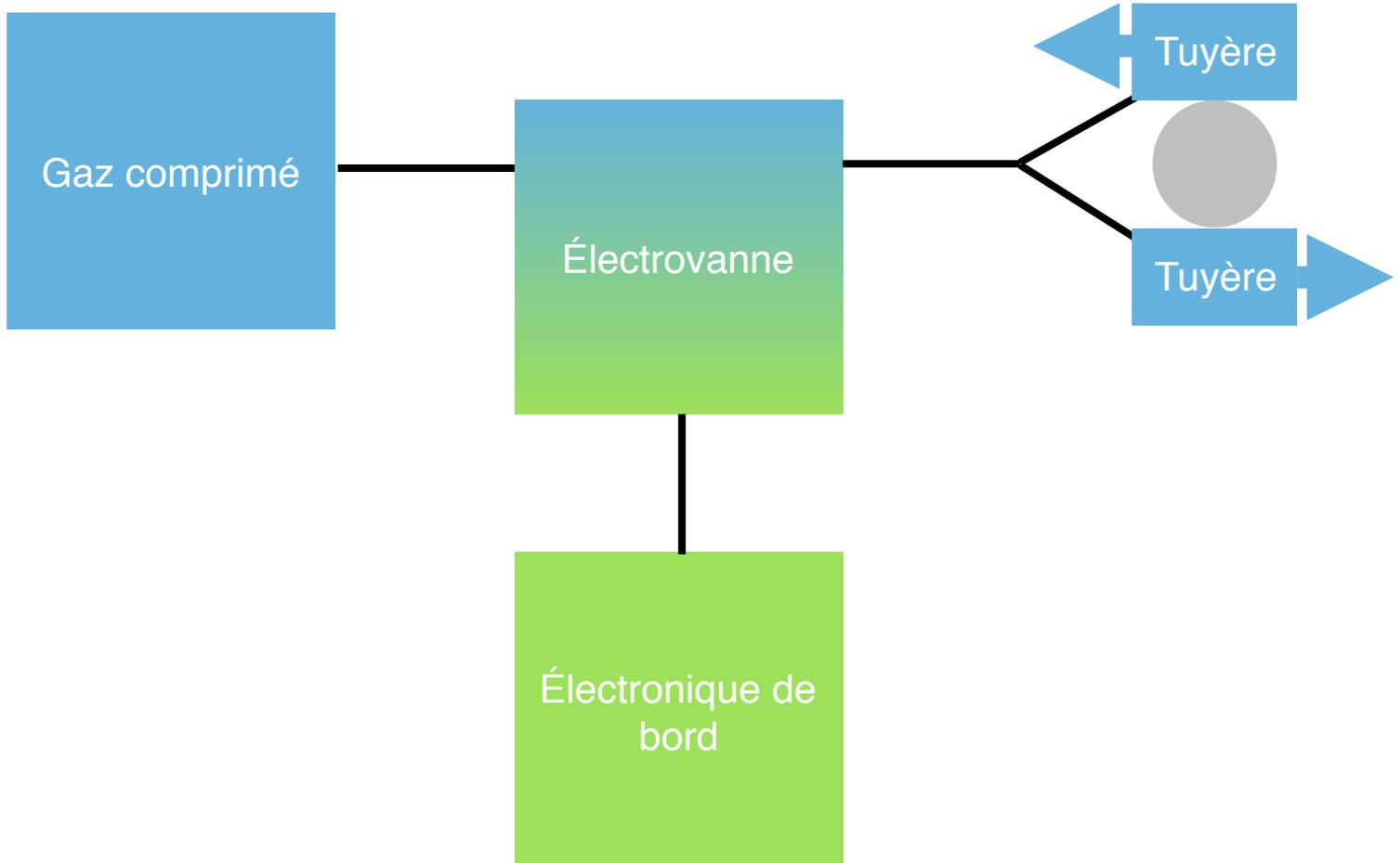


Schéma simplifié du système envisagé

Phases de Développement/Tests envisagés

Yo-Yo Despin

Nous avons déjà développé un banc d'essai tournant pour le yo-yo despin d'AERIS I. Celui-ci fait tourner toutes les pièces (mécaniques et électroniques) liées à cette expérience, permettant un test complet de tout le sous-système. L'idée ici sera de le réutiliser en y apportant certaines modifications (en partie pour le rendre plus stable et plus représentatif de l'inertie de la fusée). En plus de tests physiques, une attention particulière sera portée sur l'estimation théorique du moment d'inertie en roulis de la fusée finale, afin de faire un banc de test le plus représentatif possible.

Ogive rainurée

Contrairement à AERIS I, nous comptons ici faire toute une batterie de tests afin de nous assurer de l'efficacité de l'ogive. Premièrement une étude CFD sera effectuée afin de déterminer quels designs sont les plus prometteurs. Ensuite une étude en soufflerie sera effectuée (si disponible à Saint-Quentin-en-Yvelines ou éventuellement à Laval) en plaçant l'ogive sur une armature laissant la rotation possible (avec une estimation du taux de roulis grâce à des marquages visuels ou des capteurs).

Mise en roulis par gaz froid

