

Fusex PLUME 22

Rapport de projet

*Collaboration ENSAM Bordeaux, ESTIA,
ISAE-ENSMA, ENSEIRB-MATMECA
Projet NAASC et AJSEP*



PETIT LANCEUR
UNIVERSITAIRE
MULTI-ÉTABLISSEMENTS

ENSAM Bordeaux – ENSEIRB MATMECA – ESTIA – ISAE-ENSMA

Rédaction :
Valentin Le Pape
Victor Remot
Kennie Chaplet
François Blas
Louis Mazaud
Baptiste Eysseric

02/09/2022

Sommaire

Sommaire	2
Présentation du projet	4
Cadre du projet	4
Un objectif sur 4 ans	4
PLUME 22	4
Organisation	5
Organisation générale	5
Organisation inter/intra écoles	6
Gestion du temps	6
Réunions et revues	6
Calendrier	7
Communications	8
Cordées de la Réussite	8
Interfaces	9
Moteur bi-liquide / Partie basse	9
Partie basse / Partie haute	9
Partie haute / Récupération	10
Partie haute / Expérience	10
Partie basse/ Récupération	10
Partie haute	11
Partie basse	13
Origine des choix de conception	13
Modèle du sous-ensemble	13
Validation par simulation éléments finis	14
Validation par essai d'un modèle	15
Méthode d'assemblage	16
Moteur bi-liquide futur et simulé par une masse morte	17
Système de Récupération / Expérimental (ENSAM)	19
Partie expérimentale	19
Choix des expériences	19
Choix des capteurs	19
Fabrication des cartes	19
Partie récupération	20

Bague haute	20
Trappes d'ouverture & système de blocage	22
Parachute	23
DÉROULEMENT DU C'SPACE ET DU VOL	24
Modification effectuée suite aux tests qualitatifs	24
Déroulement du vol	24
Résultats des expériences	25
RETOUR D'EXPÉRIENCE	26
PERSPECTIVES ET REMERCIEMENTS	27

*
**

1. Présentation du projet

1.1. Cadre du projet

Le projet PLUME (Petit Lanceur Universitaire Multi-Établissements) est un projet de fusée expérimentale réalisé dans le cadre du partenariat NAASC – AJSEP.

Le NAASC (Nouvelle-Aquitaine Academic Space Center) est le Centre Spatial Universitaire (CSU) de Nouvelle-Aquitaine. Il regroupe 4 écoles d'ingénieurs (ISAE-ENSMA, ESTIA, ENSAM Bordeaux, et ENSEIRB-MATMECA). L'AJSEP est composée d'une trentaine de membres travaillant ou ayant travaillé à ArianeGroup et qui mènent des activités d'animation auprès des jeunes à titre bénévole.

1.2. Un objectif sur 4 ans

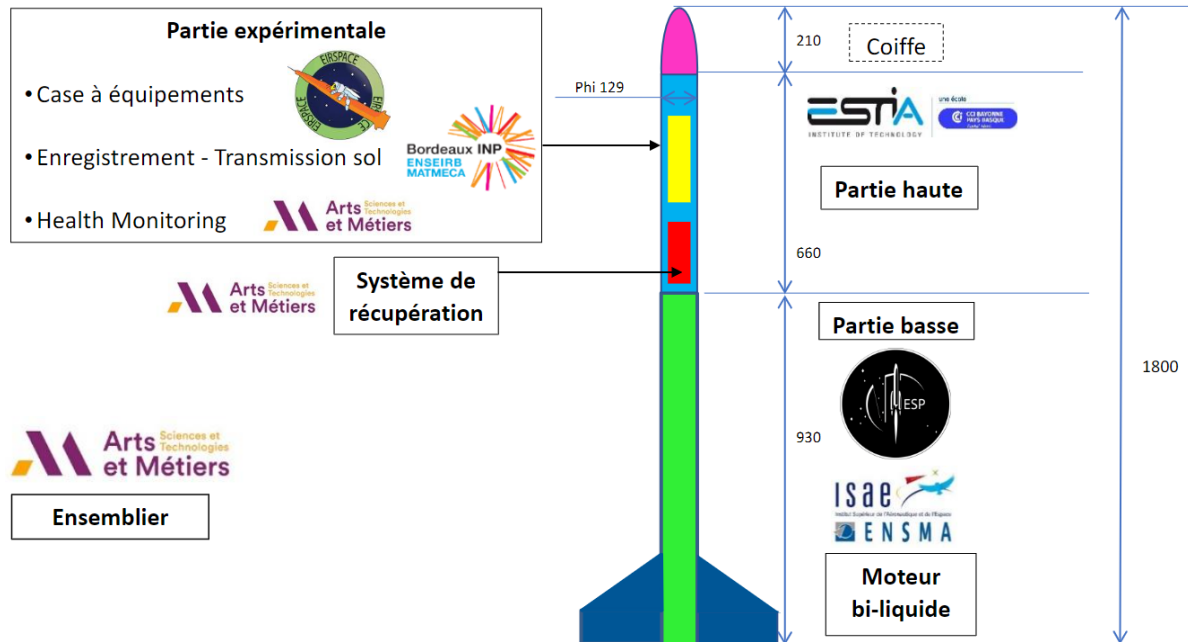
Ce projet a pour ambition de se propulser à l'aide d'un moteur bi-liquide à l'horizon 2024. À cette fin, une nouvelle version du lanceur est fabriquée chaque année, ce qui est suivi par un lancement au C'Space. Seule exception, la première version n'a pas fait l'objet d'un lancement pour des questions de planning et de maturité du projet.



