

CESI AERO

# Minif TOR-1

Rapport de projet



## Table des matières

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Equipe et remerciements :                                 | 2  |
| Remerciements :                                           | 2  |
| Equipe de TOR-1 :                                         | 2  |
| Les médias du projet :                                    | 2  |
| TOR-1 Rappel du projet :                                  | 2  |
| Définition de l'objectif principale :                     | 2  |
| Définition du cahier des charges :                        | 3  |
| Choix de la structure sur Stabtraj :                      | 3  |
| Le FDM, une technologie qui demande de la planification : | 3  |
| Dimensions finales de la fusée :                          | 6  |
| Composants choisis et explication :                       | 6  |
| Liste :                                                   | 6  |
| Eléments notables :                                       | 6  |
| Réalisation de la fusée :                                 | 7  |
| Modélisation 3D :                                         | 7  |
| Étage moteur :                                            | 7  |
| Étage parachute :                                         | 10 |
| Étage électronique:                                       | 13 |
| Étage coiffe:                                             | 15 |
| Vue complète structure:                                   | 17 |
| Électronique :                                            | 18 |
| Récapitulatif des besoins :                               | 18 |
| Fonctionnalité :                                          | 18 |
| Schéma électrique et électronique :                       | 20 |
| Séquence de vol et états possibles :                      | 21 |
| Les vols :                                                | 22 |
| Vol 1, TOR-1_Spec-1 :                                     | 23 |
| Analyse du problème :                                     | 23 |
| Impact au sol : des données inattendues :                 | 24 |
| Vol 2, TOR-1_Spec 2 :                                     | 25 |
| Demande d'un autre lancement :                            | 25 |
| Étapes prises pour régler les problèmes :                 | 26 |
| Résultat du vol :                                         | 26 |

## Equipe et remerciements :

### Remerciements :

En premier lieu, l'équipe du CESI Aéro tient à remercier le directeur du CESI Nanterre, Monsieur David Faily.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude à Monsieur Pascal Marty, responsable de communication du CESI Nanterre.

Enfin, un grand merci à Sébastien Monier, ingénieur de recherche en prototypage au CESI Nanterre.

Nous remercions aussi chaleureusement tous les volontaires du C'Space pour leur engagement et leur soutien.

### Equipe de TOR-1 :



|                    |             |                |                  |
|--------------------|-------------|----------------|------------------|
| Cyril TILHOU-TRIEP | Georges ZAM | Sacha MUSIALEK | Louis BOISAUBERT |
|--------------------|-------------|----------------|------------------|

## Les médias du projet :

[Site web CESI AERO](#)

[Site web de TOR-1](#)

[Galerie photo TOR-1](#)

[Instagram](#)

## TOR-1 Rappel du projet :

### Définition de l'objectif principale :

TOR-1 est une mini-fusée créée afin de tester la faisabilité de la fabrication additive dans le domaine spatial.

Elle s'inscrit dans un projet à long terme visant à explorer l'optimisation structurelle et la microstructure appliquées au spatial et à l'aéronautique.

Ce projet repose sur une philosophie axée sur la rapidité de production et le design sous contrainte des machines. En effet, toutes les pièces devaient être imprimables en 3D.

## Définition du cahier des charges :

- Aérodynamiquement stable
- Structure porteuse 100 % en fabrication additive FDM plastique
- Pas de vis, boulons, tiges... éléments structurels
- Baie électronique amovible sans avoir à démonter la fusée
- Réduire au maximum les ouvertures de la structure pour éviter de fragiliser la fusée
- Doit être assemblable en plusieurs parties
- Doit être transportable, avec un complément d'outils et de pièces de rechange, par une seule personne dans les transports en commun jusqu'au C'Space
- Doit être imprimable sans supports
- Expérience : caméra, Gyroscope, Accéléromètre, Structure en FA
- Batterie : piles 9 V (précédemment LiPo avec BMS, changé avant le C'Space car le BMS choisi n'était pas fiable)
- Détection du lancement : Jack
- Prix : < 500 €
- Doit être Imprimable dans une machine de  $350mm^3$  (initialement prévu pour une machine de  $600_y mm * \varnothing 300_{xz} mm$ )

## Choix de la structure sur Stabtraj :

### Le FDM, une technologie qui demande de la planification :

Afin de correctement prévoir la construction de la Minif, la première étape s'est trouvée être le Stabtraj. En effet, certaines limitations du FDM nous obligent à faire des choix radicaux dès le début de la planification. Ces choix vont drastiquement impacter le profil aérodynamique et doivent donc absolument être pris en compte dès la première étape de planification.

#### Taille des ailerons :

L'un des premiers problèmes rencontrés par TOR-1 dans notre Stabtraj est la taille maximale du plateau de l'imprimante que nous comptons initialement utiliser :  $\varnothing 300_{xz} mm$ .

Ce qui veut dire que la taille de nos ailerons est limitée par :

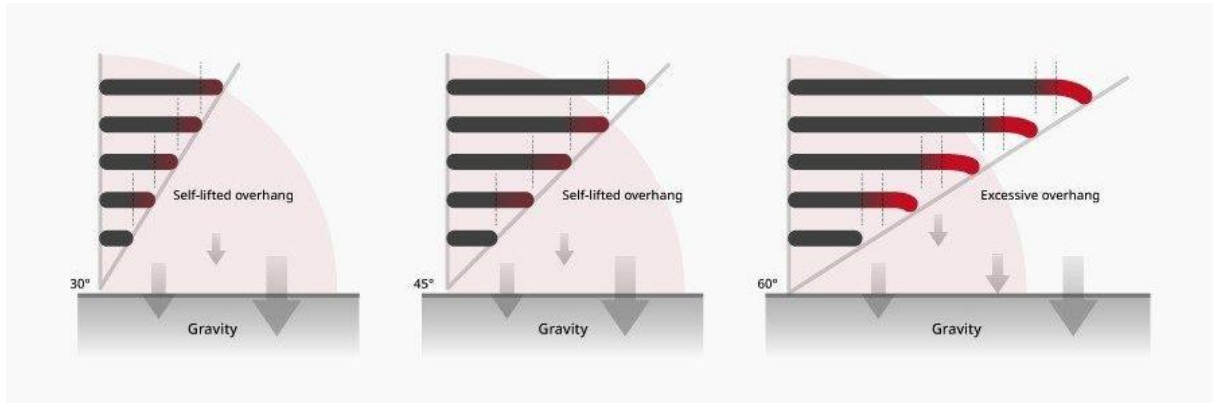
$$\sqrt{(2E + D)^2 + W^2} \leq 300mm$$

Où  $E$  = envergure des ailerons,  $D$  = diamètre de la fusée et  $W$  = largeur des ailerons.

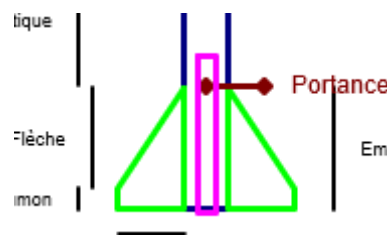
De plus, ceux-ci doivent être compatibles avec notre imprimante à 350 mm, donc limités dans cette dimension également.

### Forme des ailerons :

En impression 3D FDM, l'adhérence de la matière au plateau est critique pour le succès de l'impression. Maximiser la surface de contact avec le plateau est donc primordial. De plus, imprimer dans le vide ou avec des angles prononcés peut être complexe. Un angle supérieur à  $45^\circ$  est souvent un pari risqué. Toutefois, une imprimante bien calibrée peut gérer proprement des angles allant jusqu'à  $60^\circ$ , avec une hauteur de couche de 0,2 mm.



Au moment de définir la géométrie des ailerons, nous ne savions pas encore quel matériau allait être utilisé. Le choix a donc été fait de concevoir des ailerons en monobloc avec la partie inférieure du tube tout en maximisant leur contact avec le plateau, et en évitant les angles flottants. Cela a conduit à cette forme particulière, complètement plate à la base de la fusée.



### Longueur de la fusée et du tube :

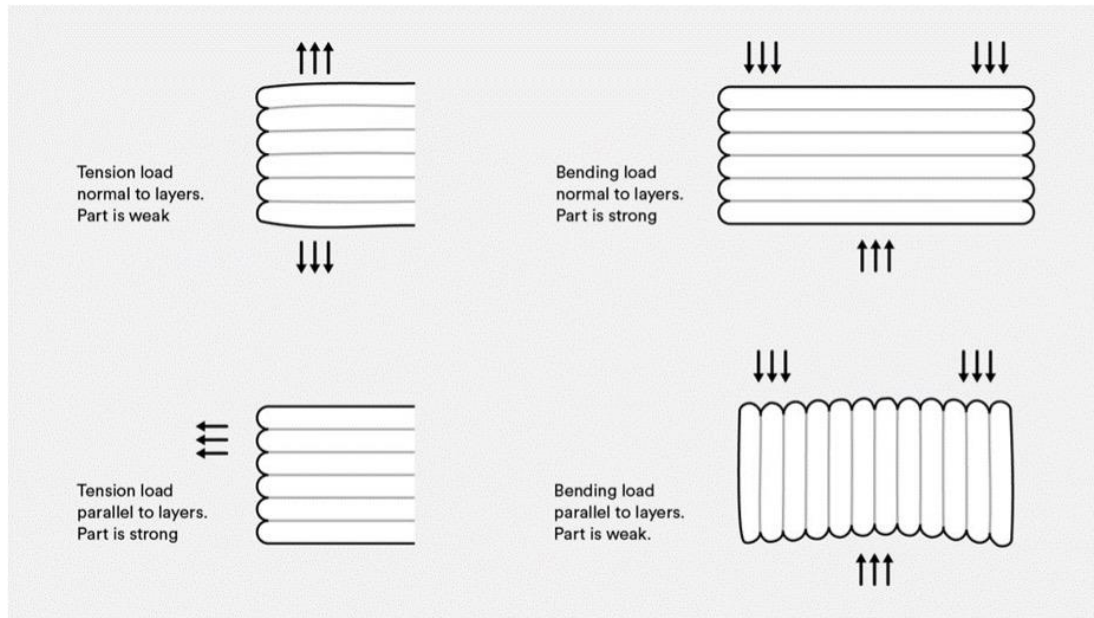
Le tube est la base de la fusée : il doit principalement contenir les composants électroniques et le moteur, tout en étant précisément dimensionné pour ne pas être trop lourd ni trop fragile.

