



CHIRON

Fusée expérimentale supersonique
avec aérofreins

R&D ESL

Projet 3A-4A

Auteurs : Rémi PERRIER-GUSTIN et Adrien Giraud

Année : 2024-2025



Introduction

Ce document a pour objectif de fournir une vue d'ensemble du projet Chiron, ses objectifs, la composition de l'équipe et les expériences embarquées. Ce projet s'inscrit dans la continuité du projet ESL à l'Estaca Space Odyssey (ESO), en particulier de l'aspect aérodynamique et structurel. Il reflète notre ambition et notre motivation. Nous vous souhaitons une bonne lecture et restons à votre disposition pour toute remarque ou information supplémentaire.

Le programme ESL

Le programme ESL (Estaca Space Launcher) est un projet ambitieux ayant débuté en 2019, avec pour objectif final l'envoi et la récupération d'une fusée sonde à 35 km d'altitude, intégrant un moteur hybride entièrement dimensionné et conçu au sein de l'ESO (Estaca Space Odyssey). Après trois ans d'état de l'art et de dimensionnements préliminaires complexes et étant donné les objectifs ambitieux et la période difficile traversée (Covid), il a été décidé l'année dernière de modifier le programme afin de rendre le projet plus réalisable. Désormais trois itérations de fusées sont prévues avant d'atteindre l'altitude finale des 35 km :

- ESL-1: Fusée expérimentale embarquant un moteur sur étagère, afin de tester et valider les sous-systèmes de la fusée. Le vol était prévu pour la campagne du C'Space 2024.
- ESL-2 : Fusée embarquant le moteur hybride NAGA-03, pour un premier vol prévu en 2025 avec un vol au C'space 2026/2027 ou EuRoc 2026/2027.
- ESL-3 : Fusée embarquant une version améliorée de NAGA-03, afin d'atteindre l'altitude de 35km, pour un vol prévu en 2027/2028.

Présentation de Chiron

Chiron est une fusée expérimentale supersonique, qui a comme expérience un aérofrein qui entrerait en fonctionnement dans le domaine supersonique. Elle serait équipée d'un pro-75 ou d'un pro-98 en fonction de sa masse et de ses dimensions finales. L'objectif principal est de développer et d'intégrer l'aérofrein.

Elle permettra aussi de conserver les sponsors et les acquis obtenus lors du développement d'ESL-1, sur l'avionique par exemple. Ces solutions techniques seront donc déjà développées pour ESL-3, qui pourra se concentrer sur l'intégration de NAGA. De nouveaux designs seront aussi développés et applicables aux prochaines itérations d'ESL, notamment tout ce qui touche à l'optimisation de masse et aux efforts élevés (de poussée et aérodynamique) dus au supersonique.

Ce projet permettra aussi de former et de motiver des membres pour le futur du projet ESL, notamment pour l'année 2025-2026, qui sera critique pour l'ensemble du projet.

Expérience

L'expérience de Chiron est constituée d'aérofreins s'ouvrant à la fin de la phase propulsive, afin de ralentir la fusée en augmentant son coefficient de traînée.

Le principal objectif de ces aérofreins est de trainer suffisamment pour empêcher la fusée de dépasser le seuil d'altitude du C'Space de 3000m. La surface des aérofreins sera principalement dimensionnée afin d'atteindre ce but.

Avec cet objectif vient la fiabilité et la solidité des aérofrein et de leur système de déploiement. D'une part, de nombreux tests CFD et MEF seront fait afin d'assurer la fiabilité durant et après le déploiement. Le système sera testé à l'aide de prototypes. L'ouverture sera aussi assurée par un système hybride capteur/minuterie, qui assurera que les aérofreins se déploient, et que la trajectoire soit nominale.

Le second objectif sera de prévoir la trajectoire de la fusée, et de la comparer avec la trajectoire obtenue en pratique. Celle-ci sera caractérisée par des mesures d'altitude et d'accélération mesurée et enregistrée par des capteurs intégrés dans l'avionique.