1.3. PLUME 22

Un an après PLUME 21, PLUME 22 est la 1ère fusée expérimentale du projet ayant volé, propulsée par le moteur solide Pro54-5g "Barasinga". Elle est constituée de 3 segments :

- **La partie basse** : Cette partie comporte une structure porteuse de type poutres-bagues qui reprend la poussée du moteur.
- **La partie haute** : Cette partie est une peau porteuse en composite carbone-époxy intégrant le système de récupération et la partie expérimentale.
- **La coiffe** : elle est conçue en composite fibre de verre-époxy.



Différentes parties de PLUME 22 et les écoles correspondantes.

1.4. Organisation

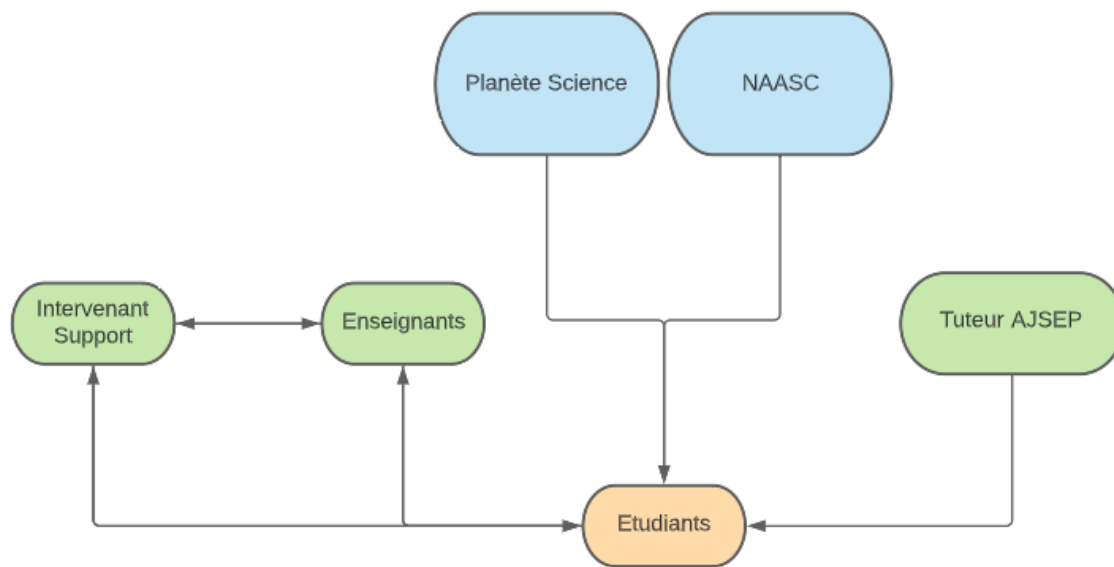
1.4.1. Organisation générale

Le projet de Fusée PLUME est commandité par le NAASC. À ce titre, le NAASC et l'AJSEP fournissent les spécifications techniques aux équipes. Celles-ci incluent le cahier des charges de Planète Sciences, car l'objectif est de participer au lancement du C'Space.