Une étude de mécanique des fluides sera premièrement effectuée afin de déterminer la quantité/pression de gaz nécessaire ainsi que de créer une série de designs de tuyères. Une fois les pièces produites, des tests seront effectués sur le même banc d'essai que le De-Spin. Nous pouvons même envisager à la fin du projet un test simultané avec les deux sous-systèmes sur le même banc d'essai.

Idées sur la conception

Mécanique

Peau monobloc (au possible) semi-épaisse en carbone :

s'étirant sur toute la longueur de la fusée, cette solution permettrait théoriquement d'annuler pratiquement toute la flèche statique de la fusée.

Bague de De-spin en imprimé 3D résine composée de 2 demi-cylindres :

Permettant de l'adapter par dessus la peau monobloc de la fusée.

Structure interne simple (non-porteuse) :

composée de 2 ou 3 treillis légers permettant de fixer tout les sous-systèmes à bord de la fusée.

Électronique

Transmission par télémétrie des données GPS et Expérience :

permettant une facilitation de récupération de la fusée ainsi qu'une exploitation direct des données d'expérience (en plus d'un enregistrement à bord).

Fixations « boîte » en imprimé 3D dédiées pour chaque cartes :

permettant d'éviter la présence de carte électronique à l'air libre.

Conclusion

Aeris II a été lancée le jeudi 19 Juillet 2018, lors de l'édition 2018 du C'Space. Tous les membres du projet étaient présents lors de cette semaine de campagne, à savoir Killian MELLE (chef de projet), Clément ROUSSEAU (chef élec), Augustin COUDRAY (membre élec), Robin PIEBAC (chef méca), Pierre-Louis GAUTIER (membre méca) et Nicolas DELIRY (membre méca).