Au moment du pré-design de la fusée, nous n'avions pas encore d'idée précise de la taille des composants internes, mais en observant les projets d'autres clubs, nous avons déterminé qu'un

diamètre interne de 50 mm serait le minimum. En prenant en compte 5 mm d'épaisseur de parois, cela nous donnait une fusée d'un diamètre externe de 60 mm.

Une partie importante reste cependant la longueur de la fusée.

En effet, le FDM est particulièrement fragile à la torsion dans la direction d'impression que nous allons utiliser.



Et surtout, nous sommes limités par la capacité d'impression de nos machines. Les machines considérées pour ce projet avaient toutes deux respectivement les tailles d'impression suivantes :

- 350<sup>3</sup>mm
- 600<sub>y</sub> mm × Ø300<sub>xz</sub> mm

Pour des raisons de disponibilité, notre projet devait donc être imprimable sur les deux machines, et surtout être solide.

Pour que le projet soit compatible sur les deux machines, cela implique donc une limite de taille sur la fusée calculée comme suit :

$$(j + 1) \times y - j \times i = \text{Taille fusée max}$$

Avec :

- $j$  = nombre de jonctions
- $y$  = taille en y minimum utilisable (donc 350)
- $i$  = taille des interfaces de jonctions entre deux pièces choisie (ici 50mm)

Nous avons décidé qu'avoir trois jonctions serait le plus optimal.

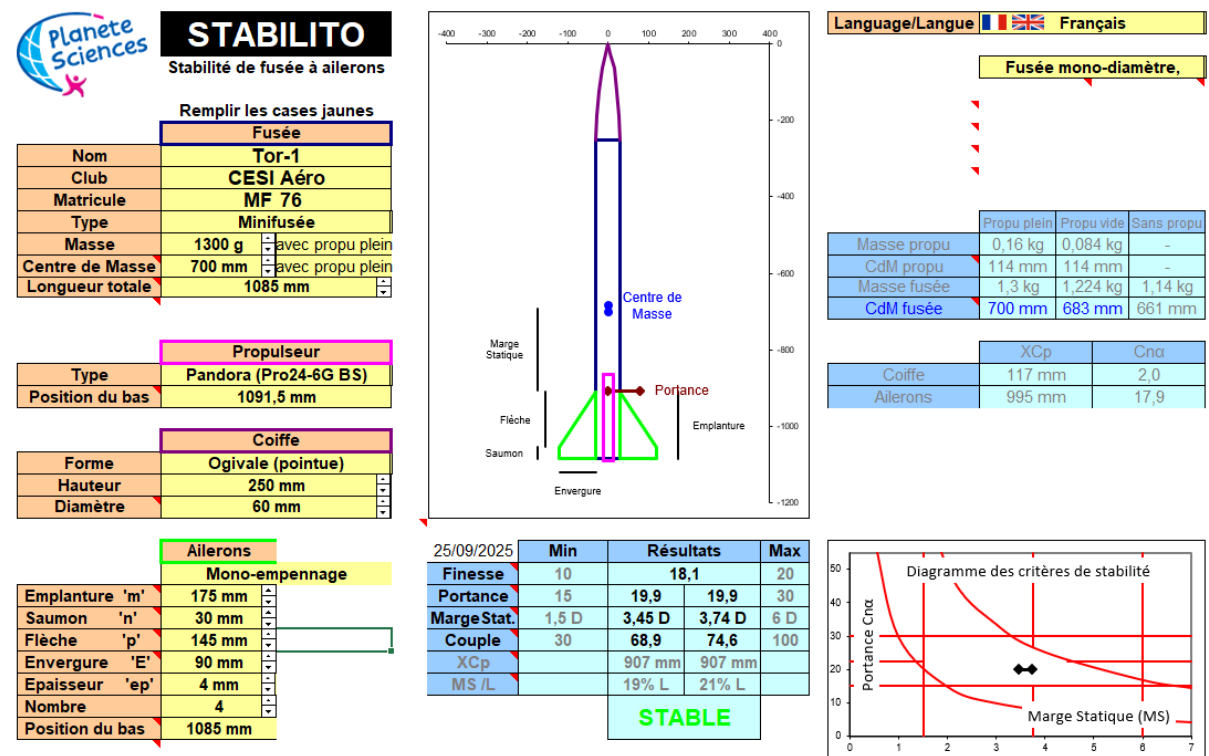
En effet, avoir trois jonctions veut dire qu'une d'entre elles doit se trouver proche du centre de masse de la fusée. Normalement, nous devrions tenter d'éviter les jonctions au centre de masse, car c'est

l'emplacement qui subit le plus de forces. Mais dans le cadre de notre fusée, le centre de masse abriterait presque assurément le système de déploiement du parachute et serait en même temps la partie la plus solide et massive de la structure.

Ce calcul nous donne 1 250 mm au maximum pour la fusée. Afin de nous laisser une marge, nous avons visé 1,1 m.

## Dimensions finales de la fusée

Connaissant désormais les dimensions maximales de notre fusée, nous avons pu jouer avec sa forme afin d'obtenir un profil aérodynamique stable :



## Composants choisis et explication :

### Liste :

Afin de réduire la taille de ce rapport, vous trouverez la liste exacte ci-dessous dans notre récapitulatif de factures : [Récapitulatif factures.xlsx](#)

### Éléments notables :

Filament PA6-CF20 : le nylon chargé en carbone à 20 % a été choisi pour plusieurs raisons.

Premièrement, il offre une adhésion inter-couche remarquable.

Ensuite, le nylon présente une excellente résistance à la chaleur tout en restant relativement facile à imprimer.

De plus, son coefficient de friction est extrêmement faible, à 0,3 (contre 0,9 pour l'aluminium), ce qui nous permet de réaliser des pièces coulissantes sans avoir besoin de lubrification.

Enfin, la charge en carbone à 20 % améliore la rigidité de la fusée, la résistance à la chaleur et la précision dimensionnelle, permettant d'imprimer de très petits détails avec une grande exactitude.

Arduino Nano : L'Arduino Nano représente une option simple et extrêmement robuste pour le club. En effet, nous avons une grande expérience avec cette plateforme, utilisée pour des drones, des aéroglisseurs et même des prothèses robotiques. Le choix a donc été fait de l'utiliser pour la minuterie.

Raspberry Pi : Le Raspberry est également une option de simplicité. La plateforme, extrêmement adaptable, nous permet de réaliser toutes les expériences que nous souhaitons en fonction du temps qu'il nous reste.

## Réalisation de la fusée :

Maintenant que nous connaissons les limites de notre fusée ainsi que sa géométrie, nous pouvons passer à sa réalisation. En premier lieu, la modélisation de la structure de la fusée, qui conditionne l'intégration des composants internes, a été notre priorité.

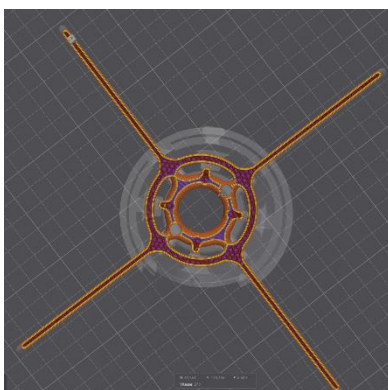
### Modélisation 3D :

La modélisation 3D, tout comme la planification, doit prendre en compte les limitations et les avantages de la fabrication additive. La première partie modélisée a été la base de la fusée avec ses ailerons.

### Étage moteur :

L'étage moteur de la fusée doit pouvoir tenir le moteur tout en transférant les forces de poussées de celui-ci au reste de la fusée. Les ailerons doivent aussi être assez solide pour pouvoir tenir le poids complet de la fusée sur seulement deux d'entre eux.

#### *Choix de la direction d'impression des ailerons :*



La question pour les ailerons était : devons-nous les imprimer séparément et les fixer à la fusée, ou bien tout imprimer d'un seul bloc ?

Nous avons décidé de tout imprimer d'un seul coup. Cette méthode offre en effet une excellente résistance aux forces attendues sur les ailerons.