De plus, l'AJSEP suit régulièrement l'avancée de chaque école, qui ont des organisations différentes : à l'ISAE-ENSMA, les étudiants travaillent sans encadrants sur leur temps libre au sein du club Ensma Space Project, tandis que les autres écoles ont intégré le projet PLUME dans l'enseignement. Avec l'appui des intervenants supports, les écoles donnent aux étudiants les moyens techniques et organisationnels pour réaliser ce projet.

Sur le plan technique, elles mettent à leur disposition les outils nécessaires (Fusion 3D), ainsi que la documentation de référence (CNES par exemple) et les templates associés (PowerPoint, Word).

Les enseignants et encadrants ont aussi la charge de montrer aux étudiants comment mettre en place une organisation projet pour leur sujet d'étude, et de les accompagner durant le développement. Les étudiants gardent tout de même leur autonomie, ils sont chargés des projets. Ils sont donc directement en lien avec les enseignants, l'AJSEP et le C'Space à qui ils doivent rendre compte du travail réalisé à travers différentes réunions et comptes rendus.

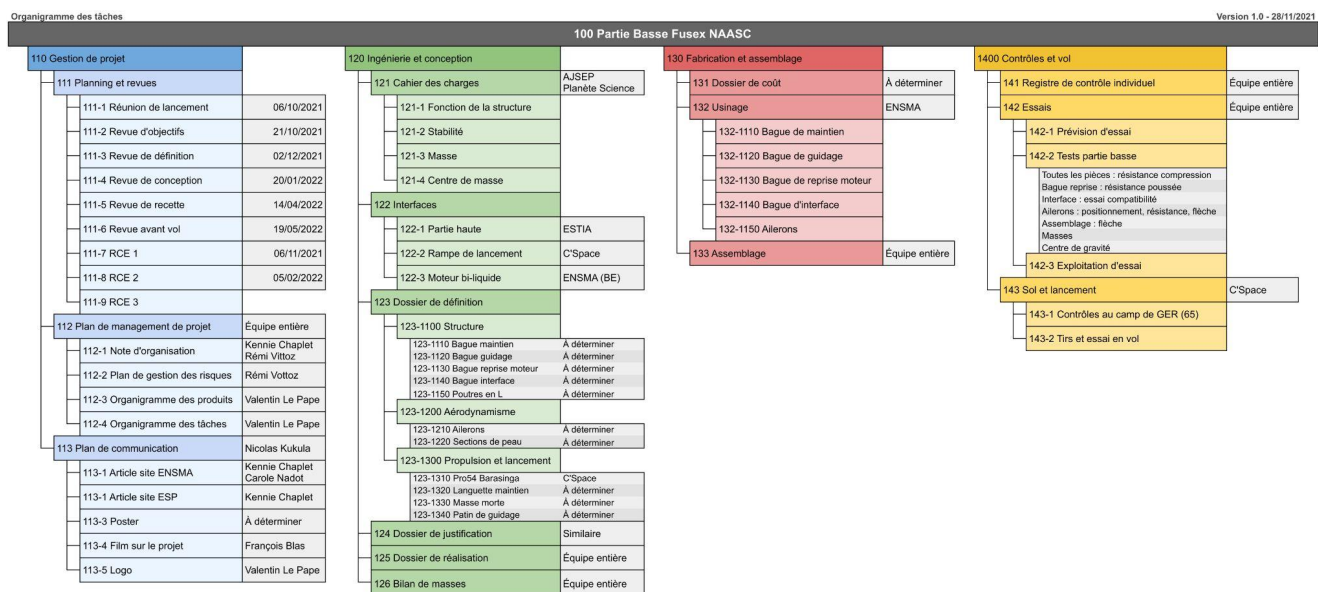


1.4.2. Organisation inter/intra écoles

Les enseignants surveillent régulièrement que le travail du responsable de projet et des étudiants est bien réalisé et prodiguent des conseils quant au travail.

Les responsables d'équipe subdivisent le travail à réaliser pour les étudiants de l'équipe. Les responsables d'équipes sont en contact entre eux via Messenger et Teams pour se partager des fichiers et pouvoir communiquer sur l'avancement et les problèmes éventuels.

Le responsable de l'équipe ensemblier (Victor Rémot) est responsable de l'ensemble du projet et doit s'assurer du bon avancement du projet.