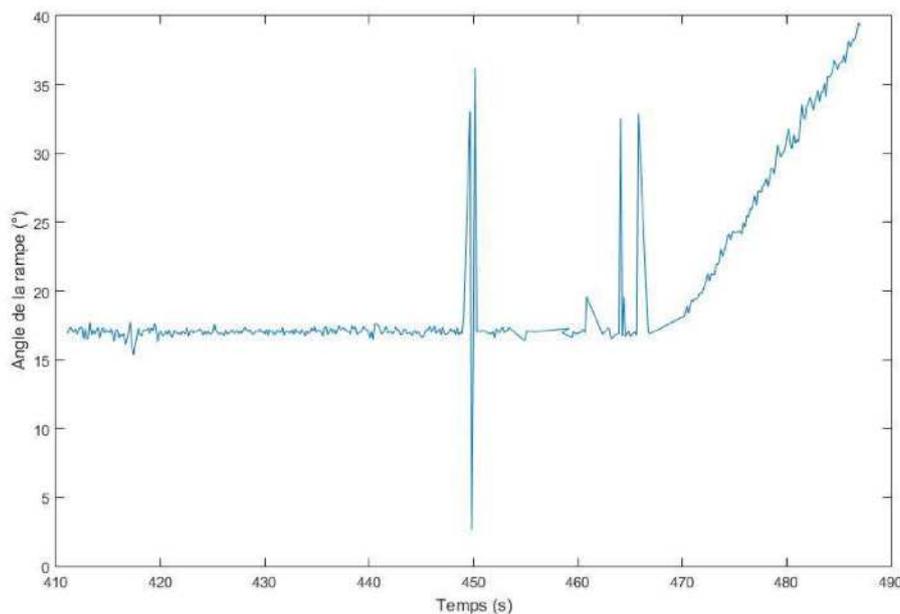
Les qualifications : la partie mécanique de la fusée a été qualifiée dès le premier jour du C'Space. Cependant, des problèmes de télémesure n'ont pas permis de qualifier la fusée pour le vol avant le mercredi.

Le jour du lancement : après une semaine intense et sous l'œil attentif de Ludovic DARIOL, R&T Projects Supervisor chez ArianeGroup, la fusée démarre sa chronologie en rampe. Une mauvaise manipulation du système de purge du réservoir pneumatique lors d'un vol simulé en rampe révèle la présence d'une fuite, qui nécessite de recommencer la chronologie. Après des difficultés de réception de télémesure, et plusieurs élévations/abaissement de la rampe, la fusée est prête et est finalement lancée.

Le vol d'Aeris II est nominal... ou presque. Une anomalie sur la carte expérience, encore inconnue, a redémarré la carte, qui ne s'est alors plus placée dans un mode de vol mais plutôt dans un mode lecture. Au moment de quitter la rampe, la chronologie censée déclencher les jets de gaz et le De-Spin ne s'est alors pas initiée et, à l'instar d'Aeris I, l'expérience n'a pas pu être testée en vol suite à un souci électronique.



Bilan : la plus grosse erreur de l'équipe a été de ne pas s'assurer, à tous les instants de la mise en rampe, que la LED du mode vol était bien éteinte (ce qui indique que la carte est prête à déclencher sa chronologie). Cette vérification n'a été faite qu'une fois, l'équipe admettant qu'une fois la LED éteinte, la carte ne pouvait pas redémarrer avant le vol (ce problème de reboot n'ayant jamais été rencontré malgré des dizaines de vols simulés). Une vérification par les pyrotechniciens juste avant l'insertion du propulseur aurait également permis de sauver le vol. En effet, la carte a, selon nos données enregistrées, redémarré lors de l'élévation de la rampe lorsqu'elle était à 40° (voir image ci-dessous).



Le coup est dur, après un deuxième échec malgré une fusée plus fiable et plus poussée. En collaboration avec un expert dans la méthodologie de traitement des problèmes d'ArianeGroup, une recherche du problème à l'origine de cet échec est en cours.

Mais l'équipe, désireuse de voir cette expérience se déclencher, ne baisse pas les bras et décide de reconduire le projet en conservant l'architecture d'Aeris II. Cette décision, soutenue par ArianeGroup, donne donc naissance au projet Aeris III, avec possiblement une expérience dissociée de la télémessure, sur carte analogique, évitant ainsi tout problème logiciel.



DOSSIER D'EXPERIENCE FUSEX AERIS II

Projet FX10

Ce document a pour but de détailler le principe et le fonctionnement de l'expérience principale de la fusée expérimentale Aeris. Cette expérience, inédite au sein de l'ESO, a pour but d'annuler le roulis engendré qui fait suite au décollage de la fusée, par un système de libération de masses par déroulement.

