



Projet ATLANTI^X

2020 - 2022

Association ELISA Space



Equipe :

Aurélien ATTARD, chef du projet

Virginie T.

Marie-Amélie P.

Quentin D.

Vue d'ensemble

Le projet AtlantiX est une minifusée aux couleurs de la Falcon 9 Crew Dragon de SpaceX (échelle ~1:65) faisant 1066 mm de haut et 2022g. Elle embarque des expériences telles que l'enregistrement de données de vol comme la pression statique, les accélérations etc. Le déploiement du parachute se réalise en éjectant ce dernier avec la coiffe.

Grandes étapes

I. Choix des expériences et conception de la fusée

Nos ambitions de réaliser plusieurs expériences en deux années et de modéliser un système unique d'éjection du parachute.

II. La réalité : construction et les problèmes à résoudre

Les détails de la construction et les problèmes rencontrés notamment sur le système d'éjection du parachute.

III. Retours d'expérience et conclusion

Analyse du vol et des données récupérées ainsi qu'un mot sur l'ensemble du projet réalisé.

I. Choix des expériences et conception de la fusée

Les expériences ont été classées par ordre de priorité. Les expériences principales qui devaient être réalisées sont :

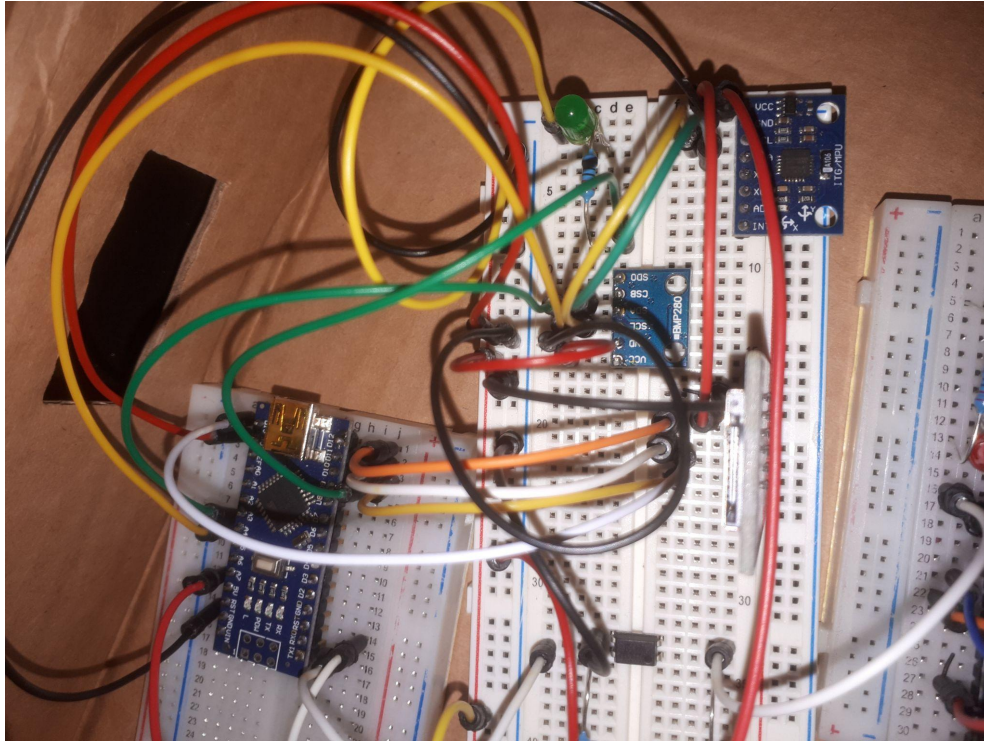
- L'enregistrement des accélérations et des accélérations angulaires sur trois axes ainsi que la pression atmosphérique en fonction du temps en vue de recréer l'évolution de l'altitude de la fusée.
- Le déclenchement de l'ouverture du parachute par détection de l'apogée via un capteur de la pression ambiante.

Ensuite, d'autres expériences ont été placées en seconde priorité comme non essentiel au projet si nous n'aurions pas eu le temps et la place de les intégrer :

- Le déploiement des quatre jambes d'atterrissage à la manière de SpaceX dans le but purement esthétique. Ces jambes n'ont pas la robustesse ne serait-ce que de simplement faire tenir la fusée debout dessus.
- Intégrer une caméra embarquée mais cette expérience était jugée peu probable à mettre en place au vu de ce qu'il y aura à faire avant cela.

L'électronique du séquenceur et des expériences :

Le séquenceur devait être géré par une carte Arduino Nano dans l'objectif de déployer le parachute à la toute fin de la fenêtre de déploiement au cas où l'expérience échouerait à la détection de l'apogée. Une prise jack reliée à cette carte suffisait à détecter le décollage afin de démarrer la minuterie. Quant à la carte expérience, une autre Arduino Nano, elle devait enregistrer des données en fonction du temps alors elle devait aussi recevoir le signal de départ pour poser le t_0 . La carte séquenceur pouvait communiquer cette information via des optocoupleurs pour isoler les deux cartes électriquement, chacune alimentée par une pile 9V. Pour les données de la carte expérience, il fallait un module BMP280 pour mesurer la pression (et pourquoi pas la température) ambiante, un MPU6050 pour mesurer les accélérations sur les trois axes et enfin un module micro SD Adapter pour enregistrer toutes ces données sur une carte micro SD en fichier texte.