WBS (Work Breakdown Structure) de la partie basse, servant à l'organisation interne de l'équipe.

1.5. Gestion du temps

1.5.1. Réunions et revues

Tous les trimestres, Planète sciences surveille l'avancement du projet via les RCE. À la RCE3 commencent les premiers contrôles techniques.

En parallèle, des revues bimensuelles sont organisées par le NAASC et l'AJSEP pour valider les différentes étapes du projet. Les objectifs des revues ont été définis au départ du projet pour fixer les différents jalons.

- **Revue d'objectifs** : pour que chaque école comprenne les enjeux de son travail.
- **Revue de définition** : pour que chaque école explique son CDC et donne les premières idées pour le satisfaire
- **Revue de conception** : pour que chaque école explique comment et pourquoi elle va concevoir sa partie de cette manière
- **Revue de sous-ensemble** : pour que chaque école délivre sa sous partie

Lors de ces revues, les différentes équipes doivent faire un point d'avancement de leur partie. Les membres du NAASC valident ensuite le passage de la revue, ou proposent une contre-revue si nécessaire.



Une des revues aux Arts et Métiers de Bordeaux

L'équipe de l'ENSAM organise aussi toutes les deux semaines des réunions entre les responsables d'équipes des différentes écoles pour coordonner le projet. Ces réunions permettent de réduire les risques au niveau des interfaces entre les équipes. À cela s'ajoutent les constants échanges d'information via Messenger entre les responsables d'équipes.

1.5.2. Calendrier



Un calendrier plus précis a été réalisé sur le logiciel Gantt Project et est régulièrement mis à jour pour prévenir les différentes équipes des échéances à venir.

1.6. Communications

Depuis le début du projet, nous avons estimé que la communication devait avoir une place importante, à la fois pour donner de la visibilité à PLUME et à ses avancements, mais aussi pour donner l'envie de construire des fusex à ceux qui ne s'y intéressaient pas. Ainsi, nous avons réalisé des affiches (pour PLUME 2021 et 2022), des vidéos l'année dernière (<https://youtu.be/u1fc5faSrOw>, <https://youtu.be/LAhXmEREDLU>), ainsi que différents articles (<https://www.ensma.fr/plume-petit-lanceur-universitaire-multi-etablissements/>) et un logo.



plume NAASC

PETIT LANCEUR UNIVERSITAIRE MULTI-ÉTABLISSEMENTS
ENSAM Bordeaux – ENSEIRB MATMECA – ESTIA – ISAE-ENSMA

PLUME est un projet de fusée expérimentale conduit en partenariat avec le NAASC et l'AJSEP (Ariane Group).

naasc

ESTIA
INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Peau en carbone

Bordeaux INP
ENSEIRB MATMECA
Rack électronique modulaire

ARTS ET MÉTIERS
Système de récupération
Séquence de lancement

ISAE
ENSMA
Conception moteur bi-liquide
Fabrication de la partie basse

L'ENSMA a deux rôles :

Concevoir la partie basse :

- Optimiser la masse d'une Fusée existante de l'ESP, aux performances connues
- Avoir les capacités d'abriter une motorisation liquide-liquide

Caractéristiques du moteur :

- Développé en bureau d'étude au laboratoire Pprime
- Ergols stockables non cryogéniques
- Injection en 2 temps par triplets
- Temps de poussée similaire au P54 Barasinga (3s environ)
- Réservoirs pressurisés au diazote

Abouissements de 2022 :

- Détermination des objectifs
- Conception des pièces sur Fusion 360
- Choix des fournisseurs et des fabricants
- Tests et assemblage des pièces de chaque école
- Préparation des spécificités pour l'an prochain

Originalité du projet :

- Création d'un groupe de travail commun régional avec suivi professionnel du secteur
- Motorisation bi-liquide de la fusée en 2024
- Conception annuelle d'une fusée, processus itératif

BLAS François
CHAPLET Kennie
COLLET Alexis
LE PAPE Valentin
DEVAUX Téo
EYSSERIC Baptiste
KUKULA Nicolas
VITTOZ Rémi
MADELAGE Thibaud
PROST Yann



PLUME 22

4 ÉCOLES
25 ÉLÈVES
1 FUSÉE MULTI-ÉCOLES

ASSISTEZ AU DÉCOLLAGE
16 JUILLET 2022
au CAMP MILITAIRE du 1er RHP de GER (64)