EXPERIENCE PRINCIPALE : YO-YO DE-SPIN

I – PRINCIPE ET FONCTIONNEMENT DU YO-YO DE-SPIN

- Principe

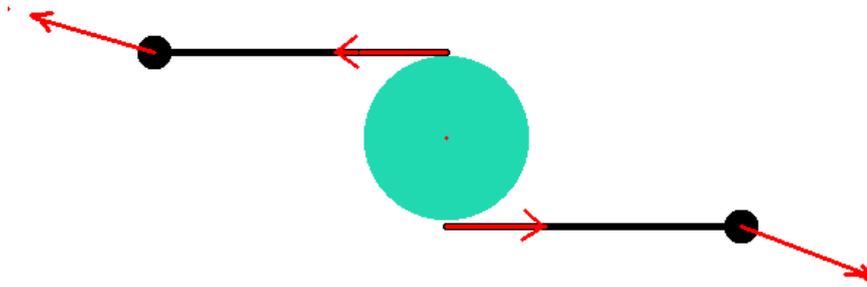
La méthode d'annulation de roulis par libération de masses est une méthode actuellement utilisée sur certains satellites spatiaux ou certaines fusées sondes, afin d'annuler leur vitesse angulaire, par une méthode simple qui répond au principe de conservation du moment cinétique.

C'est une méthode très intéressante pour le lancement de satellites dont l'étage les contenant a nécessité une stabilisation par spin forcé. Le satellite ne pouvant être libéré avec une rotation très élevée pour des raisons évidentes de contrôle de celui-ci, il est nécessaire d'annuler la rotation de l'étage avant de libérer le satellite.

Dans le cas des fusées sondes, celles-ci sont souvent stabilisées par un fort roulis (méthode simple et ne nécessitant pas de contrôle de stabilité électronique) durant leur phase de propulsion. Il est cependant nécessaire d'annuler ce roulis du mieux possible en fin de propulsion, et c'est à ce moment que la technique du de-spin entre en œuvre.

- Fonctionnement

Le mécanisme se compose de deux longueurs de câble avec des poids sur les extrémités. Les câbles sont enroulés autour du dernier étage et / ou du satellite, à la manière d'un double yo-yo. Lorsque les poids sont libérés, le spin de la fusée les jette loin de l'axe de rotation. Ceci transfère suffisamment de moment angulaire aux poids pour réduire le spin du satellite à la valeur souhaitée.



II – Application à notre système

Cette technique est normalement utilisée hors-atmosphère. En effet, l'absence de forces aérodynamiques et autres contraintes liées à l'atmosphère facilite grandement la libération des masses et le bon déroulement des câbles.

Notre expérience a pour but de tester l'impact des contraintes atmosphériques sur l'efficacité de ce système. Pour cela nous allons utiliser la technique de yo-yo de-spin de la même manière qu'un satellite en orbite.

Pourquoi ?

La mise en roulis d'une fusée assure sa stabilité en vol, mais dès lors que la phase de propulsion est terminée, elle peut devenir gênante pour certaines expériences et/ou prises de données (largage de CanSat, vidéo embarquée etc.).

III – Dimensionnement du système

L'avantage de cette technique est que nos calculs ne dépendront pas de la vitesse angulaire de la fusée. Elle ne sera donc pas à calculer et n'interviendra pas dans nos calculs.

Pour dimensionner notre système, nous utiliserons les calculs mis en ligne par la NASA et initiés par Henry J. Cornille dans son dossier « *A method of accurately reducing the spin rate of a rotating spacecraft* », datant de 1962.

$$\frac{1+r}{1-r} = \frac{I}{m(d+a)^2}$$

where

- r = spin reduction ratio (final spin rate/initial spin rate),
- I = spacecraft moment of inertia about the spin axis,
- m = mass of weights plus 1/3 mass of wires,
- d = cord length,
- a = spacecraft radius.