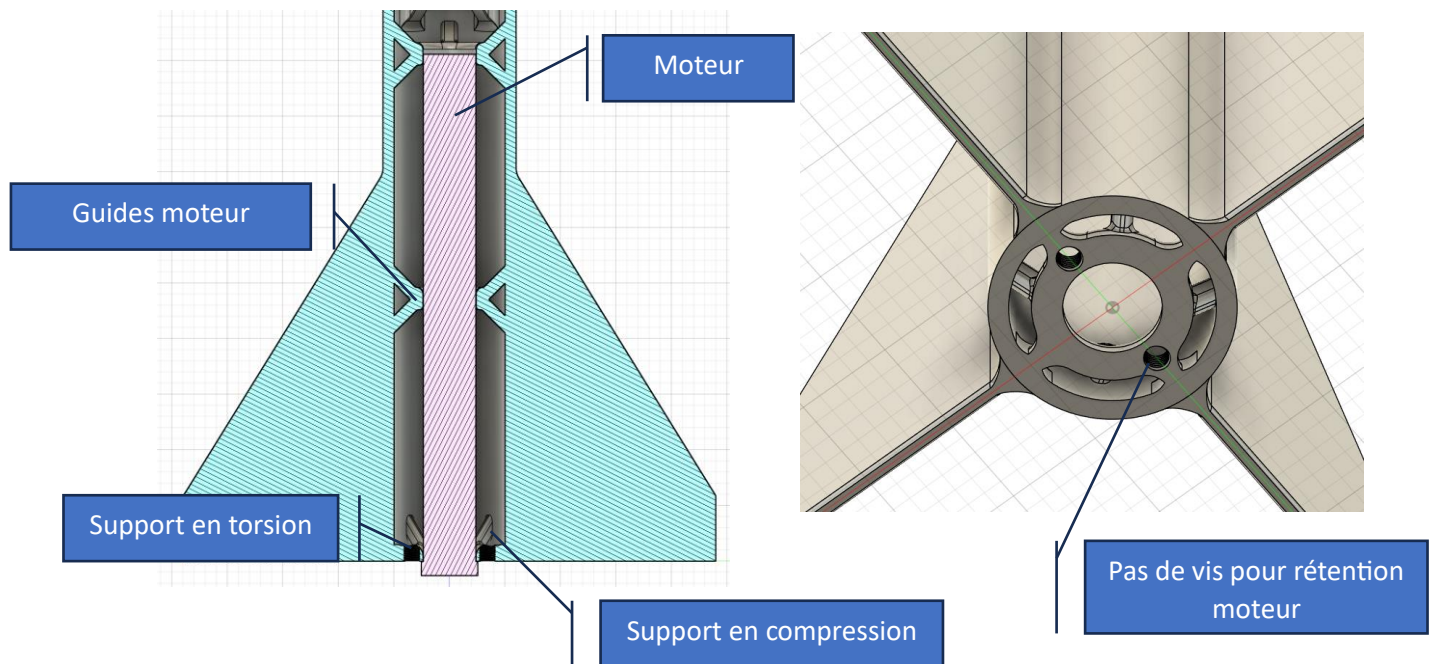
Imprimer les ailerons à plat et les fusionner avec le tube permet d'obtenir un filament continu faisant tout le tour de la fusée, ce qui garantit une résistance maximale à la torsion horizontale ainsi qu'une grande surface de contact pour supporter les torsions verticales.

De plus, cela permet de disposer d'une surface accrue pour supporter le transfert des forces du moteur.



### Transfert des forces moteur :

Pour ce qui est du transfert de force, nous avons décidé de l'effectuer à la base de la fusée. En effet, cela présente plusieurs avantages : tout d'abord, cela nous permet d'exploiter la géométrie interne rendue possible par la fabrication additive pour ajouter des formes complexes et mieux répartir les forces. De plus, cette solution permet d'économiser de l'espace tout en intégrant des supports supplémentaires pour renforcer la répartition des contraintes.



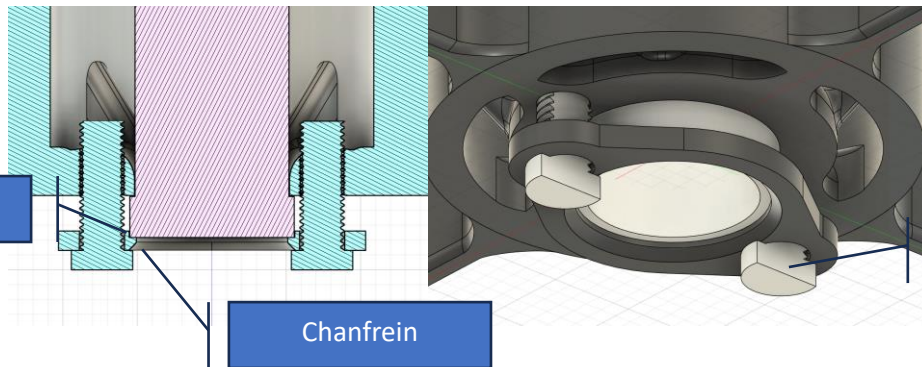
Il est intéressant de noter qu'en raison de la très grande rigidité du PA6-CF, les supports en torsion ne subissent presque aucune déformation, et la quasi-totalité de la force du moteur est transmise aux supports en compression.

### Soutien moteur :

La bague de rétention moteur utilise des vis installées directement dans les pas de vis imprimés dans la structure.

Ces vis sont coupées à  $\frac{1}{4}$ , ce qui permet une impression à plat tout en garantissant leur solidité. De plus, cela évite qu'elles se trouvent face aux flammes du moteur.

La bague de rétention possède également une interface de maintien et un chanfrein afin de minimiser son exposition aux flammes. Toutes les pièces sont imprimées en nylon.

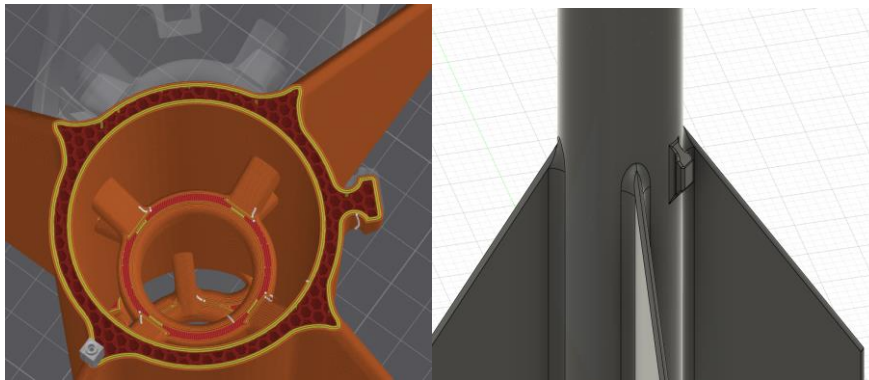


#### *Patins :*

TOR-1 est une fusée à patins. Le dernier, en contact avec la rampe, se situe à la base de la fusée. Ce choix a été fait car c'est l'endroit le plus solide, permettant à ce simple patin de maintenir la fusée droite en cas de problème au décollage.

Tous les angles en contact avec la rampe ont été arrondis afin de minimiser les fragilités. De plus, ce patin est imprimé dans le vide grâce à un angle de 35°, et orienté selon la direction d'impression la plus adaptée aux forces qu'il devra subir, faisant des patins de TOR-1 l'une des parties les plus solides de la fusée.

Et pour terminer, le nylon étant un matériau à faible coefficient de friction, la fusée glisse parfaitement bien.



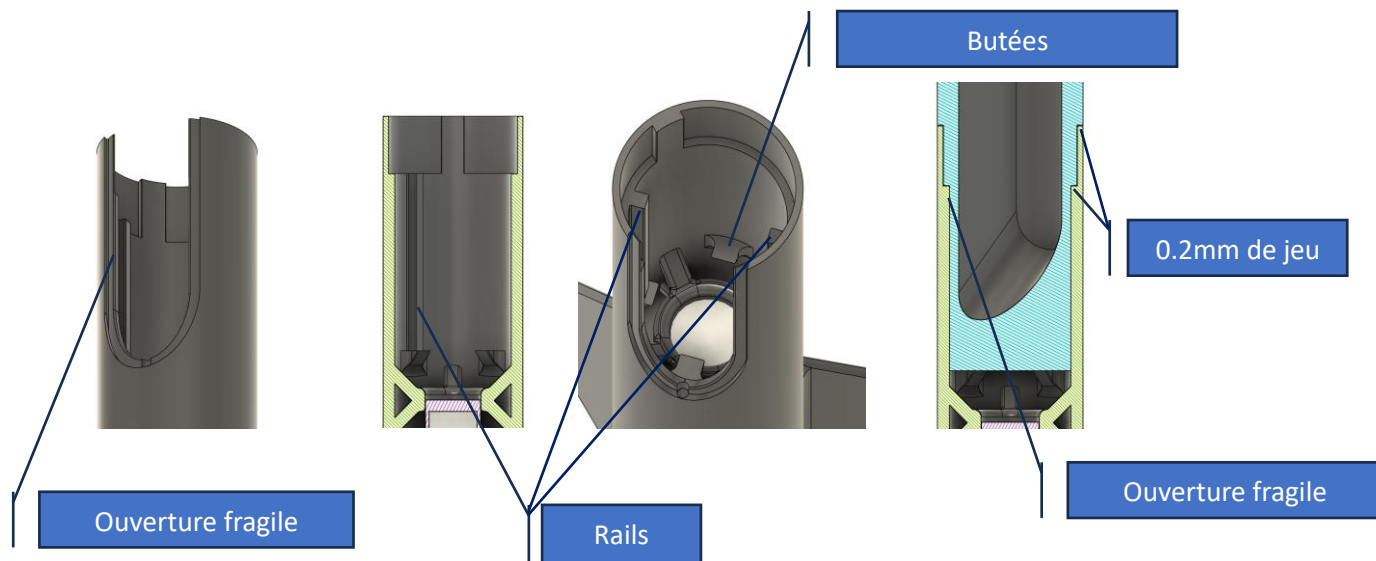
#### *Interface inter-pièces :*

L'interface entre les pièces permet non seulement d'allonger la fusée, mais aussi d'assurer le transfert des forces en vol. Pour cela, la pièce doit présenter une intégrité mécanique parfaite.

Le problème est que, précisément à cet endroit, se trouve l'ouverture du parachute, ce qui fragilise la structure. Pour y remédier, nous avons ajouté des butées plus bas dans la fusée, à un niveau où les filaments sont solidement unis et ne constituent pas un point de rupture. De plus, nous avons intégré des rails de guidage afin de rigidifier davantage l'ensemble en zone fragile.