Plume

naasc

ISAE
ENSMA

Arts Sciences et Métiers

Bordeaux INP
ENSEIRB MATMECA

ESTIA
INSTITUTE OF TECHNOLOGY

1.7. Cordées de la Réussite

L'essence même de PLUME est le travail de plusieurs équipes sur un même projet. Les deux premières fusées n'ont été construites que par des écoles d'ingénieurs. Nous avons donc décidé de faire participer des collégiens et des lycéens au niveau de la partie expérimentale de PLUME 23. De ce fait, une équipe à l'ENSMA a contacté Les Cordées de la Réussite et notamment Monsieur Yoann Gac, directeur opérationnel de l'aérocampus d'Aquitaine, qui nous a aidé à trouver un lycée motivé. Le lycée Sud des Landes (Saint Vincent de Tyrosse) s'est montré intéressé par la proposition. Ces élèves seront intégrés au projet et proposeront une expérience dans le cadre d'un cahier des charges. Celui-ci prendra en compte les critères du C'Space, et nous avons déjà pensé à quelques expériences possibles à faire à leur niveau pour leur donner des idées. Les discussions sont encore en cours.



2. Interfaces

Une des particularités de notre projet est d'impliquer plusieurs équipes ayant des objectifs, des méthodes et des positions géographiques différentes. Afin d'éviter les problèmes d'assemblage entre les différents sous-ensembles, il a fallu s'accorder en amont de la conception. Nous avons ainsi rédigé un dossier d'interfaces rassemblant les spécifications nécessaires.

2.1. Moteur bi-liquide / Partie basse

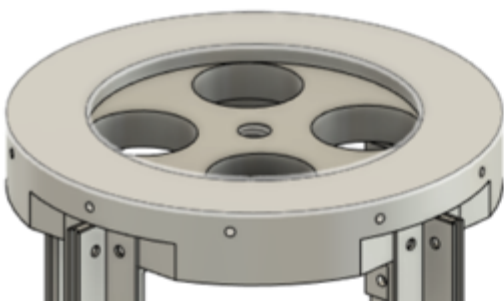
L'interface entre le moteur bi-liquide et la partie basse ne fait pas encore l'objet d'une documentation spécifique. En effet, le moteur n'a pas encore un poids ou une structure fixe, la partie basse se fie donc à des prédictions. Cette année, le moteur bi-liquide a été estimé à 7.5 kg environ. Son centre de gravité a été défini à la moitié de sa hauteur estimée, soit à 450 mm du bas de la partie basse.

La structure et les pièces de la partie basse ont été conçues pour pouvoir être facilement adaptées à la géométrie finale du moteur et des réservoirs. L'installation de l'ensemble a aussi été prise en compte pour le choix d'utiliser une structure porteuse.

Le diamètre nécessaire pour le moteur a été estimé à 125 mm, ce qui a servi de référence pour l'ensemble de la fusée.

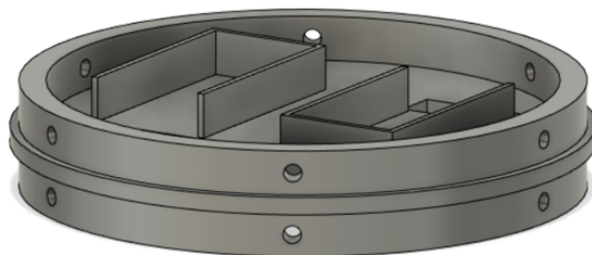
2.2. Partie basse / Partie haute

La nouvelle version de l'interface n'est composée que d'une seule bague plus épaisse (réalisée par ENSMA), sur laquelle se fixe d'un côté les poutres de la partie basse et de l'autre la peau de la partie haute.