Prototypage sur platine d'essai de l'électronique embarquée

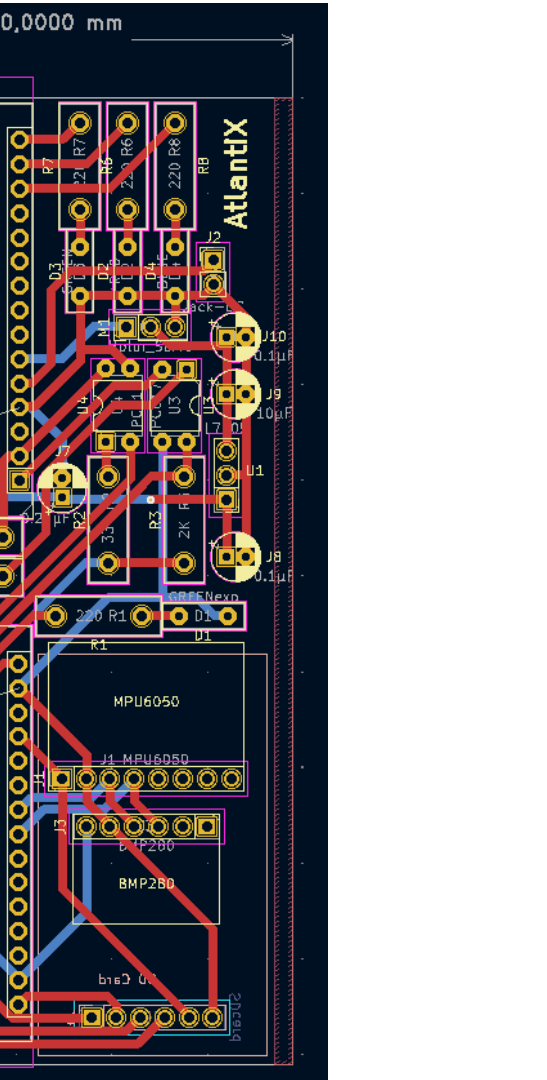
Mais cela n'est pas tout, il fallait des LEDs pour pouvoir voir l'état de l'électronique en marche depuis l'extérieur du fuselage. Quatre LEDs ont été choisies pour :

- Vert continu : La carte séquenceur est sous tension
- Rouge clignotant : La prise jack n'est pas branchée, Rouge éteint : Jack branché, Rouge continu : Jack arrachée, en décollage
- Bleu continu : Lorsque la carte séquenceur a ouvert le parachute
- Blanc continu : Lorsque la carte expérience a ouvert le parachute suite à une détection d'apogée.

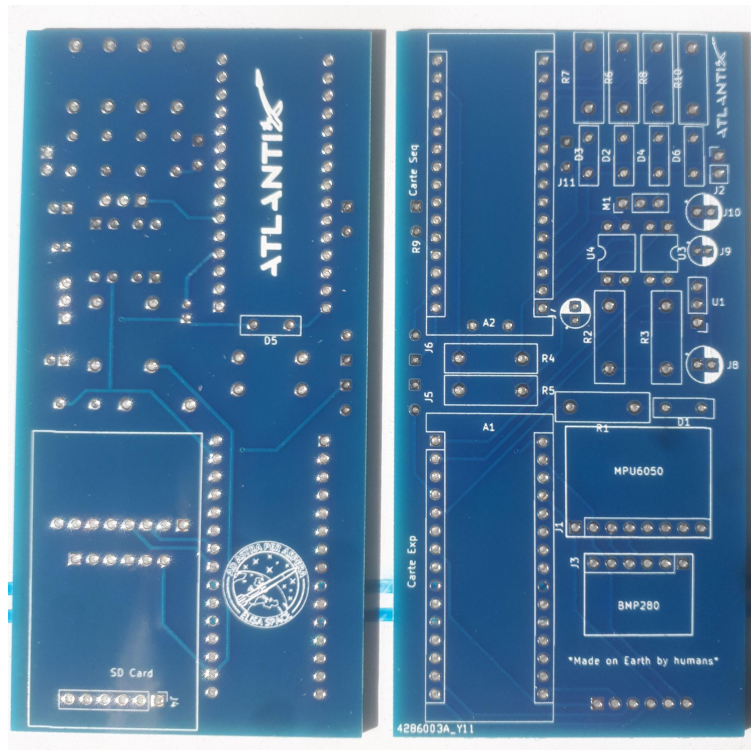
Ensuite, un servomoteur devait déclencher le système d'éjection de la coiffe et du parachute par un système de goupille retenant des ressorts en compression. Le système d'éjection n'était alors pas encore réfléchi. Un second servomoteur pouvait trouver sa place dans l'électronique pour déployer les jambes. Ces servos sont déclenchés par la carte séquenceur. Si la carte expérience détecte l'apogée, alors elle envoie un signal à la carte séquenceur pour déclencher les servos.

Des tests de prototypage ont permis de mettre en évidence qu'un servomoteur n'a pas assez de puissance électrique via la sortie 5V de l'arduino. Pour régler ce problème, il fallait les alimenter directement depuis la pile 9V en utilisant un régulateur de tension 5V et ainsi profiter pleinement de l'intensité que peut fournir la pile.

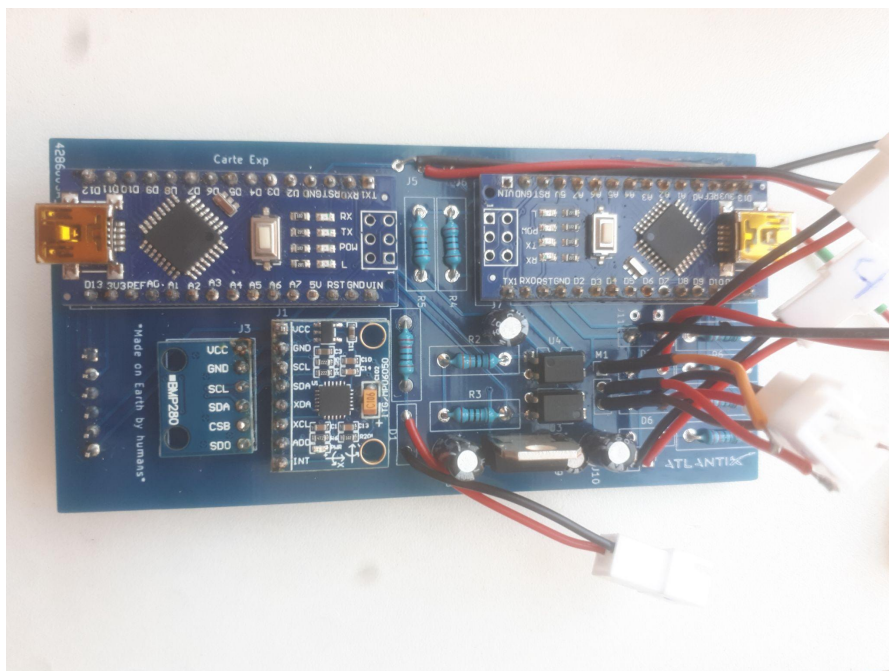
5.0 afin de concevoir un PCB où tous les :