Objectifs

- Etablir un cahier des charges respectant celui du C'Space
- Gestion et communication avec le projet ESL dans son ensemble (sponsors, RETEX, contacts avec NAGA)
- Documentation et étude de dimensionnement, MEF, CFD et conceptions 3D
- Développement de l'aérofrein, de son architecture et de son électronique, pour Chiron et pour une éventuelle ESL-3
- Développement d'une structure adaptée aux efforts subis, optimisation de la masse, et CAO complète de la fusée
- Développement d'une aérodynamique adaptée au supersonique
- Développement de l'avionique, avec capteur GPS et basée sur celle d'ESL-1, et un enregistrement des données des capteurs

- Développement du système de récupération
- Conception et fabrication de l'ensemble des sous-systèmes de la fusée expérimentale
- Qualification au C'Space et lancement nominal

Description Chiron

Architecture globale

Longueur	Entre 1000mm et 1300mm
Propulseur	Pro-75 3G
Diamètre extérieur	85 ou 90mm
Masse à vide	<5kg

Le poids très faible est fixé par la nécessité d'atteindre le régime supersonique, et par la poussée offerte par le Pro-75. Si cette masse est trop dépassée, un propulseur plus puissant, et donc des dérogations, seront nécessaires. Il faut donc absolument respecter cette limite.

L'ogive et les ailerons seront réalisés à l'aide des outils stabtraj, ogivator et openrocket, lorsque les dimensions et le BDM finales de la fusée seront définies. L'ogive sera vraisemblablement de forme Von Karman, après étude.

La structure devra être facilement démontable, et sera donc composée d'au moins un jeu de bague sur le même modèle qu'ESL-1. L'expérience se trouvera dans un de ces jeux de bagues pour ne pas avoir à entailler la peau. La peau pourra être porteuse ou non en fonction des efforts finaux subis par la fusée. La reprise de poussée se fera par le haut.

La récupération se fera par la coiffe, à l'aide d'un système de verrou et de ressorts, et un parachute stocké dans celle-ci.

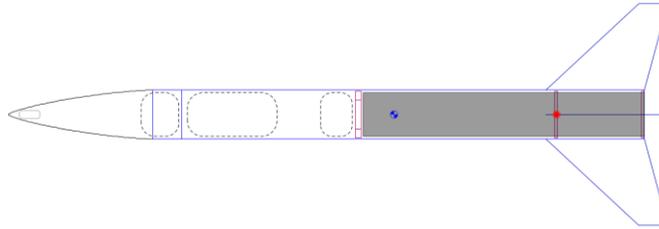
L'avionique sera basée sur celle d'ESL-1, et nécessitera au moins un capteur GPS imposé par le cahier des charges C'Space pour une fusée supersonique. Elle possèdera aussi deux accéléromètres et deux altimètres afin de mesurer les effets des aérofreins sur la trajectoire de la fusée. L'activation des aérofreins et de la récupération se fera par un système hybride minuterie-capteurs.

Les deux systèmes considérés pour les aérofreins sont des ouvertures en épi et en glissière, tout deux activés par des ressorts, permettant d'éviter au moteur de subir des efforts.