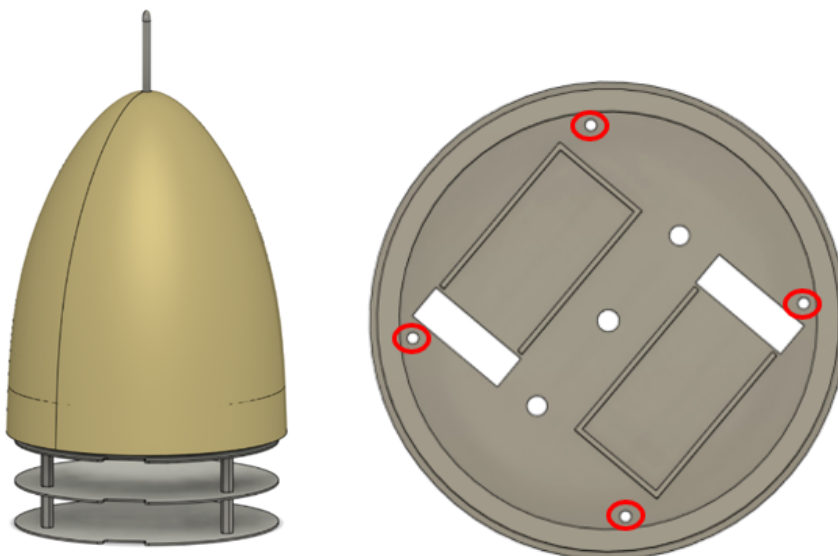
2.3. Partie haute / Récupération

Utilisation d'un double épaulement pour lier de part et d'autre la coiffe et la peau de la partie haute.



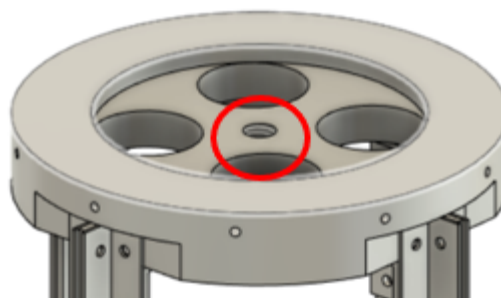
2.4. Partie haute / Expérience

Les racks contenant les cartes électroniques sont soutenus par 4 poutres symétriques.



2.5. Partie basse/ Récupération

Une bague de levage M8 est accrochée à la partie basse qui est rattachée au capteur de contrainte, lui-même rattaché au parachute.

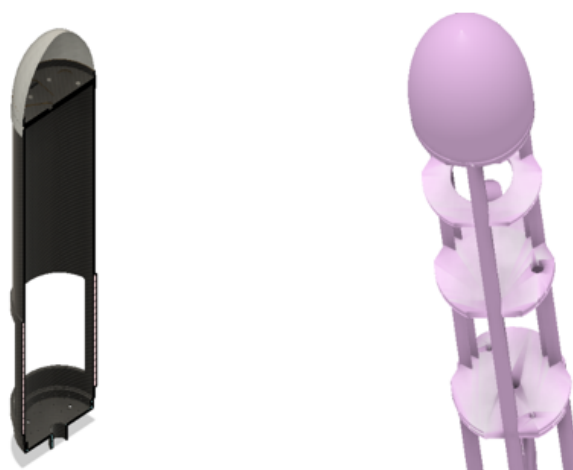


*
**

3. Partie haute

La mission de l'ESTIA consiste en la mise en place de la nouvelle structure de la partie haute de la fusée. En effet, la conception de la structure de Plume 21 n'était pas optimale en termes de volume intérieur et de masse en vol. Nous avons proposé un système de peau porteuse en matériaux composites.

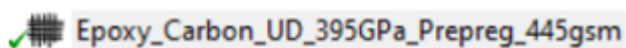
Notre nouvelle partie est une preuve de concept afin de démontrer la faisabilité d'une structure en peau porteuse ainsi que son intérêt réel.



Comme développé précédemment, la peau porteuse qui englobe le tronçon supérieur de la fusée est usinée en composite. Ce matériau, fortement utilisé dans l'aéronautique et l'aérospatial, est le plus adapté dans notre projet. En effet, PLUME 22 nécessite d'être légère pour garantir de bonnes performances, tout en étant très résistante aux sollicitations aérodynamiques et environnementales.

ESTIA a donc fabriqué un tube composite creux de diamètre intérieur 125 mm et d'épaisseur 2 mm sur une longueur de 700 mm. L'outillage nécessaire est un mandrin type alu de diamètre extérieur 129 mm et de longueur d'environ 1000 mm. Sur ce tube sont déposées les couches de tissus de carbone préimprégné (épaisseur 0,2 mm) dont les fibres sont toutes unidirectionnelles (non tissées).