alisé sur KiCad



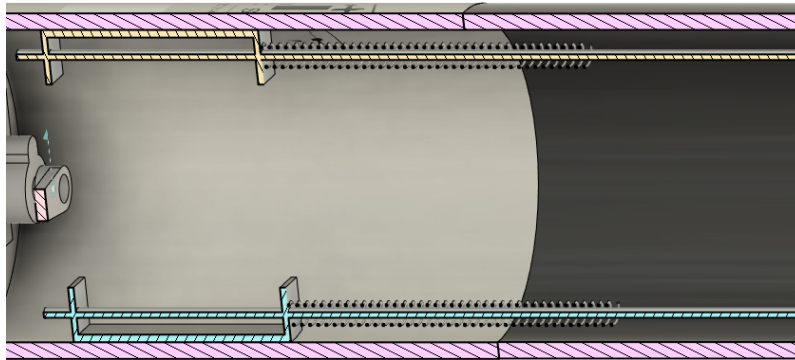
Circuit imprimé recto-verso



Composants et fils soudés sur le circuit imprimé

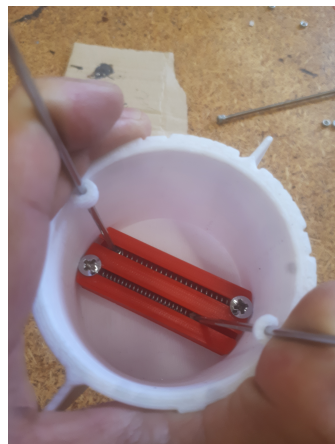
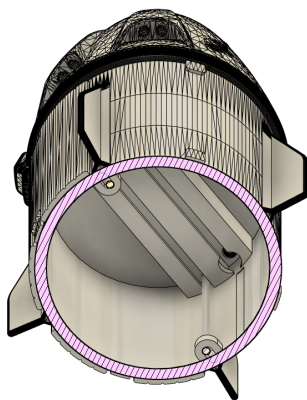
Concernant la structure de la fusée, la hauteur totale devait faire 1066 mm pour un diamètre externe de 63 mm. Le fuselage est un tube de PVC car léger et facile à usiner. Les ailerons devaient être au nombre de quatre pour les placer entre chaque jambe et être en plexi transparent afin de rendre les jambes plus visibles. Le plexi devait être résistant, ici 5 mm d'épaisseur sont suffisant à la flexion simple. Le fuselage devait être scindé en deux parties entre la case électronique et la goupille d'éjection du parachute pour une maintenance accessible. Enfin, après une longue réflexion sur le système d'éjection par la coiffe, celui-ci se fera en deux parties :

- Une partie fixée au fuselage composée de deux longues tiges en acier en guise de rail de guidage où un long ressort de compression posé sur chaque tige assurera la propulsion du parachute et de la coiffe.



Partie fixée au fuselage propulsant la coiffe, FUSION 360

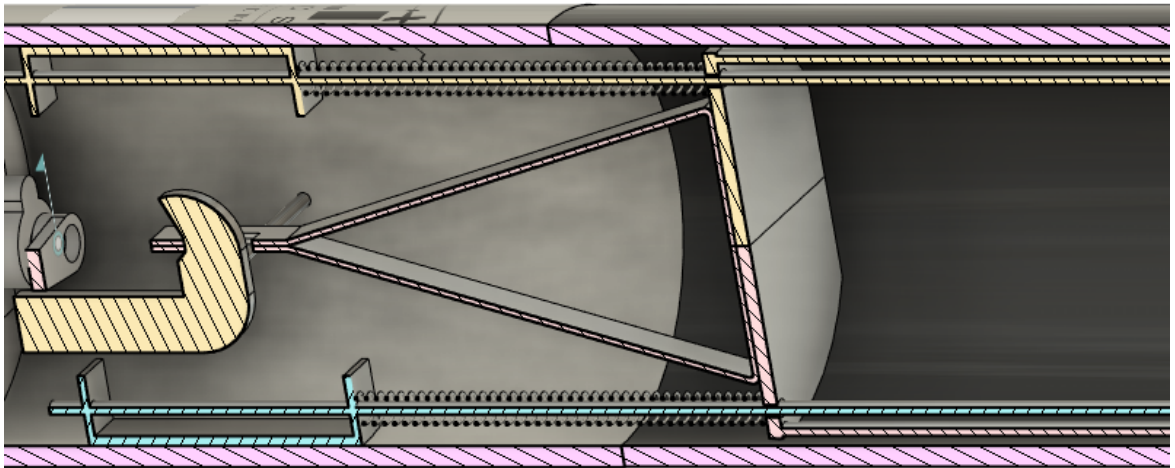
- Une autre partie qui est une cage pour le parachute fixée à la coiffe et donc éjectée aussi. Cette cage est constituée de deux parties ouvrantes pour libérer le parachute après son éjection grâce à un système de ressorts de traction situé dans la coiffe.