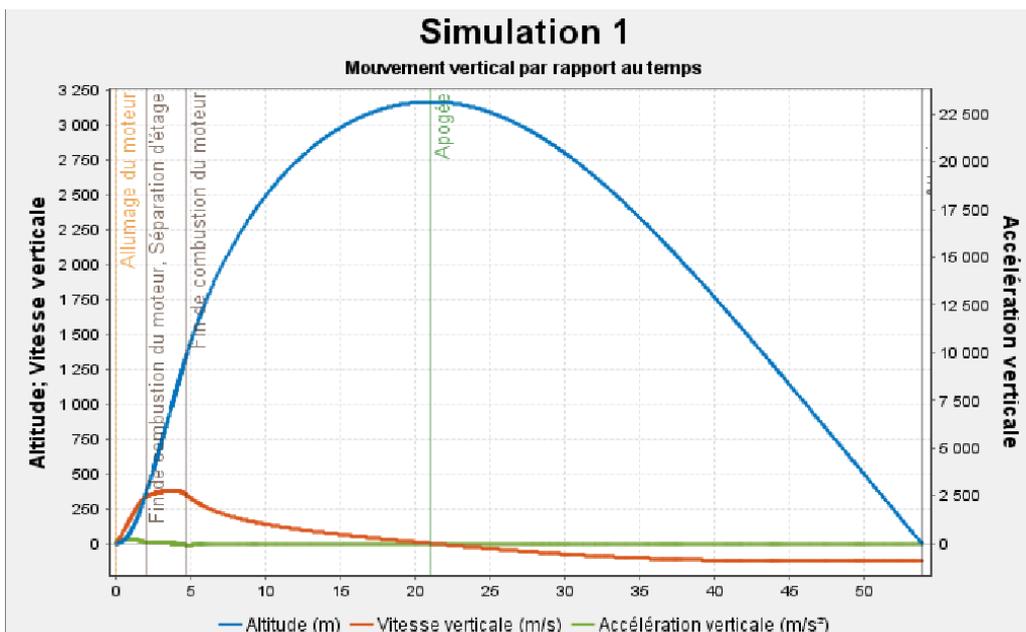
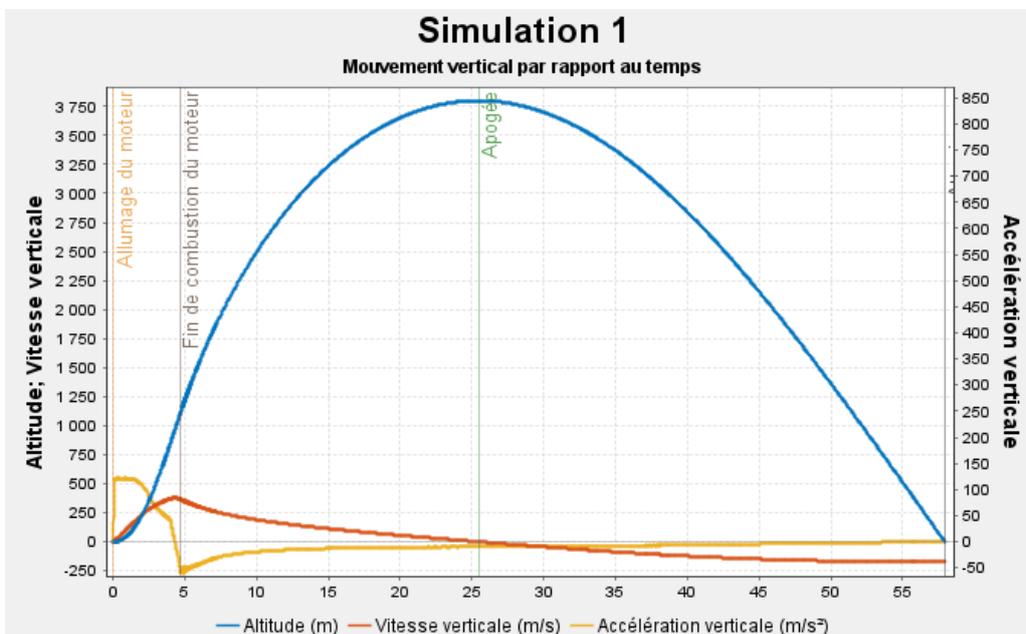
OpenRocket préliminaires

000000
Longueur 116 cm, diamètre max 6,5 cm
Masse sans moteur 4200 g
Masse avec moteur 7600 g

000000 0.0 cal / 24.5 N
Ø 60.967 cm
Ø 27.945 cm
1.0-1.00



Altitude: 2760 m
Vitesse Max: 301 m/s (Mach 1.002)
Accélération Max: 125 m/s²



La seconde simulation a été effectuée en modifiant le Cd de la coiffe pour correspondre à celui de la fusée AVEC les aérofreins, afin de caractériser la trajectoire de la fusée après leur ouverture, à Mach 1.2.

On a considéré que le Cd des aérofreins était de 1,17, à partir de différentes sources en ligne, de conseils d'un membre de l'ONERA, et d'un calcul à partir d'un Coefficient de pression. Les aérofreins sont au nombre de 4 et ont comme dimension 2cmx3cm chacun. L'excel calcule la taille des couches limites en fonction du Mach, qui sont en moyenne de 0,5cm:

Mach pré-choc	Mach post-choc	Coefficient de pression (démiré)	Pression statique post-choc	Pression statique demiré plaqué	Pression totale devant plaque (Pa)	Densité post-choc	Température post-choc	Force sur l'aérofrein (sans CL)	Force sur l'aérofrein (avec CL)
1.2	0.842	-0.12	1.513	1.444	2.187	1.643	330.671	44.80	33.12
1.15	0.875	-0.12	1.376	1.297	2.057	1.537	321.462	45.55	33.66
1.1	0.912	-0.12	1.245	1.138	1.933	1.432	312.187	47.70	35.23
1.05	0.953	-0.12	1.120	0.972	1.817	1.328	302.778	50.72	37.44
1	1.000	-0.21	1.000	0.820	1.708	1.225	293.150	53.29	39.32
0.95	0.950	-0.19	1.000	0.853	1.639	1.225	293.150	47.16	34.71
0.9	0.900	-0.155	1.000	0.913	1.574	1.225	293.150	39.62	29.08
0.85	0.850	-0.12	1.000	0.928	1.512	1.225	293.150	35.15	25.73
0.8	0.800	-0.12	1.000	0.934	1.453	1.225	293.150	31.14	22.72
0.75	0.750	-0.12	1.000	0.942	1.398	1.225	293.150	27.37	19.90
0.7	0.700	-0.12	1.000	0.950	1.347	1.225	293.150	23.84	17.28
0.65	0.650	-0.12	1.000	0.957	1.299	1.225	293.150	20.56	14.85
0.6	0.600	-0.12	1.000	0.963	1.255	1.225	293.150	17.52	12.61
0.55	0.550	-0.12	1.000	0.969	1.214	1.225	293.150	14.72	10.56
0.5	0.500	-0.12	1.000	0.974	1.177	1.225	293.150	12.16	8.68
0.45	0.450	-0.12	1.000	0.978	1.143	1.225	293.150	9.85	7.02
0.4	0.400	-0.12	1.000	0.984	1.113	1.225	293.150	7.79	5.53
0.35	0.350	-0.12	1.000	0.987	1.087	1.225	293.150	5.96	4.22
0.3	0.300	-0.12	1.000	0.991	1.064	1.225	293.150	4.38	3.16
0.25	0.250	-0.12	1.000	0.994	1.044	1.225	293.150	3.04	2.16
0.2	0.200	-0.12	1.000	0.996	1.028	1.225	293.150	1.95	1.39
0.15	0.150	-0.12	1.000	0.998	1.016	1.225	293.150	1.09	0.80
0.1	0.100	-0.12	1.000	0.999	1.007	1.225	293.150	0.49	0.39
0.05	0.050	-0.12	1.000	1.000	1.002	1.225	293.150	0.12	0.10

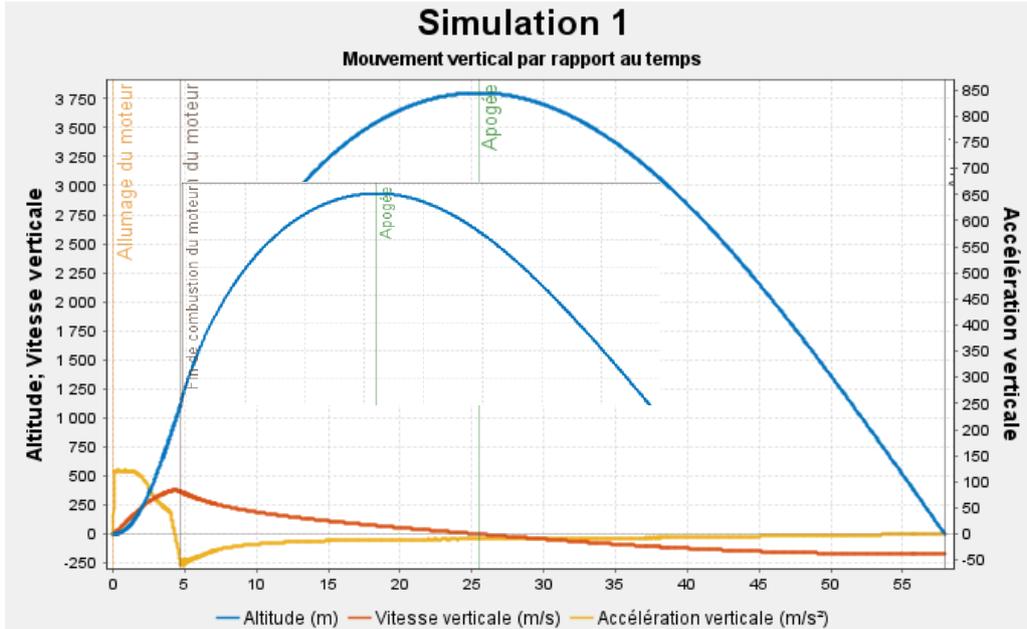
1^{ère} méthode de calcul à partir d'un Kp