Enfin, la structure au niveau des butées latérales présente très peu de jeu, tandis que, dans les zones fragiles, un jeu de 0,2 mm a été ajouté afin d'éviter tout contact direct. Ainsi, ces parties ne supportent pas la majeure partie des contraintes, mais restent suffisamment proches pour qu'en cas de

déformation des butées, elles prennent le relais et apportent un renfort supplémentaire avant toute rupture ou déformation plastique.

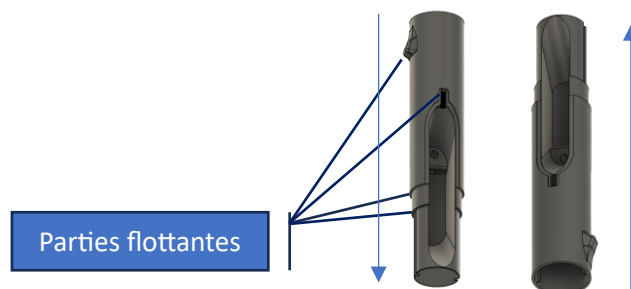


### Étage parachute :

L'étage parachute doit pouvoir transférer les forces vers le haut, intégrer une baie parachute avec une trappe ouvrable et, dans notre cas précis, il a été choisi pour accueillir notre port caméra.

#### Direction d'impression :

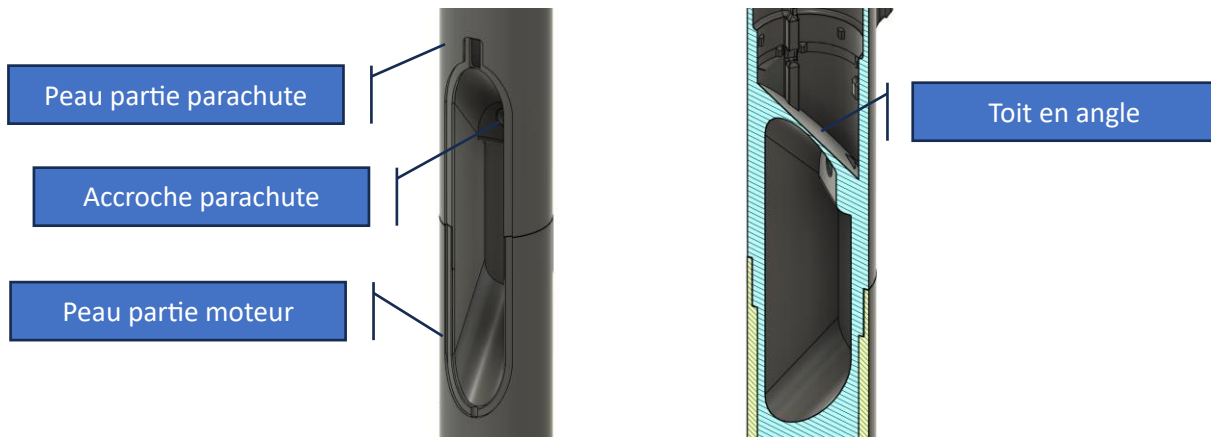
En raison de sa structure de transfert de force avec l'étage moteur, l'étage parachute devait être imprimé dans le sens inverse de la modélisation 3D afin d'éviter les rebords flottants et les imprécisions susceptibles de provoquer du jeu



#### Case parachute :

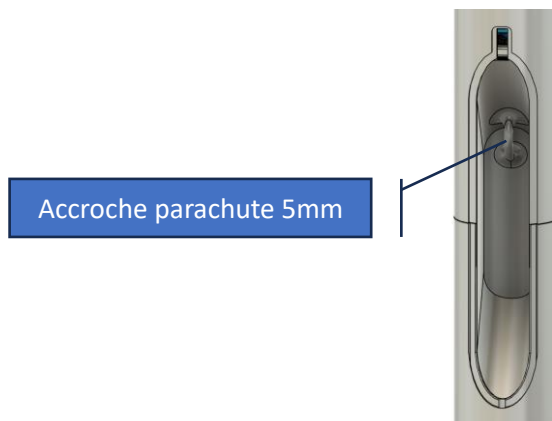
La case parachute doit pouvoir contenir le parachute ainsi que son système d'accroche, et surtout rester imprimable. Cela a conduit à un design particulier :

- La partie accueillant le parachute est conçue en monobloc.
- Une portion de la section externe de la case parachute s'insère dans le bloc moteur.
- Le toit de la section parachute est incliné afin de permettre une impression inversée sans surplomb, ce qui crée un trou en angle à l'intérieur de la fusée.
- Une accroche parachute en monobloc massive



Ce design particulier offre une solidité exceptionnelle, une grande simplicité d'impression et une case parachute dépourvue de tout point où le parachute pourrait s'accrocher et rester coincé lors de son déploiement.

Pour ce qui est de l'accroche parachute, elle est largement capable de supporter plus de 5 kg, comme requis. En effet, une première version avait été proposée, mais elle a été initialement refusée lors de la RCE3 :



La précédente version comportait un anneau de seulement 5 mm de diamètre. Après test au C'Space, il s'est avéré qu'elle avait tenu à plus de 28 kg avant de céder. Nous n'avons pas eu le temps de tester la version actuelle avant le lancement, cependant il est certain que celle-ci dépasse largement les 28 kg de capacité.

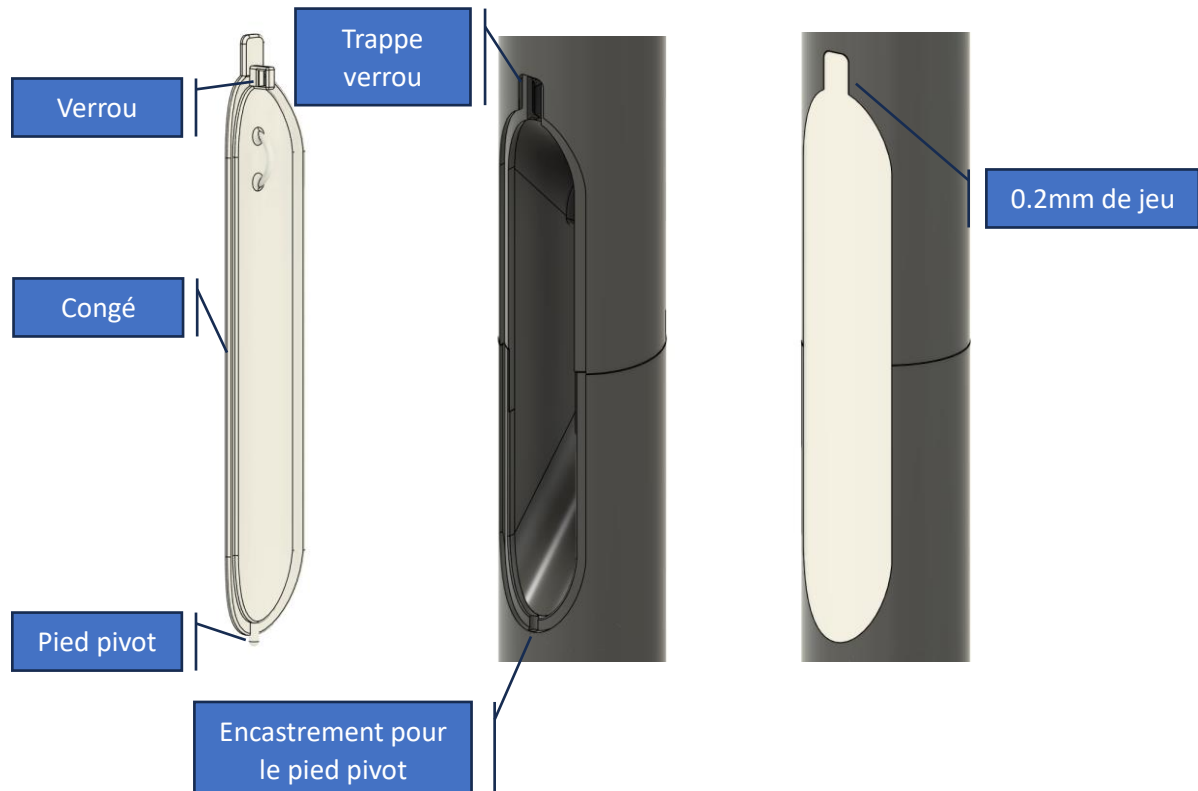
#### Système d'ouverture :

Le système d'ouverture doit être capable de se verrouiller, puis de libérer le parachute au moment voulu. Pour cela, nous avons choisi une simple trappe sur le côté de la fusée.

Nous avons décidé de ne pas utiliser de ressort et de simplement pousser la trappe très légèrement, de façon à ce qu'elle prenne le vent et s'ouvre d'elle-même, entraînant par la même occasion le parachute. Cela implique plusieurs points essentiels à surveiller pour garantir le bon fonctionnement :

- La trappe ne doit pas être bloquée par la structure externe de la fusée ; elle doit donc être conçue pour tomber par défaut si elle n'est pas maintenue.