Système d'ouverture de la cage dans la coiffe

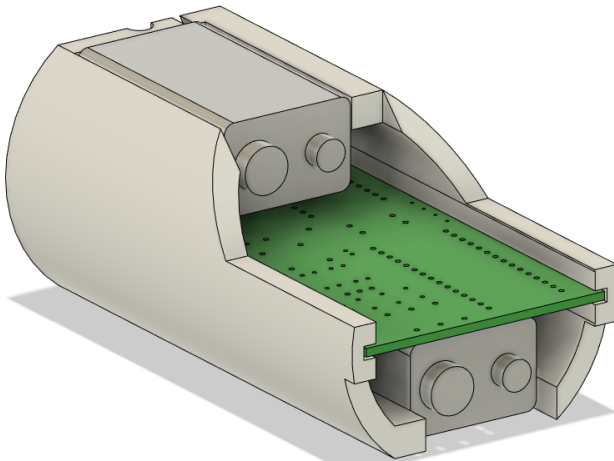
La cage est par défaut ouverte. Elle est maintenue fermée par la paroi du fuselage et les ressorts de la coiffe sont maintenus sous traction. Dès que la cage est totalement sortie du fuselage, elle s'ouvre en deux immédiatement mais elle cause beaucoup de friction contre le tube à cause de ces ressorts de traction voulant l'ouvrir, c'est un problème qu'on trouvera en détails dans la construction.

Enfin un mécanisme de goupille permet à un seul servomoteur de libérer la cage qui comprimait les longs ressorts de compression pour ainsi éjecter le tout.



Goupille fixée sur un axe retenant la cage parachute et maintenue par un servomoteur.

Après l'électronique réalisée, il fallait l'intégrer dans la fusée de manière à ce que le PCB soit facilement retirable notamment pour pouvoir faire des essais sur la carte micro SD embarquée. Sur FUSION 360 on a conçu une cage pouvant faire coulisser le PCB et même plaquer contre celle-ci les piles 9V afin de gagner en place :