Mach pré-choc	Mach post-choc	Cd (Mach post-choc)	Pression statique post-choc	Densité post-choc	Température post-choc	Force sur l'aérofrein (sans CL)	Force sur l'aérofrein (avec CL)
1.2	0.842	1.17	1.513	1.643	330.671	47.30	34.96
1.15	0.875	1.17	1.376	1.537	321.462	47.76	35.29
1.1	0.912	1.17	1.245	1.432	312.187	48.31	35.68
1.05	0.953	1.17	1.120	1.328	302.778	48.95	36.14
1	1.000	1.17	1.000	1.225	293.150	49.71	36.68
0.95	0.950	1.17	1.000	1.225	293.150	44.86	33.02
0.9	0.900	1.17	1.000	1.225	293.150	40.26	29.55
0.85	0.850	1.17	1.000	1.225	293.150	35.91	26.28
0.8	0.800	1.17	1.000	1.225	293.150	31.81	23.21
0.75	0.750	1.17	1.000	1.225	293.150	27.96	20.33
0.7	0.700	1.17	1.000	1.225	293.150	24.36	17.65
0.65	0.650	1.17	1.000	1.225	293.150	21.00	15.17
0.6	0.600	1.17	1.000	1.225	293.150	17.89	12.88
0.55	0.550	1.17	1.000	1.225	293.150	15.04	10.78
0.5	0.500	1.17	1.000	1.225	293.150	12.43	8.88
0.45	0.450	1.17	1.000	1.225	293.150	10.07	7.17
0.4	0.400	1.17	1.000	1.225	293.150	7.95	5.65
0.35	0.350	1.17	1.000	1.225	293.150	6.09	4.31
0.3	0.300	1.17	1.000	1.225	293.150	4.47	3.16
0.25	0.250	1.17	1.000	1.225	293.150	3.11	2.20
0.2	0.200	1.17	1.000	1.225	293.150	1.99	1.42
0.15	0.150	1.17	1.000	1.225	293.150	1.12	0.82
0.1	0.100	1.17	1.000	1.225	293.150	0.50	0.39
0.05	0.050	1.17	1.000	1.225	293.150	0.12	0.11

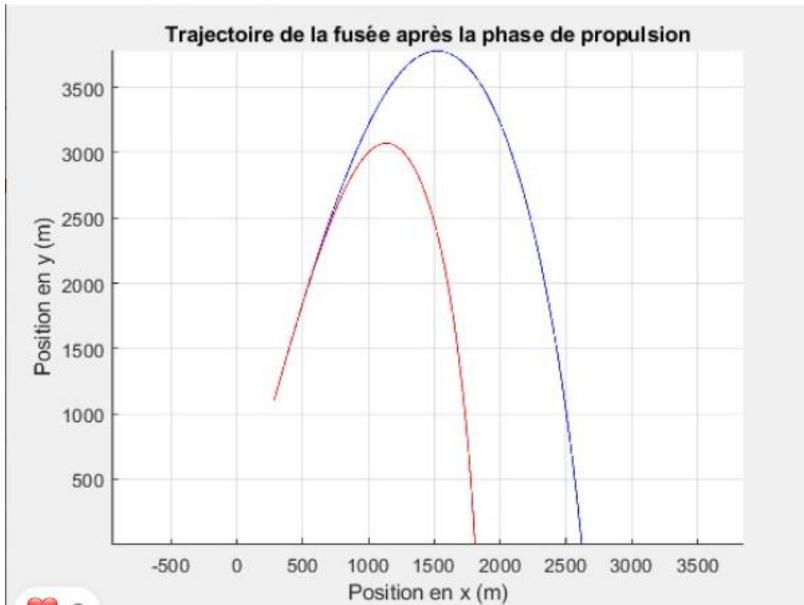
2^{ème} méthode de calcul à partir d'un Cd

Cependant, cela ralentissait considérablement la fusée, et ne permettait donc pas d'atteindre Mach 1.2 sur la simulation. Afin de corriger cela, des boosters ont été ajoutés afin d'atteindre le même Vmax que sur la première simulation.