Il est évident d'après l'équation que pour un moment d'inertie donné, le rapport de réduction de spin r est fixe lorsque la masse m et la longueur d du câble sont choisies. Le de-spin à zéro peut alors être effectué quelle que soit la vitesse de rotation initiale, à condition que le moment d'inertie ne varie avant libération des masses.

L'équation devient alors :

$$\frac{I}{mm(dd+aa)^2} = 1$$

Pour déterminer la longueur du câble et les masses, nous avons mis en place un document Excel dans lequel est inscrit le moment d'inertie de la fusée (apparentée à un cylindre creux) mais également un nombre d'incrément de demi-périmètres. En effet la bague du yo-yo de-spin a un diamètre fixe et notre système de libération est également fixe (cf CAO). Ce système de maintien des masses et des câbles nous contraint dans la longueur de corde possible, par incréments de demi-périmètres.

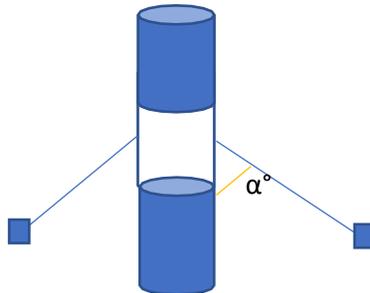
Ainsi nous déterminerons les masses en fonctions des différentes longueurs de câbles possibles.

Erreurs dues à la présence de forces aérodynamiques

Nous sommes conscients que la présence d'atmosphère ne facilite pas la tâche de cette expérience. Après avoir pris contact avec un professeur de l'université du Colorado, qui a lui-même travaillé sur le système de yo-yo de-spin, celui-ci nous a confirmé que les calculs de la NASA étaient trop simplistes dans le cas d'une utilisation telle que la nôtre. Il faudrait prendre en compte bien des phénomènes qui rendraient l'expérience trop compliquée. En effet, sur banc d'essai au sol (voir section 5), le système fonctionnera parfaitement car aucune vitesse verticale n'est présente et les forces qui résisteraient au déploiement des masses sont négligeables.