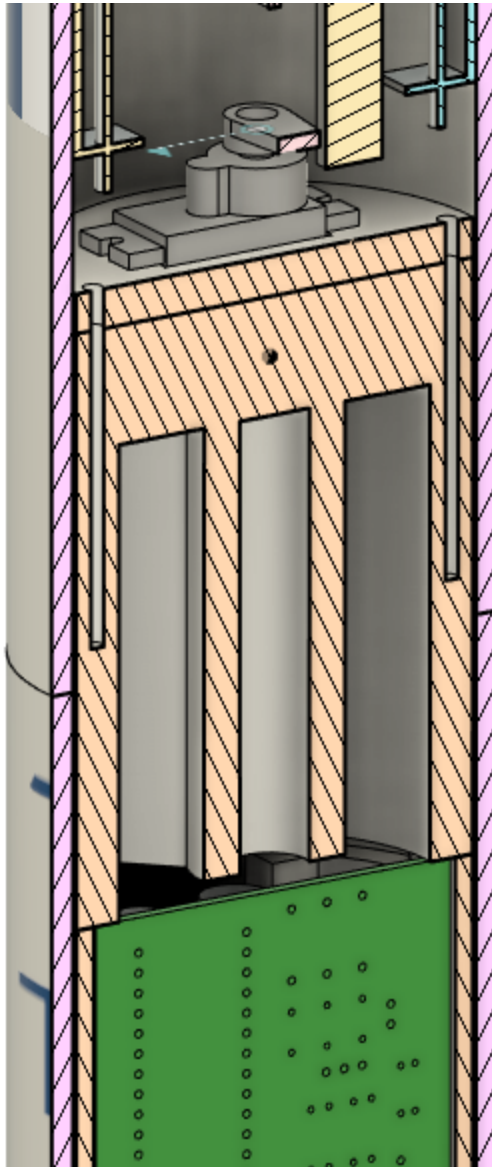


Casier électronique conçu sur FUSION 360

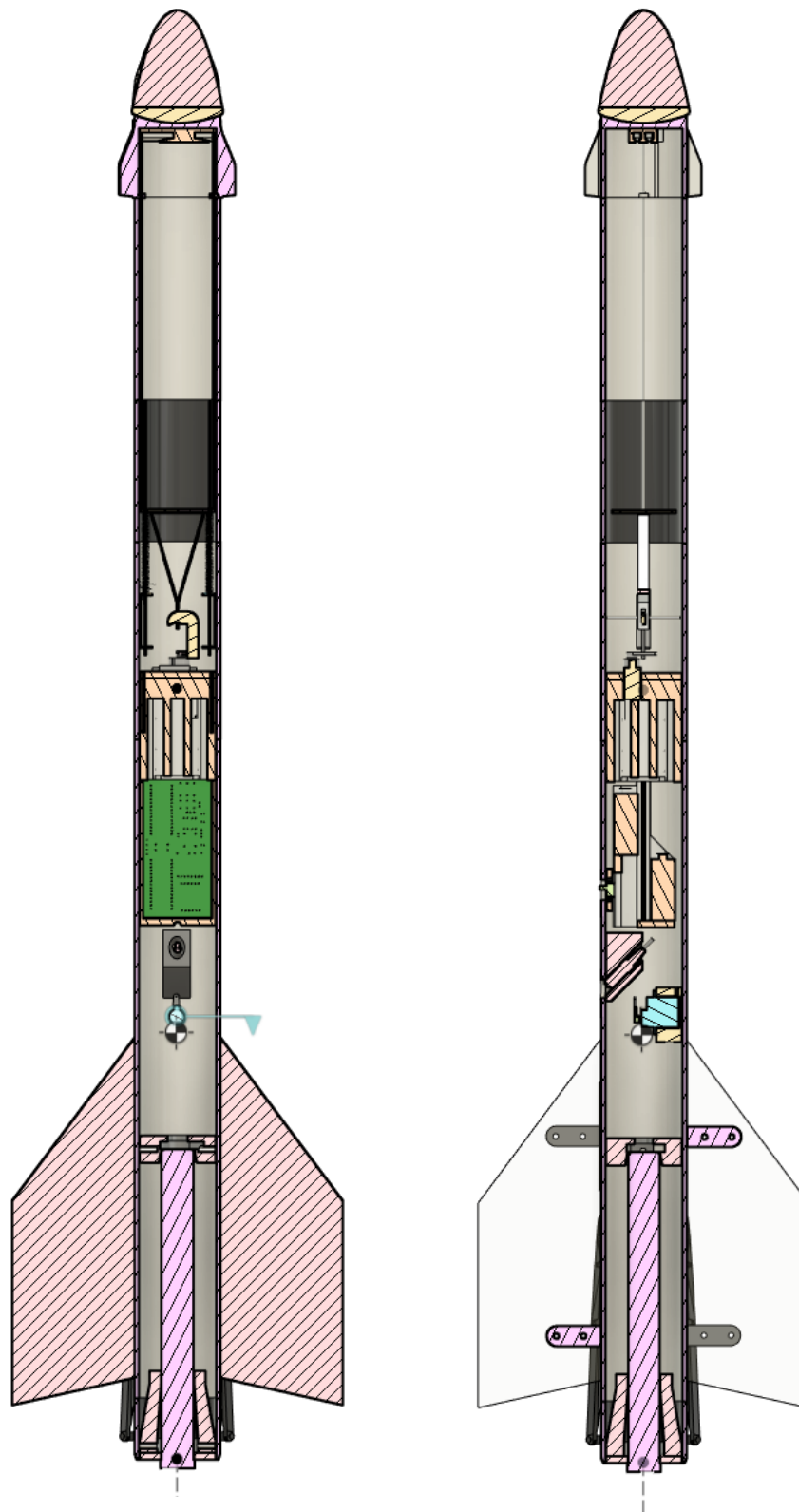
La coiffe (Crew Dragon) ainsi que les jambes sont des fichiers STL que l'on peut retrouver gratuitement sur le site [thingiverse.com](https://www.thingiverse.com). Ces derniers ont été mis à l'échelle et modifiés pour correspondre au besoin du projet.

- Crew Dragon par AstroNot : <https://www.thingiverse.com/thing:4659177>
- Jambes (Landing Legs) par AntsinAfrica : <https://www.thingiverse.com/thing:2914233>

Un centrage long est nécessaire pour lier les deux fuselages en un tout en gardant la rigidité :



Centrage long (hachuré en orange) qui loge le servomoteur de la goupille

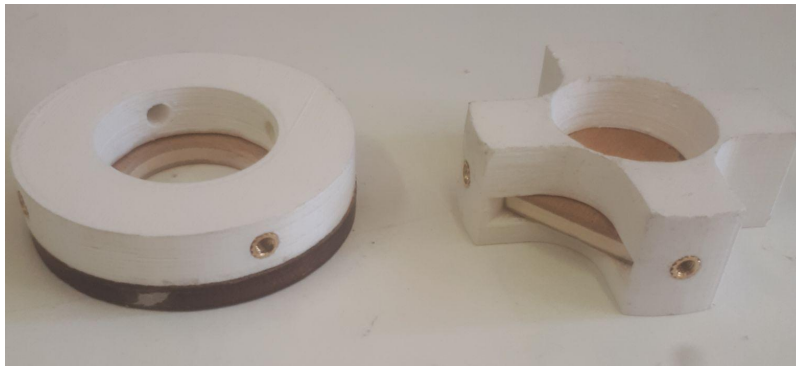


Vues en coupe de la fusée AtlantiX

II. La réalité : construction et les problèmes à résoudre

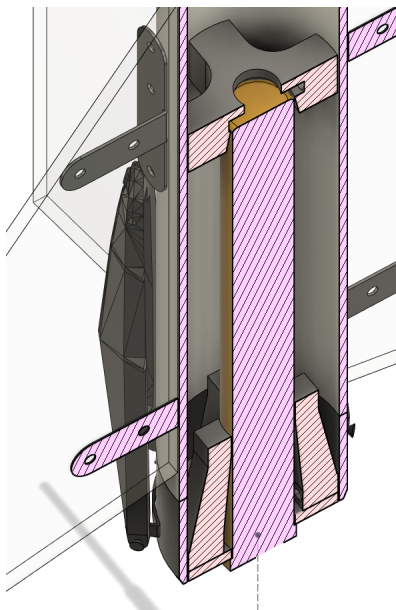
Les bagues moteurs :

Conçues entièrement en plastique PLA imprimé en 3D au départ, elles n'étaient pas conseillées au risque de fondre avec la chaleur du propulseur. Ensuite une version hybride PLA et bois faisait l'affaire :



De gauche à droite : bague bas moteur et bague sur le haut du moteur

Le problème de ces bagues était que lorsqu'on insérait le propulseur Pandora, rien ne le guidait pour que le haut du moteur entre dans la bague du haut. Alors la bague du bas a été repensée de manière à ce que le moteur soit guidé verticalement :