L'entièreté des secondes courbes d'altitudes, de vitesse et d'accélération sont fausses jusqu'à la fin de combustion. A partir de là, on peut superposer les deux courbes pour avoir un aperçu de la trajectoire :



Ce résultat, d'une apogée à environ 2950m, est confirmée par un Matlab réalisé indépendamment de l'openrocket :



	Altitude Max (m)	Portée Max (m)	T à x=0 (s)
Sans	3779.3622	2620.459	52.9836
Avec	3071.5693	1808.7717	48.1819

Organisation

Planning

Septembre-Octobre : Documentation, dimensionnement et début de conception 3D, MEF et CFD réalisées. Structure limitée par les avancements des autres pôles

Novembre : CAO et conceptions des sous-systèmes (avioniques, récupération, expérience) complètes. Début de la CAO globale du point de vue structure

Décembre : Commande des bruts critiques (aluminium, acier et peaux). Méthodes de fabrications validées. CAO complète et validée par MEF.

Début janvier : CDR

Janvier-Février-Mars : Potentielles mises à jour suite à la RCE-2, début d'usinage et de fabrication, mise en place de protocoles de tests (compression, soufflerie, etc...)

Avril-Mai-Juin : Fin de la fabrication des sous-systèmes, assemblage et intégration, tests finaux (plusieurs semaines avant le C'Space, simuler un test complet)

Acquis et données d'entrées

- Architecture, avionique, aérodynamique et récupération d'ESL-1
- Dimensionnement partiel réalisé au préalable
- Contraintes par le cahier des charges C'Space et NAGA
- Sponsor pour les tests : IAT Saint-Cyr
- Autres sponsors : JLCPCB, Acier détail découpe, EOS composites

Pôle structure : PITA 3A

Responsable de pôle : Yanis BENKIRANE

Membres :

Yanis BENKIRANE, Tom BERTHELOT, Ali BOUDIKANE, Gaëlle GIRAUD, Constantin REGNIER

Missions :

Conceptions et fabrications des éléments structurants : bagues de liaisons, reprise de poussée, accroche des ailerons

Architecture interne et optimisation de masse

Assemblage

Pôle aérodynamique/expérience : PITA 4A

Responsable de pôle : Rémi HAULIN

Membres :

Arthur CHARMASSON, Adrien GIRAUD, Rémi HAULIN, Caroline HULOT, Paul PELLOSI, Rémi PERRIER-GUSTIN

Missions :

Conception et fabrication des aérofrenes et de leur système de déploiement

Conception et fabrication de la coiffe et des ailerons

Gestion de la trajectoire, du stabtraj et de l'openrocket

Assemblage

Pôle avionique/récupération :

Responsable de pôle : Gaétan PILAUDEAU

Membres :

Ange CLOUTOUR, Edouard DESPREZ, Alban DETHUNE, Daniel DEVY, Théodore FLOREA, Clément HAULIN, Gaétan PILAUDEAU, Jérémy ROUEDE, Bastien ROYER

Missions :

Conception et fabrication du système de récupération et du parachute

Conception et fabrication du rack avionique

Gestion de l'avionique et de la minuterie, ainsi que des cartes électroniques

Gestion de l'enregistrement des données et de la lecture des capteurs ;

Assemblage

Budget Estimé

En se basant sur les dépenses d'ESL-1, et sur des recherches préalables, voici une estimation du budget nécessaire pour la conception de la fusée (Frais liés à Planète Science exclus) :

Peau carbone/fibre de verre : 0 si sponsors ou matériel déjà possédé, sinon 100 €

Structure interne et visserie : 120 €

Impression 3D : Caisson avionique, pièces de maintien, bagues de centrage : 40 €

Prototypes : 50 €

Bruts d'aluminiums : 0 si donnés par Faux, 200 € sinon

Plaques d'aluminium pour ailerons : 60 €

Toile de parachute, suspentes et émerillons : 80 €

Avionique et électronique : 60 € d'arduino et composants divers, 0 € pour les cartes électroniques si sponsor conservé, sinon 40 € de plus

Expérience : Servo moteur et potentiel brut de métal : 70 €

Estimation basse : 580 € Estimation haute : 820 €

Avec dépenses supplémentaires, environ 900 €