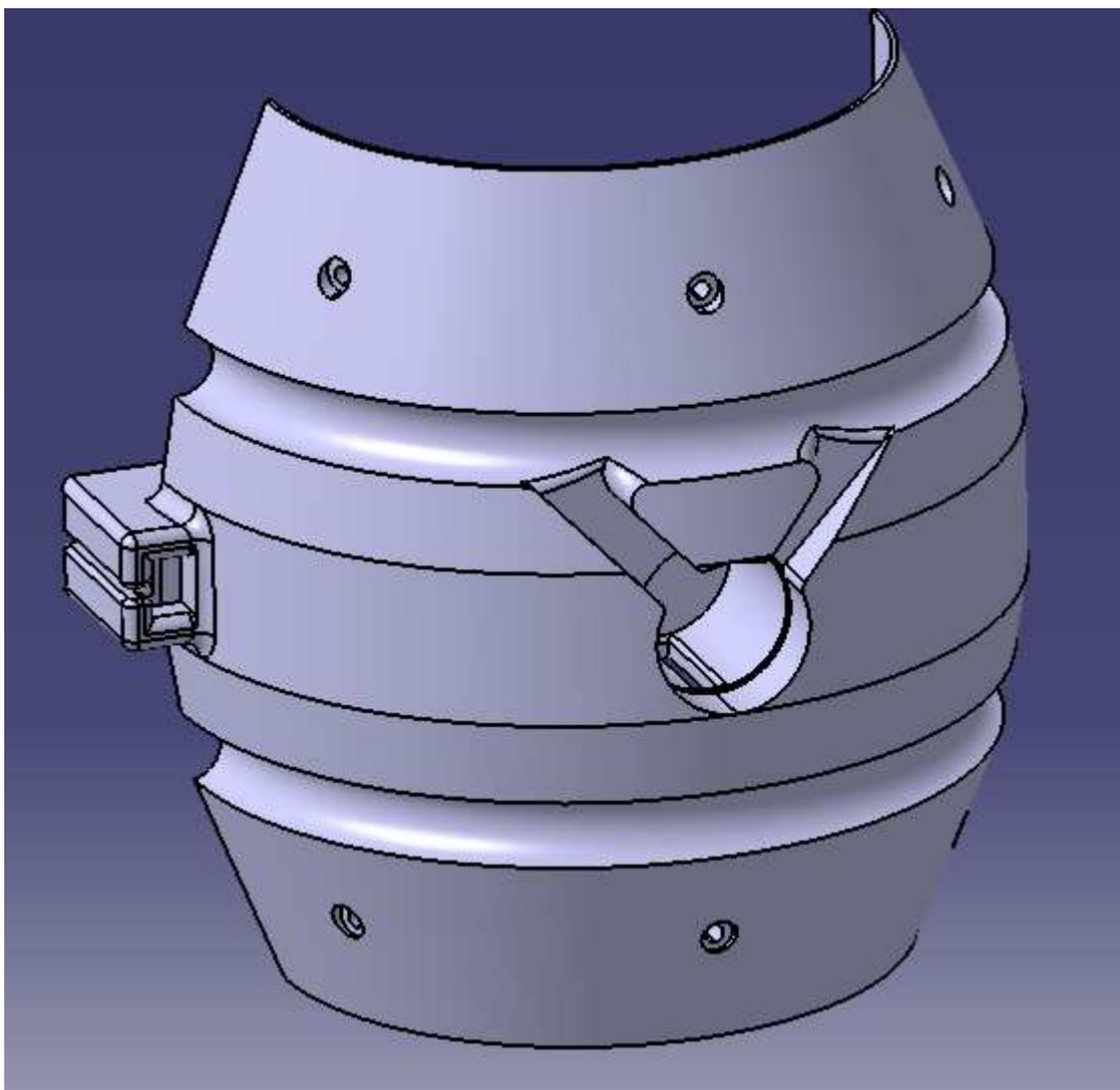
Alors que sur une fusée qui vient d'être propulsée et soumise aux contraintes de l'atmosphère, les masses et leurs fils peuvent se comporter autrement.