Bagues de maintien du propulseur Pandora

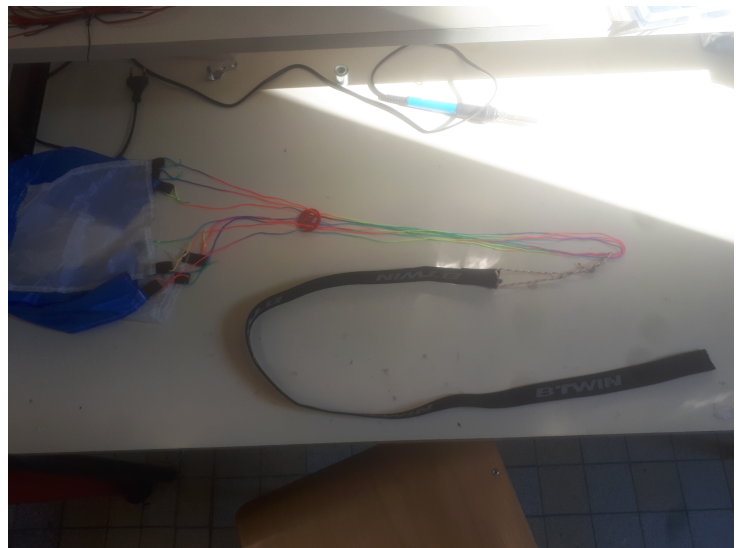
Le parachute :

Au début nous étions partis sur l'idée de faire atterrir lentement la fusée d'où la création d'un parachute en croix très grand de 40 cm de côtés :



Parachute carré de 40 cm de côtés

Le parachute a été trop grand et a causé tellement de frictions contre le fuselage que la cage parachute ne s'éjecte pas alors un nouveau parachute a été fabriqué et cette fois-ci pour minimiser les frottements avec la paroi, la surface minimale autorisée a été choisie, soit 18 cm de côtés pour 15 m/s en vitesse de chute:



Parachute final de 18 cm de côtés

Les suspentes sont en fil de nylon pour bracelet, la bague anti-torche en impression 3D et un émerillon de pêche est relié à une sangle qui est elle-même vissée contre le fuselage sous la cage parachute.



Sur la photo de droite, au fond il y a deux demi-cercles en aluminium correspondant au bas de la cage parachute. Ces demi-cercles sont coupés sur la droite afin de laisser passer la sangle noire du parachute qui est vissée contre la structure avec deux vis M4.

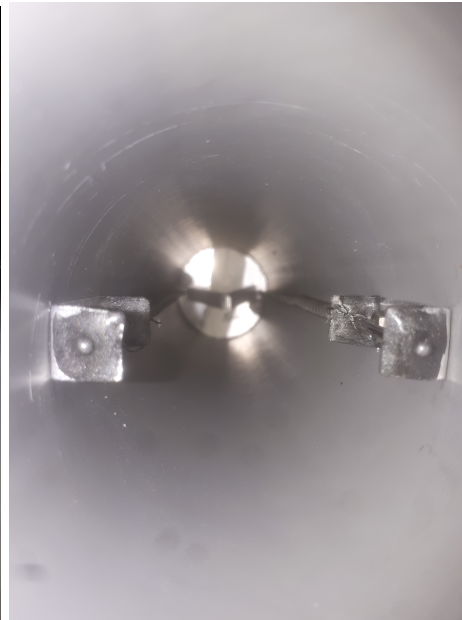
Vous apercevez ces deux millefeuilles en croissant collés sur le fuselage ? Ce sont des feuilles de plomb de pêche pour réhausser le centre de masse de la fusée qui était beaucoup trop bas et la rendant ainsi stable.

Sangle du parachute vissé au fuselage sous la cage parachute

Pour réduire davantage les frictions notamment causées par la cage, du lubrifiant sec au PTFE a été appliqué sur la paroi interne du tube.

La cage parachute :

Elle est fabriquée à partir de tiges en acier et des plaques en aluminium :



Fabrication de la cage parachute et de la partie fixe à ressorts de compression

Une chaussette a été ajoutée sur la cage de parachute. Elle s'enroule autour du parachute pour éviter qu'il ne s'emmêle dans les tiges de la cage et pour aussi mieux comprimer le parachute dans un petit volume réduisant les frottements contre le tube. La coiffe est reliée à la sangle du parachute par une ficelle de nylon comme pour les suspentes. La ficelle est solidement collée sur le PLA de la coiffe avec de la colle chaude simplement.



Parachute, coiffe et cage (ouverte) reliés ensemble

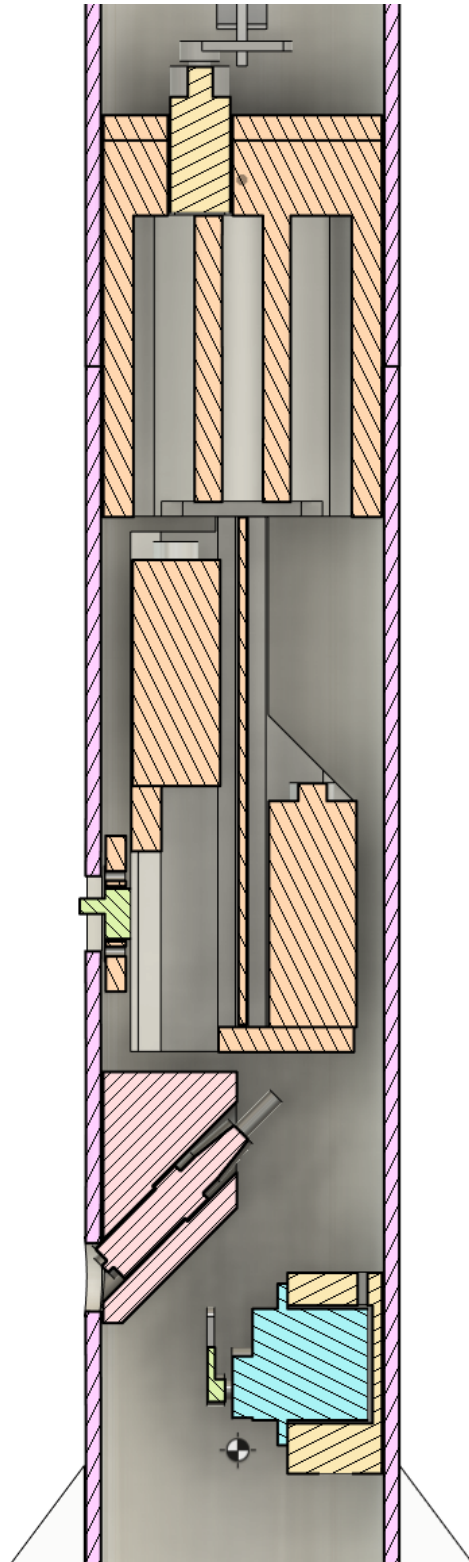
Problème, la cage ne s'éjecte toujours pas suffisamment bien. On pouvait simplement se dire de mettre des ressorts de compression plus long mais on avait déjà atteint la longueur maximale de compression car en comprimant au maximum, les spires du ressort se mettent en contact les uns sur les autres et impossible d'aller plus loin, il n'y avait plus de place pour quelques spires supplémentaires. Il a fallu repenser un nouveau système fixe pour pouvoir mettre des ressorts plus longs. Les tiges en guise de rail étaient initialement fixées contre le fuselage et plus bas se trouve le centrage long en PLA. Alors on a pris des tiges en acier plus grandes directement fixées dans le centrage long et des ressorts bien plus longs ont pu être installés. Cela a permis de rendre l'éjection plus efficace.