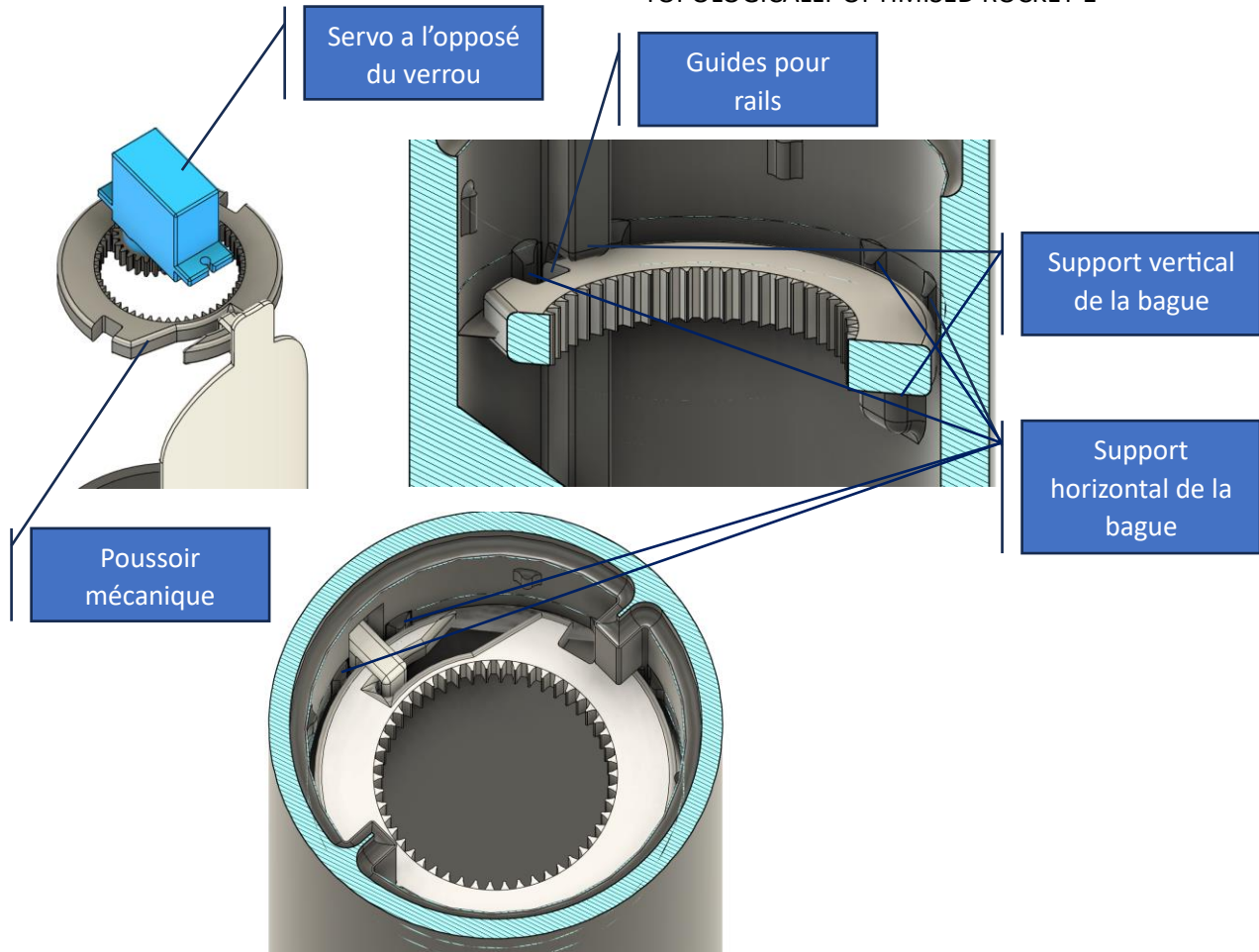
Pour cela, nous avons conçu la trappe avec un léger jeu de 0,2 mm et un congé de chaque côté et uniquement deux points de fixation : le verrou et un pied pivot.



La trappe passe un verrou à travers la fusée et est retenue par une bague qui sert non seulement de fixation mais aussi de poussoir mécanique pour garantir l'ouverture de la trappe. Cette bague est tenue en position par des supports intégrés à la structure interne de la peau de la fusée et est actionnée par un servo avec un engrenage de réduction à 1/2.

De plus, la position du servo, à l'opposé du verrou, permet de maintenir une tension constante sur le système, assurant qu'au moment de l'ouverture aucune dent ne soit manquée, ce qui fiabilise drastiquement le mécanisme.

La bague, en elle-même, comporte sur le côté des guides permettant de la faire glisser à travers le système de rails interne de la fusée. Ces guides sont placés à un angle permettant d'éviter le moindre blocage durant l'ouverture ou la fermeture de la trappe.



#### *Jonction avec l'étage électronique :*

La jonction avec l'étage électronique n'a pas autant de contraintes que l'étage précédent, car les couches ne présentent aucune interruption, rendant la structure extrêmement solide. Il a donc été possible de réduire drastiquement la complexité de la modélisation en ajoutant simplement un congé à la jonction pour éviter l'impression dans le vide, le reste s'intégrant sans risque.



#### Étage électronique:

L'étage électronique doit permettre à la fois l'accessibilité de l'électronique et sa fixation solide à la fusée.



### Direction d'impression :

Vu que l'interface de l'étage précédent nécessitait un congé, cet étage a également dû être imprimé à l'envers. Ainsi, le haut de l'étage se retrouve en bas du plateau d'impression.



### Case électronique :

La case électronique a pour but de permettre de glisser l'électronique dans la fusée tout en restant solidement fixée à celle-ci.

Afin d'éviter de compromettre sa structure avec des trappes pour le passage de câbles, nous avons décidé que la case électronique serait une unité tout-en-un intégrant les deux systèmes d'alimentation, la caméra et le servo chargé d'ouvrir la trappe du parachute.

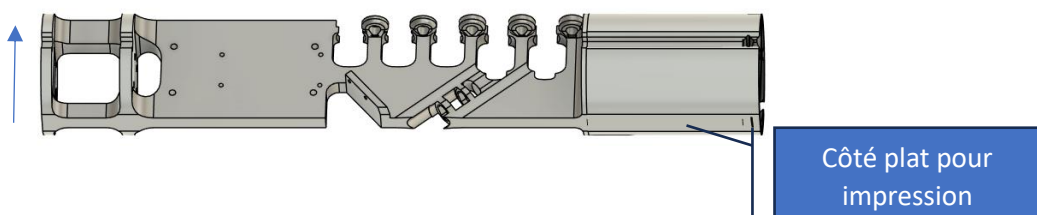
Pour cela, nous avons utilisé un système de rails, en ajoutant des butées en bas de la case électronique, de sorte que la position la plus basse soit parfaitement alignée avec la bague. Ce système garantit une ouverture fonctionnelle sans nécessiter le moindre raccordement de câbles après l'insertion de la case électronique.

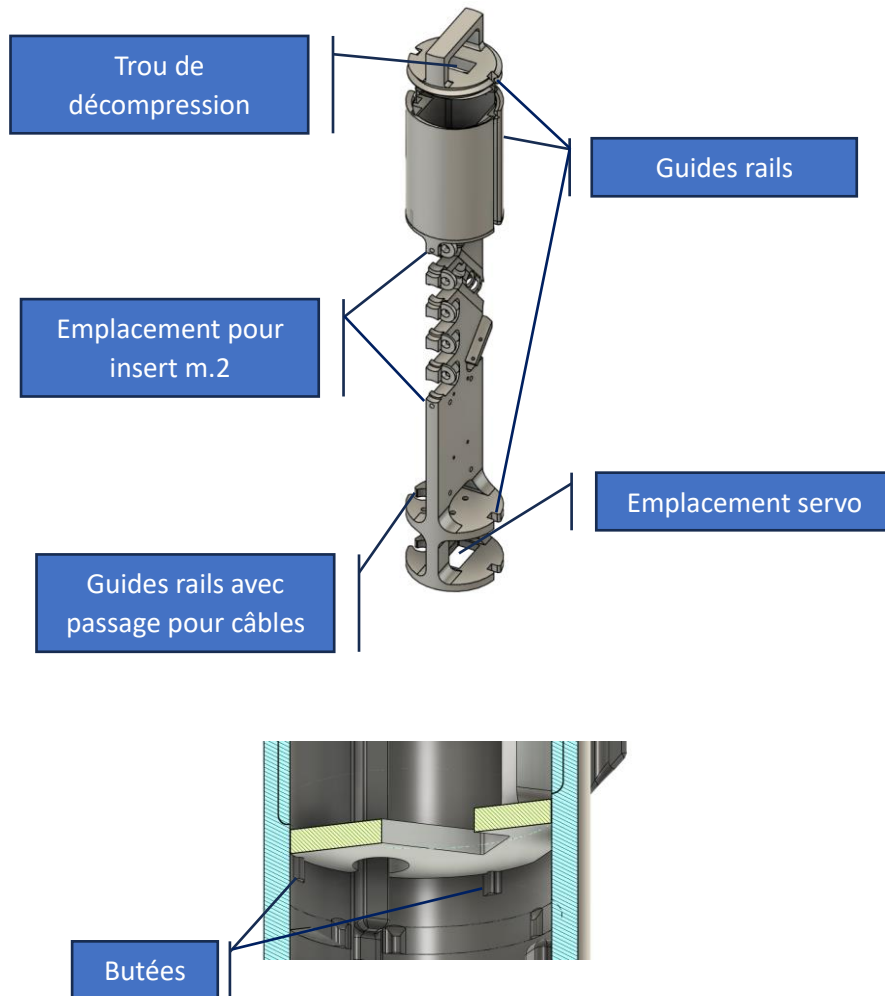
Pour le maintien en hauteur, nous avons utilisé un capot vissé associé aux rails pour empêcher tout desserrage, assurant ainsi le scellement des batteries tout en s'appuyant sur la coiffe pour exercer la pression nécessaire.

Le capot comprend un trou de décompression en cas d'incendie des batteries, afin d'éviter une accumulation de gaz pouvant provoquer une explosion.

Il intègre également une poignée à double fonction : maintenir la trappe lorsque la coiffe est fermée et permettre de retirer facilement la case électronique.

La case électronique est imprimée à l'horizontal.





### Étage coiffe:

La coiffe doit pouvoir fendre l'air tout en assurant un bon équilibre de la fusée. Elle est utilisée comme leste lors de la fabrication additive afin de garantir le bon positionnement du centre de gravité. Pour satisfaire la vision d'une fusée sans la moindre vis structurelle, nous avons décidé d'utiliser un pas de vis imprimé en 3D. Cela nous a obligés à travailler de manière originale.