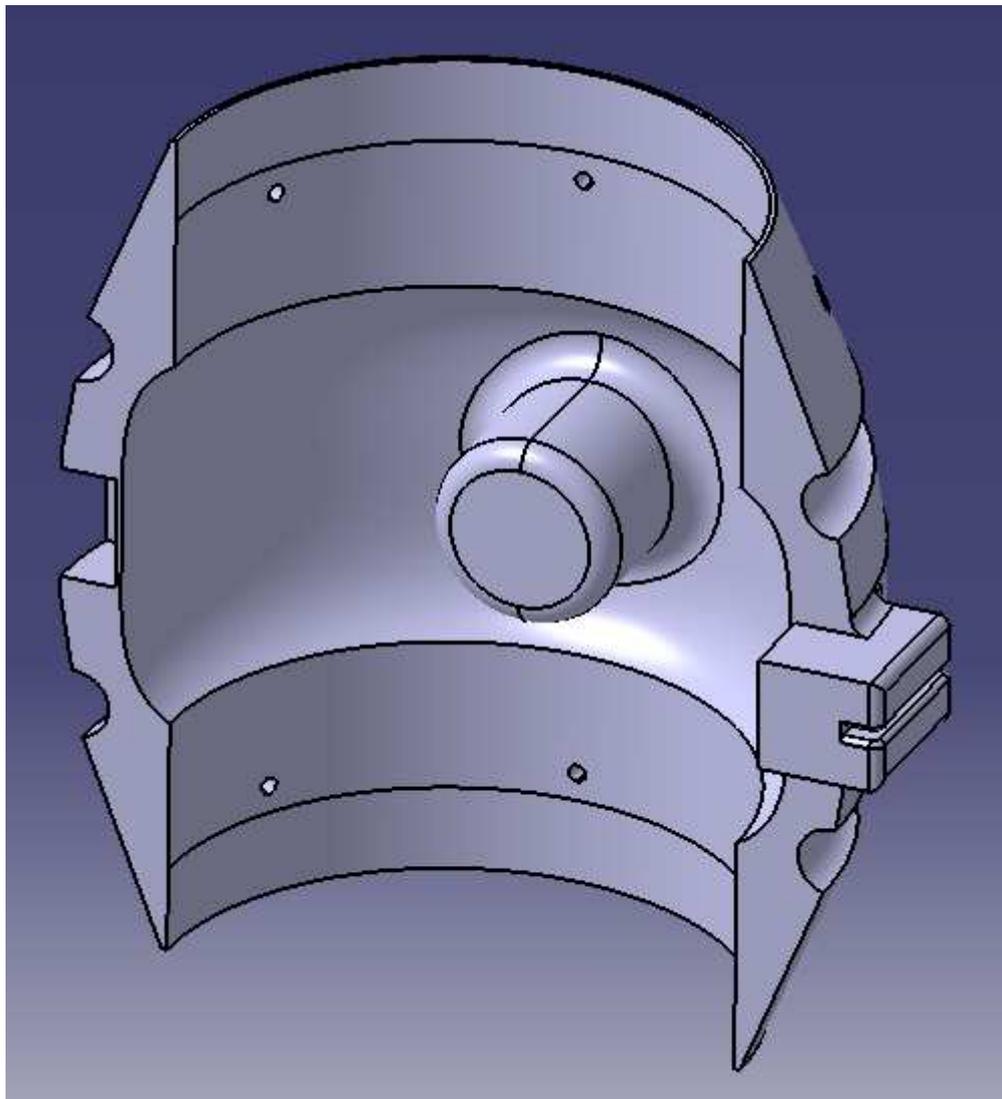
Pour parfaire le dimensionnement de notre système, il faudrait prendre en compte un phénomène de repliement des cordes vers le bas qui empêchent les masses d'être normales au plan de la bague de de-spin (voir illustration).



Il faudrait prendre en compte un angle α dans nos calculs et c'est justement ce phénomène que nous allons négliger pour observer son impact sur le bon déroulement des masses et le bon arrêt du roulis de la fusée.

CAO de la bague de yo-yo de-spin





La particularité de la bague de-spin d'Aeris II, contrairement à sa petite sœur, est que celle-ci viendra se visser sur la peau directement, ce qui facilite grandement son installation.



IV – Vérification sur banc d'essai

Le fonctionnement du système a besoin d'être testé sur banc d'essai pour être validé (bon rapport poids des masses/longueur de fil).

Le support sera mis en rotation manuellement via un fil. L'inertie de la fusée sera simulée grâce aux 4 masses d'environ 2 kg tenues par les barres.



V – Méthodes de mesures et d'interprétation

La fusée expérimentale comprendra 2 éléments qui nous permettront de vérifier l'efficacité du système après le vol.

Tout d'abord un **gyromètre** (via la centrale inertielle) grâce auquel toutes les variations de roulis de la fusée seront enregistrées. Nous pourrons ainsi facilement retrouver à t+fin de phase de propulsion les valeurs de spin, et voir si le yo-yo a partiellement, complètement ou même aucunement annulé le spin de la fusée.

Cette méthode de mesure est efficace mais l'appui d'une **caméra** filmant les abords du yo-yo ne saurait qu'être bénéfique. Nous pourrons ainsi observer la mise en roulis de la fusée au décollage, et l'annulation de ce roulis peu avant l'apogée.

EXPERIENCE SECONDAIRE : ACCELEROMETRE

Mesure de l'accélération de la fusée par utilisation de l'accéléromètre 3 axes de la centrale inertielle.