Ressorts de compression et tiges plus longs fixés sur le centrage long

Le centrage long relie les deux parties du fuselage en utilisant des inserts dans le PLA et des vis M3.

Le casier électronique aussi imprimé en PLA est couvert par le centrage long qui se met au-dessus. Des connecteurs JST permettent de brancher et de débrancher le PCB des composants fixés à la fusée telles que la prise Jack, les deux interrupteurs pour allumer les deux arduinos, les leds et les servomoteurs. La prise jack femelle est fixée par une pièce imprimée, de même pour le servomoteur servant au mécanisme de libération des jambes.



De haut en bas : Centrage long et servo du parachute, casier électronique, refuge de la prise jack et servo des jambes

Par manque de temps et vu que c'était une expérience secondaire, le mécanisme de libération des jambes est très rudimentaire.



Jambes de la fusée

Des tiges en acier avec collés dessus des trombones façonnés en U pour les articulations. La colle utilisée est une colle pour métaux en résine époxy couverte par une gaine thermique pour rendre le tout plus rigide. Au bout de chaque pied, il y a un crochet en U libre qui sert à une goupille de maintenir la jambe pliée contre le fuselage.

Il y a donc quatre goupilles qui sont en réalité des fils de cuivre qui passent dans le petit crochet du pied. Les goupilles sont reliées par des ficelles jusqu'au servomoteur situé au-dessus du propulseur. Le servo en tirant sur les goupilles, libère les jambes mais la friction est telle que le servomoteur ne suffit pas pour les tirer mais ce n'était qu'une expérience de loisir non essentielle au projet. Par ailleurs, il n'y avait ni le temps ni la place dans la fusée pour insérer une caméra.

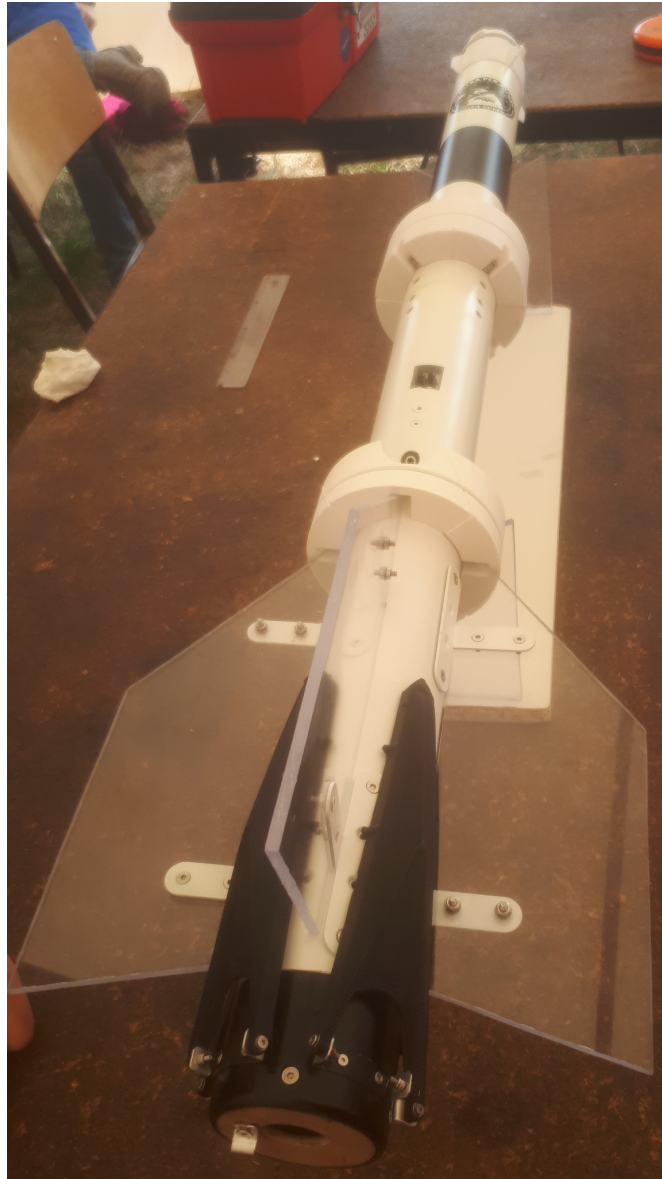
Les ailerons :

Quatre ailerons en plexi de 5 mm d'épaisseur et fixés au fuselage par des équerres. Deux équerres en opposition par aileron.



Ailerons

Enfin, lors des contrôles au C'Space, les suiveurs ont jugé qu'il était nécessaire de mettre des coques pour la rampe en cage, à cause des jambes.