#### Direction d'impression :

A la géométrie de la coiffe, celle-ci devait être imprimée culot vers le plateau d'impression.





### Pas de vis :

La décision d'utiliser un pas de vis a ajouté quelques contraintes à notre modélisation. En premier lieu, le pas de vis doit pouvoir entrer à l'intérieur, son diamètre doit donc être plus petit que le diamètre externe de la coiffe, ce qui nous oblige à avoir une impression flottante.

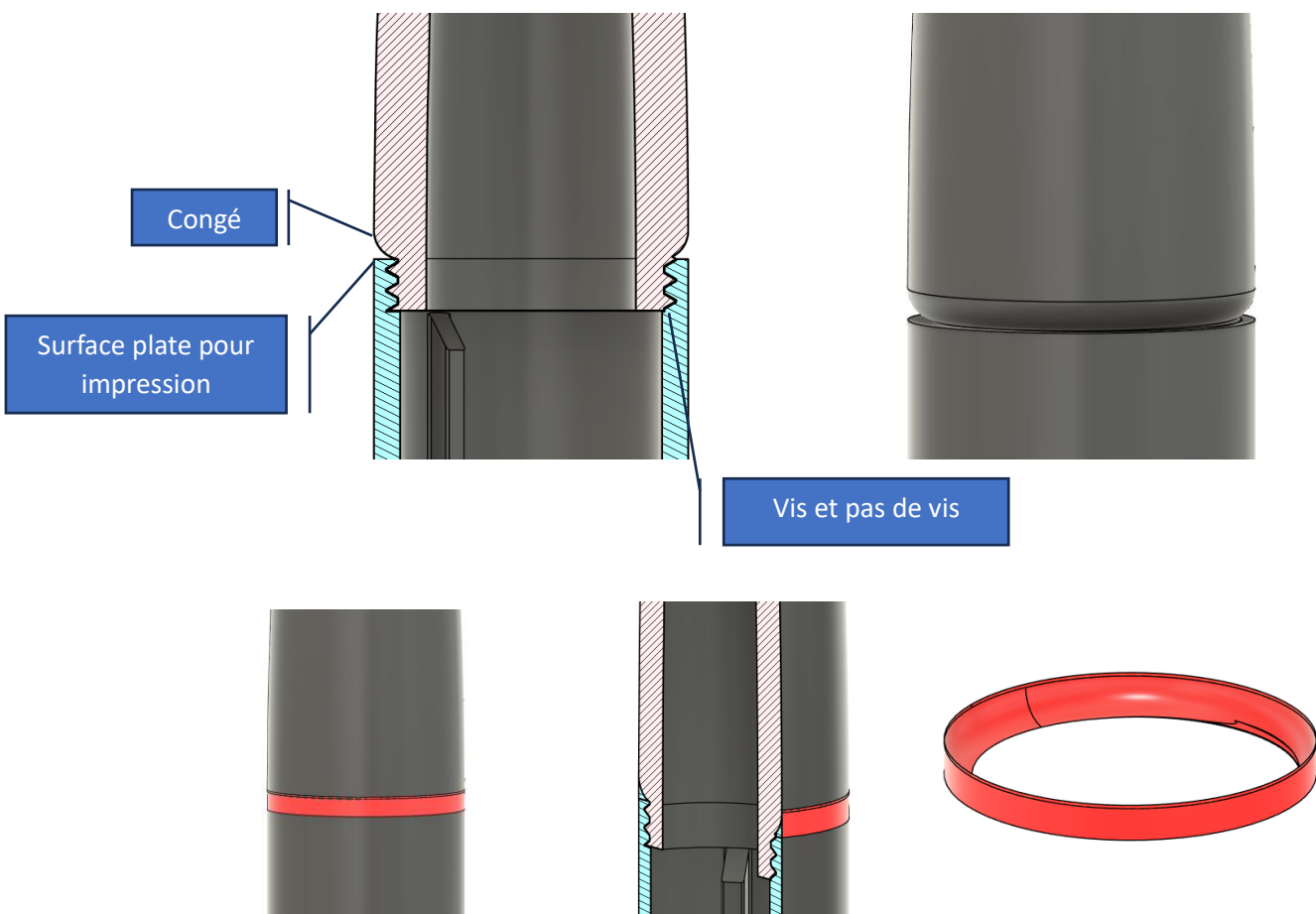
Pour éviter cela, nous avons utilisé un congé permettant de réduire la quantité de matière imprimée dans le vide.

Cependant, ce congé pose un problème : en effet, au vu de l'orientation d'impression de l'étage précédent, celui-ci doit avoir une face plate au niveau du contact avec la coiffe et ne peut donc pas épouser le congé.

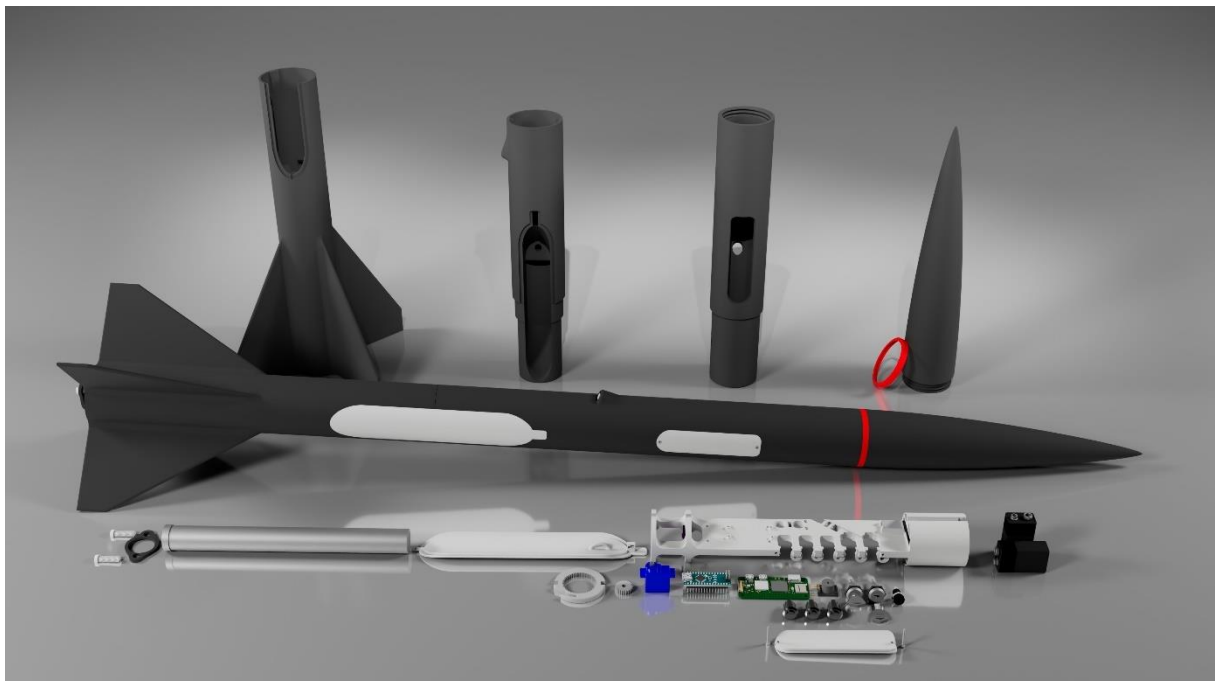
Mais la coiffe, elle, doit être arrondie, ce qui provoque une coupure dans le profil, rendant la fusée légèrement moins aérodynamique.

De plus, étant donné la position largement au-dessus du centre de gravité, nous prenons le risque de déstabiliser la fusée.

Pour éviter ce problème, nous avons simplement ajouté une pièce qui fait interface entre les deux sections. Cette pièce n'étant pas structurale, nous avons décidé de l'imprimer en ABS rouge.



Vue complète structure:



## Électronique :

L'électronique sert deux fonctions primaires : l'expérience et l'ouverture de la trappe du parachute au bon moment.

Pour la section « expérience », nous n'aborderons pas ce point dans ce rapport. En effet, l'expérience a pris un retard drastique et, dû à un changement de type de batterie sans vérification de compatibilité, n'a pas pu être réalisée. Plus de détails dans la section « retour d'expérience ». Nous explorerons donc uniquement le système de récupération.