Deux rangées de coques en PLA

Ces coques ont pour but de guider la fusée dans la rampe et de tomber au sol dès que la fusée sort de la rampe. Finalement, lors de l'insertion de la fusée dans la rampe, les coques pivotent sur elles-mêmes empêchant la fusée de glisser dedans alors on les a retiré et la fusée est bien partie dans les airs.

III. Retours d'expérience et conclusion



Après impact au sol, le centrage long a cédé

La fusée a réalisé un vol nominal. Sur l'extrait vidéo ajouté dans le dossier compressé on voit la fusée chuter rapidement sous son parachute de faible surface mais c'était le prix à payer pour que l'éjection soit possible. Les jambes ne se sont pas déployées, ceci était pressenti vu le système rudimentaire avec beaucoup de frictions mais ce n'était que pour le spectacle des yeux. L'impact au sol a décoincé deux des quatres jambes.

Concernant la détection d'apogée, elle n'a pas pu se faire car les suiveurs n'ont pas pris le risque que le vent empêche la coiffe de sortir donc il a fallu modifier la minuterie pour forcer l'ouverture du parachute juste avant l'apogée. L'ouverture était forcée à 5s après le décollage. L'apogée se situe théoriquement à 6,2s selon StabTraj à 176 mètres seulement car la fusée est lourde (2022 grammes, ce nombre n'était pas fait exprès ^^).

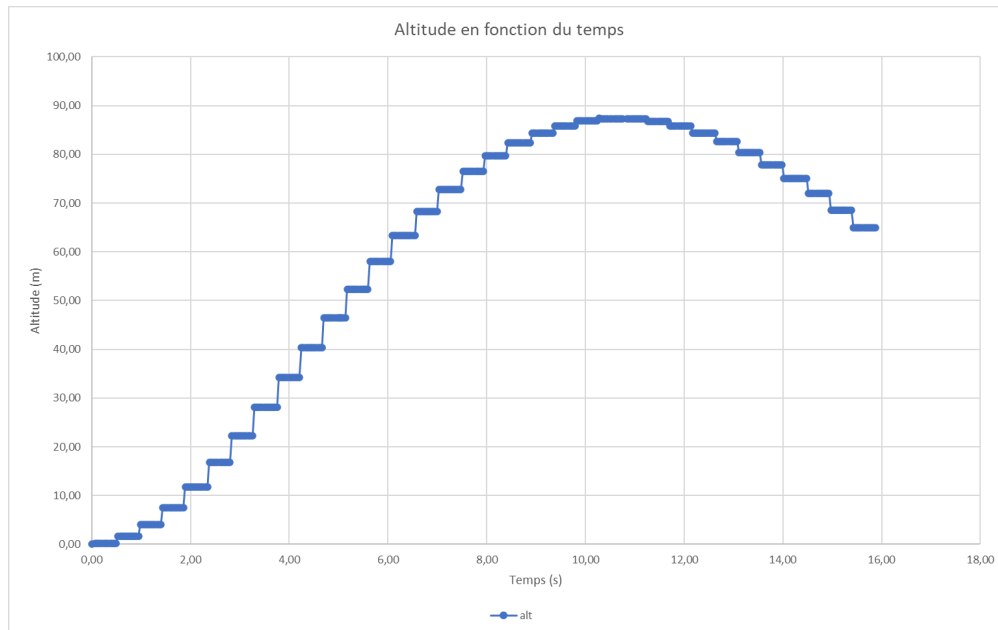
En exploitant les mesures de la pression statique ambiante, nous pouvons en déduire l'altitude en fonction du temps grâce à l'équation de Bernoulli en statique des fluides :

$$P_0 + \rho g z_0 = P_1 + \rho g z_1$$

Ici le fluide reste le même : l'air. Les indices 0 signifient qu'on se trouve au sol, à une altitude $z_0 = 0$ mètre, donc l'équation devient alors :

$$P_0 = P_1 + \rho g z_1$$

En prenant P0 comme la première lecture inchangée de la pression quand la fusée arrache la prise jack au décollage et P1 les lectures suivantes, pour $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$ et $g=9,81 \text{ m/s}^2$ on obtient z1 l'altitude correspondante à chaque lecture P1 :



A première vue, la cloche semble s'arrêter et pourtant, la durée du vol prévu par StabTraj est de 16 secondes et à l'impact, le casier électronique a glissé vers le bas dû à son inertie et a fait glisser les interrupteurs des arduinos sur OFF. Les données se sont donc arrêtées au moment de l'impact. En regardant l'extrait vidéo, la fusée semble atteindre son apogée entre 5 et 6 secondes. En réalité, le capteur de pression n'est pas assez réactif et a de la latence face à un changement brutal de pression. Par ailleurs, la fusée est montée bien plus haut que les 87 mètres du graphique (176 m StabTraj). Ensuite il s'avère que les données sont en "escalier", cela est possiblement dû au débit utilisé (9600 bauds).

En conclusion, réaliser une ouverture du parachute par la coiffe est difficile mais faisable. Ce projet a tenu les limites de temps malgré que le chef de projet ait contribué à 99.9% du projet. Au cours de cette année, ce projet et les erreurs faites sont des opportunités d'apprendre davantage et d'acquérir de l'expérience en tant que futur ingénieur. Ceci est aussi valable pour les membres du club qui ont lancé cette année leur minifusée et désormais nous formerons une plus grande équipe avec une expérience acquise pour réaliser une fuseX sur au moins deux ans avec des expériences plus techniques.



Aurélien Attard, chef du projet

Les fichiers StabTraj, données de vol et l'extrait vidéo sont disponibles dans le dossier compressé de ce rapport.

Rédigé par Aurélien ATTARD, 2022

Chef du projet AtlantiX

Président d'ELISA Space