## Récapitulatif des besoins :

Le système de récupération doit pouvoir :

- Disposer d'une alimentation contrôlée par l'utilisateur : piles 9 V + interrupteur
- Être capable d'ouvrir et de fermer la trappe : servo full metal
- Être capable d'indiquer son statut : LED + beeper
- Être capable de détecter le lancement : port jack + câble jack à travers lequel on détecte la continuité
- Être capable d'ouvrir la trappe via un minuteur : Arduino Nano
- Offrir une interface homme-machine permettant d'ouvrir et de fermer la trappe ainsi que de lancer le minuteur : 2 boutons classiques

## Fonctionnalité :

Afin de remplir toutes les fonctions du système de récupération, nous avons dû accomplir un schéma électrique simple. Nous avons décidé d'utiliser 2 piles 9 V en parallèle pour avoir un meilleur ampérage, ce qui permet d'assurer que le servo ait assez de puissance pour ouvrir la trappe, même si toutes les LED sont allumées, que le beeper fonctionne et que l'Arduino soit à sa consommation maximale. Nous avons ensuite une LED permettant d'indiquer que l'Arduino est démarré et armé, une LED pour indiquer que la trappe est fermée et, pour finir, une LED pour indiquer que le minuteur est lancé. Et voici la liste des signaux lumineux :

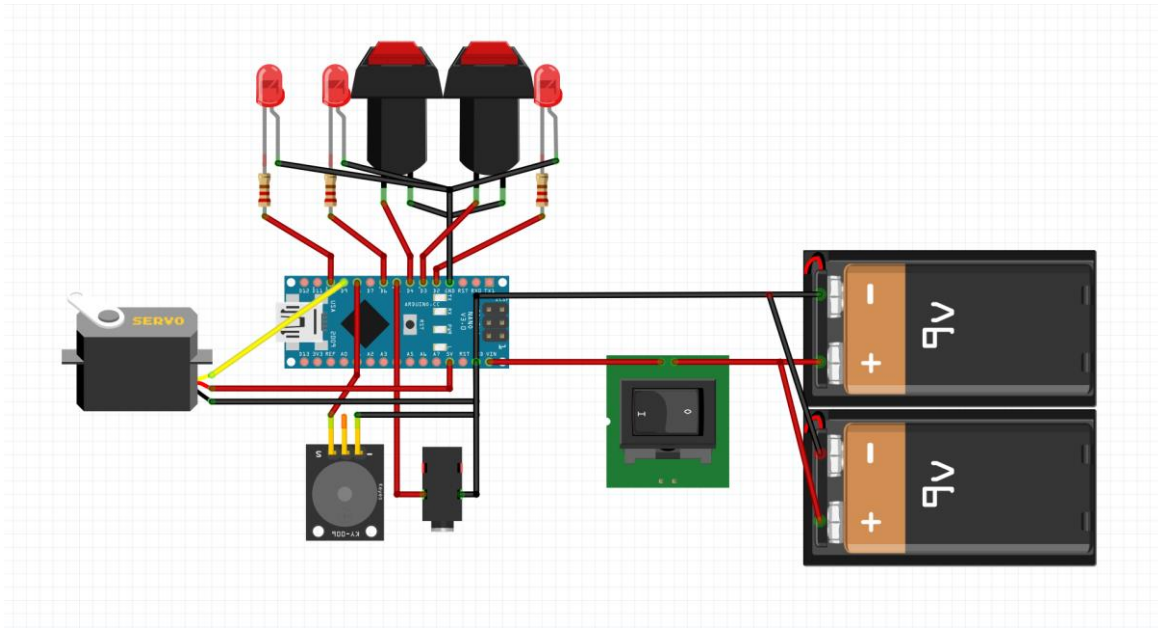
| LED                      | Condition                                     | Comportement                                |
|--------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>ON-STATUS (pin 2)</b> | Mise HIGH au setup                            | Allumée en continu tant que carte alimentée |
| <b>LED1 (pin 6)</b>      | Trappe fermée                                 | Allumée fixe                                |
|                          | Trappe ouverte                                | Éteinte                                     |
|                          | Bouton armement fusée — erreur trappe ouverte | Clignote 2× (100 ms ON / 100 ms OFF)        |
| <b>LED2 (pin 10)</b>     | Bouton armement fusée — cas OK (prêt test)    | Allumée fixe (puis s'éteint après séquence) |

|  |                                                  |                              |
|--|--------------------------------------------------|------------------------------|
|  | Bouton armement fusée — erreur pas de continuité | Clignote 1× long (500 ms ON) |
|--|--------------------------------------------------|------------------------------|

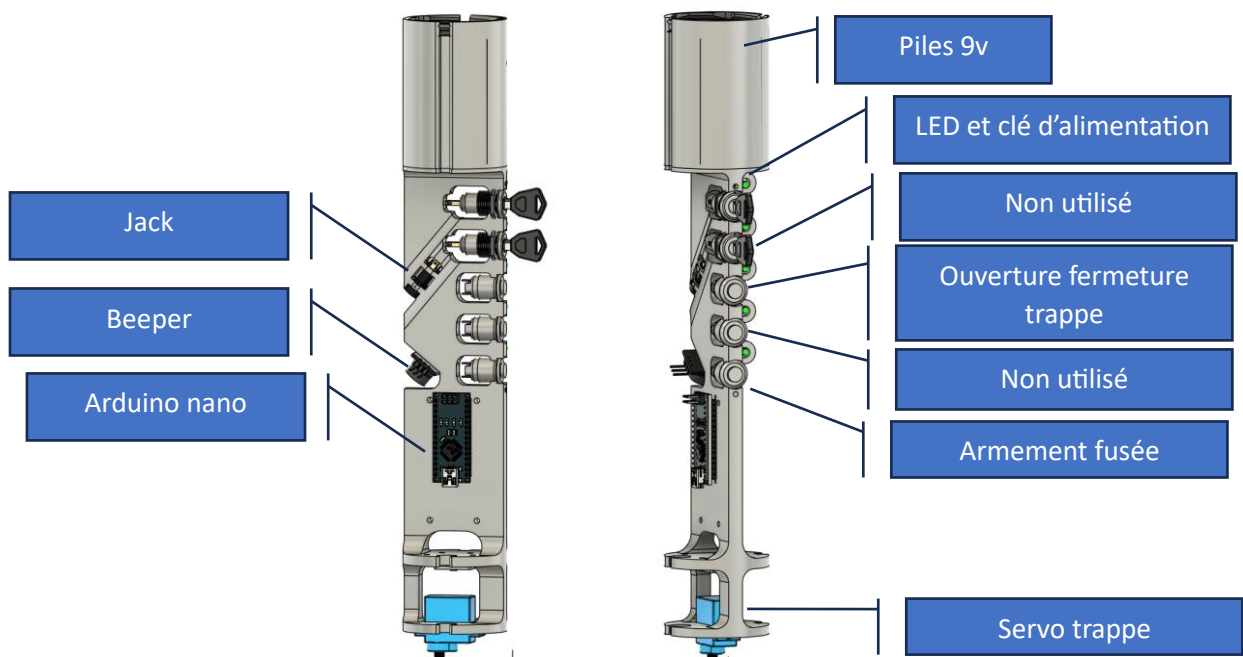
Le beeper, lui, est utilisé pour chacune des actions de la fusée. Voici la liste des bips :

| Condition                                                    | Fréquence / Durée                             | Mode / Répétition                                               |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>Démarrage (testBuzzer)</b>                                | 400 Hz 300 ms, 800 Hz 300 ms, 1200 Hz 300 ms  | Séquence unique, puis 3 bips à 1000 Hz (150 ms ON / 150 ms OFF) |
| <b>Bouton trappe parachute → fermeture trappe</b>            | 1000 Hz 200 ms ×2                             | Espacés 100 ms                                                  |
| <b>Bouton trappe parachute → ouverture trappe</b>            | 1000 Hz 200 ms ×1                             | —                                                               |
| <b>Continuité établie</b>                                    | 400 Hz 150 ms → pause 150 ms → 1000 Hz 150 ms | Séquence double                                                 |
| <b>Continuité perdue</b>                                     | 1000 Hz 150 ms → pause 150 ms → 400 Hz 150 ms | Séquence double                                                 |
| <b>Bouton armement fusée — cas OK (câble encore branché)</b> | 800 Hz 100 ms                                 | Toutes les 1 s tant que câble connecté                          |
| <b>Bouton armement fusée — cas OK (après déconnexion)</b>    | 1000 Hz 100 ms                                | Toutes les 500 ms pendant 7 s                                   |
| <b>Bouton armement fusée — erreur pas de continuité</b>      | 1000 Hz 500 ms                                | 1 bip long                                                      |
| <b>Bouton armement fusée — erreur trappe ouverte</b>         | 1000 Hz 100 ms ×2                             | Espacés 100 ms                                                  |

## Schéma électrique et électronique :



Voici la case électronique complètement assemblée.



Vous pourrez remarquer qu'il y a un ensemble de boutons, interrupteurs et LED en trop. Ces ajouts étaient prévus pour la partie expérience qui, malheureusement, n'a pas pu être complétée à temps à cause d'une décision de changer l'alimentation, ce qui a entraîné un manque de puissance pour alimenter le gourmand Raspberry Pi Zero 2W que nous avons choisi.

Cependant, cette configuration est bien la configuration de vol. En effet, les boutons sont intégrés dans la rigidité de la structure : s'ils sont enlevés, la structure devient drastiquement plus fragile.

## Séquence de vol et états possibles :

### Séquence de vol :

La séquence de vol se déroule comme suit :

- 1- À tout moment avant l'étape 4, l'utilisateur peut brancher le jack. Si le jack est branché, la fusée bipe.
- 2- L'utilisateur allume la fusée. Une LED s'allume puis la fusée bipe pour indiquer qu'elle a bien démarré.
- 3- Si la trappe est fermée, passer à l'étape suivante ; si elle est ouverte, appuyer sur le bouton de fermeture. Au moment de la fermeture, la fusée bipe et une LED s'allume.
- 4- Si la trappe est bien fermée et que le jack est branché, appuyer sur le bouton d'armement déclenche un état d'attente où un bip retentit chaque seconde. Si le jack n'est pas branché ou que la trappe n'est pas fermée, le beeper sonne en fonction de l'erreur : la LED du bouton d'armement clignote si le jack n'est pas branché et, si la trappe n'est pas fermée, le bouton de la trappe clignote.
- 5- Une fois armée, si le jack est débranché, un timer démarre et le beeper bipe toutes les demi-secondes jusqu'à 7,2 s, moment où est déterminé préalablement l'apogée. La trappe parachute s'ouvre. Si le jack est rebranché avant 7,2 s, la séquence de lancement est annulée et un bip indique le changement de statut. Reprise à la fin de l'étape 3.

### Etats possible :

| État                                | Description                                                  | LEDs                                         | Bip                                                  | Entrée (quand on y arrive)                                  | Sortie / Prochain état (déclencheur)                            |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| <b>S0 • Éteint</b>                  | Carte hors tension.                                          | —                                            | —                                                    | —                                                           | <b>S1</b> dès mise sous tension.                                |
| <b>S1 • Allumage / Boot</b>         | Démarrage + séquence de test sonore.<br>LED statut s'allume. | onstatusLed ON                               | Séquence test (grave→médium→aigu puis 3 bips courts) | À la mise sous tension.                                     | Vers <b>S2a</b> si trappe ouverte, <b>S2b</b> si trappe fermée. |
| <b>S2a • Repos — Trappe ouverte</b> | Système au repos, trappe ouverte.                            | led1 OFF (trappe ouverte),<br>onstatusLed ON | — (hors bips liés au jack)                           | Boot avec trappe ouverte, ou appui B1 depuis trappe fermée. | <b>S2b</b> si B1 (fermeture) → 2 bips courts.                   |

|                                                     |                                                    |                                                       |                                                                    |                                               |                                                                                                                                                   |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>S2b • Repos</b><br>— <b>Trappe fermée</b>        | Système au repos, trappe <b>fermée</b> .           | led1 <b>ON</b> (trappe fermée), onstatusLed <b>ON</b> | — (hors bips liés au jack)                                         | Boot avec trappe fermée, ou fermeture via B1. | <b>S2a si B1</b> (ouverture) → 1 bip. <b>S3 si B2 et jack branché</b> . Erreur si conditions non remplies (voir “Erreurs immédiates”).            |
| <b>S3 • Armé</b><br>— <b>Standby (jack branché)</b> | Prêt, en attente ; jack <b>branché</b> .           | led2 <b>ON</b> fixe                                   | <b>800 Hz 100 ms toutes les 1 s</b> tant que le jack reste branché | <b>B2</b> en <b>S2b</b> avec jack branché.    | <b>S4 si jack débranché</b> (front). <b>Annulation</b> si on sort volontairement (voir remarques).                                                |
| <b>S4 • Compte à rebours (jack débranché)</b>       | Chrono <b>7,2 s</b> .                              | led2 reste <b>ON</b>                                  | <b>1000 Hz 100 ms toutes les 0,5 s</b> jusqu’à fin du chrono       | Débranchement du jack en <b>S3</b> .          | <b>S5 si le timer atteint 7,2 s</b> . <b>Annulation si jack rebranché avant 7,2 s</b> → 1 bip d’annulation, led2 <b>OFF</b> , retour <b>S2b</b> . |
| <b>S5 • Déploiement</b>                             | Ouverture de la trappe parachute. Fin de séquence. | led1 <b>OFF</b> (trappe ouverte), led2 <b>OFF</b>     | —                                                                  | Fin du compte à rebours en <b>S4</b> .        | Retour d’exploitation logique vers <b>S2a</b> (trappe ouverte). <b>B1</b> pour refermer (→ <b>S2b</b> ).                                          |

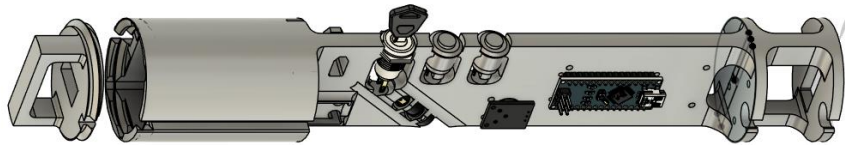
## Les vols :

Tor-1 a eu deux vols. En effet, nous avons ramené deux versions de la fusée, Spec 1 et Spec 2. La plus grande différence se trouvait dans la répartition des masses ainsi que dans un bandeau blanc placé au centre de la ligne de parachute. L’électronique, elle, restait fondamentalement la même, à la différence près que la case électronique a été adaptée et simplifiée pour ne comporter que le minuteur et ses dépendances.





Bandeau blanc spec 2



## Vol 1, TOR-1\_Spec-1 :

Résultat du vol : balistique

Le parachute s'est déployé au bon moment mais s'est retrouvé emmêlé.



## Analyse du problème :

Une fois atterri, il a été simple de constater qu'en effet, le parachute était le fautif.



Au vu de la géométrie de la fusée, le parachute ne s'est pas retrouvé coincé. Il reste donc deux coupables potentiels : le design du parachute et le pliage.

Le pliage était déjà assurément incorrect. En effet, c'était le premier lancement du club et, sous l'effet du stress, j'ai replié le parachute avant le vol. Dans la précipitation, je n'ai pas fait attention au positionnement des câbles, qui se sont retrouvés coincés à l'intérieur du parachute. C'est probablement la raison principale du nœud ayant provoqué l'échec de ce vol.

Cependant, le parachute n'avait pas que ce problème.

Je n'ai pas de photos pour cette prochaine section par manque de temps.

Le premier problème concernait l'émerillon, qui n'était pas correctement réalisé : il permettait bien au parachute de tourner, mais seulement lorsqu'il n'était pas sous tension. Dès qu'un poids significatif se trouvait dessus, le parachute ne pouvait plus pivoter.

De plus, le parachute ne disposait pas d'anti-torche. Simple oubli : nous avions pourtant conçu et imprimé des anti-torches pour le vol, mais ils n'ont pas été installés.

## Impact au sol : des données inattendues :

Malheureusement, au vu du manque de temps, nous n'avons pas de photos. Cependant, voici un résumé des informations que nous avons pu en tirer :

La fusée, après impact sur le sol sec, s'est enfoncée de plus de 20 cm dans le sol. La structure en elle-même n'a subi que deux dégâts : un au niveau du moteur et un au niveau de la coiffe.

### La coiffe :

La coiffe étant plantée trop profondément dans le sol, nous n'avons pas eu le temps de la libérer. Cependant, vue de l'intérieur, elle ne semble pas avoir subi de déformation, ce qui signifie qu'elle a pris l'impact de plein fouet et en est ressortie presque intacte.

Le seul dommage constaté s'est trouvé au point le plus faible de la coiffe : le filetage. En effet, la fusée n'a pas impacté le sol parfaitement droit, avec un angle d'environ 10 à 20°. Cet impact, à plus de 300 km/h, a causé comme unique dégât une simple délamination partielle du filetage.

Pour libérer le reste de la fusée, nous avons dû la dévisser puis tirer afin de dégager les filetages restants.

#### *Le bloc moteur :*

Le bloc moteur, quant à lui, est celui qui a étonnamment subi le plus de dégâts. En effet, au vu de la rigidité extrême de la fusée, la force de l'impact s'est déplacée jusqu'à trouver une faiblesse dans la structure. Et cette faiblesse s'est trouvée dans une pause d'impression pour changement de filament au moment d'imprimer le bloc moteur de Spec-1.

Cela a eu pour effet de délaminer parfaitement le long de la couche d'impression le bloc moteur et de l'éjecter à plus d'un mètre dans les airs.

Je suis convaincu que sans cette erreur d'impression, le bloc moteur aurait survécu.

#### *Electronique :*

L'électronique n'a pas été détruite. Le seul vrai dégât se trouvait au niveau du servo, qui a pris de plein fouet un lest rajouté avant le vol et qui s'est détaché à l'impact, le fracturant. Les batteries 9 V se sont également libérées et tordues, mais le reste était en bon état et réutilisable au besoin pour le second vol.

#### *Conclusion :*

Malheureusement, par manque de temps, nous n'avons pas eu l'occasion d'analyser plus en profondeur l'échec, décidant de nous concentrer sur la préparation de Tor-1 Spec 2.

De cet impact, on peut cependant conclure que l'impression 3D est totalement viable pour les fusées de petite taille et que notre design était même peut-être un peu trop précautionneux. Cela signifie que la fusée, si nous avions eu l'autorisation, aurait pu être drastiquement plus légère. Peut-être une future fusée supersonique en fabrication additive ?

Cela nous donne confiance pour le lancement de l'année prochaine, où nous visons à réaliser une fusée de 2 m, 100 % en fabrication additive.

### *Vol 2, TOR-1\_Spec 2 :*

#### *Demande d'un autre lancement :*

Ayant une autre fusée (électronique comprise), le vol de Spec 1 ayant été basiquement parfait hormis le parachute et étant certain d'avoir identifié les problèmes, j'ai demandé un autre lancement. Ce lancement m'a exceptionnellement été accordé.

Cependant, il nous restait au total 8 h pour assembler complètement la fusée et corriger le problème. Il n'y avait donc pas de temps à perdre.

## Étapes prises pour régler les problèmes :

Pour le pliage, c'est simple : j'ai demandé qu'on me montre plus en détail une autre méthode de pliage.

Pour l'émerillon, ça s'est avéré un peu plus complexe. En effet, notre trappe est particulièrement petite, adaptée seulement à notre parachute et à rien d'autre. Changer d'émerillon voulait donc dire en trouver un particulièrement petit. Après avoir demandé à tous les clubs présents sur le camp à ce moment-là, il s'est avéré qu'aucun d'entre eux n'avait un émerillon assez petit. Après avoir cherché pendant 30 minutes de plus, en discutant avec un participant du C'Space, mes yeux ont doucement dérivé sur l'anneau tenant son badge C'Space. Celui-ci comprenait un mini-mousqueton accroché à un tout petit émerillon, le tout en aluminium moulé.

Pas le choix, c'était ma seule solution : j'ai donc coupé la languette qui permettait d'ouvrir le mousqueton et j'ai soudé l'ouverture pour en faire un parfait émerillon.

Il ne me restait plus qu'à refaire les lignes de mon parachute en ajoutant mon anti-torche et voilà... un parachute avec un émerillon de porte-badge. Il s'est avéré que cet émerillon était capable de tenir plus de 15 kg sans casser tout en étant toujours capable de tourner, largement assez pour le vol de la petite fusée de 1,3 kg.

## Résultat du vol

Vol nominal : la fusée a parfaitement décollé et a atterri en piqué.

La pointe a subi un très léger aplatissement (moins d'un mm) malgré ce plantage à 15 m/s dans un sol très dur.