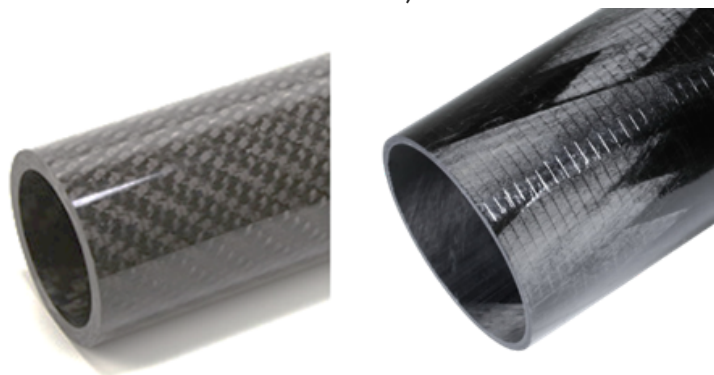
Ci-contre le matériau correspondant dans la simulation qui a donné des résultats de résistances excellents :



Sachant que l'épaisseur d'un tissu est très faible, on convient d'appliquer 10 couches. Afin de consolider l'ensemble des couches, il est nécessaire de compacter toutes les 2/3

couches par une mise sous vide des plis drapés avant d'appliquer les couches suivantes. Les couches situées aux extrémités du tube sont posées suivant l'axe radial de la fusée, sur toute la longueur du tube. Puis, afin de consolider les efforts que la fusée encaisse en vol, on alterne la pose de fibre à 45° et d'autre selon l'axe longitudinale de la fusée, pour les 8 autres couches formant l'épaisseur de 2 mm du tube selon une loi des mélanges répandue en fabrication composite pour l'aéronautique. La pose des fibres est faite à la main, ce qui nécessite d'être régulier sur la tension appliquée au tissu lors de l'application sur le mandrin. Voici ci-dessous deux exemples de tubes drapés en carbone pré-imprégnés.

Sur l'image de gauche, on voit clairement que les tissus utilisés sont des fibres unidimensionnelles orientées à 45°. Tandis que ceux de la photo à droite, les fibres sont orientées à 0° (c'est-à-dire selon l'axe radial du tube).



Les couches de préimprégnés sont ensuite mises sous vide à l'aide d'un système d'aspiration externe, qui permet de maintenir la structure en place. Enfin, l'ensemble moule + fibres est cuit dans un autoclave afin de polymériser l'ensemble : c'est cette étape qui permet d'uniformiser les couches de préimprégné, et apporte toutes les résistances mécaniques au composite une fois solidifié.

Une fois le tube fabriqué, des trous et perçages sont nécessaires pour l'intégration à la fusée : on compte par exemple l'ouverture pour la trappe de parachute et les perçages.



*
**

4. Partie basse

4.1. Origine des choix de conception

La partie basse se base sur les travaux de Plume 21, elle-même s'inspirant de la fusex Volokna (lancée en 2021 par l'ESP). Ce sous-ensemble consiste en une structure porteuse en aluminium.

Le choix de ne pas utiliser de peau porteuse provient des contraintes d'installation du futur moteur bi-liquide : il faudra probablement remplir ou mettre sous pression les réservoirs sur le pas de tir. Il faut donc de nombreuses ouvertures latérales, ce qui serait problématique pour la tenue mécanique d'une peau porteuse.

Par rapport à la version de 2021, l'équipe avait pour objectif une réduction de masse de la structure de 30%, une simplification du processus d'assemblage et l'intégration d'une masse morte pour simuler le futur moteur bi-liquide (voir plus bas).

L'objectif en masse n'a pas été atteint, il y a même eu une augmentation de la masse (+3%, masse finale de 3.8kg). Cela est lié au changement de structure : les poutres en U ont été remplacées par des poutres en L par rapport à 2021 pour gagner de la masse, mais cette structure étant trop fragile, il a fallu ajouter de la matière pour renforcer.

Le processus d'assemblage a été mieux réalisé mais reste à travailler. Notamment, la présence de nombreux trous et vis (dont le nombre a pourtant été diminué entre 2021 et 2022) crée de l'hyperstatisme et donc des surcontraintes importantes. De plus, nous n'avons pas trouvé de méthodes parfaitement adaptées pour l'alignement et la symétrie des perçages.

Enfin, l'objectif d'intégration de la masse morte a été correctement réalisé.

4.2. Modèle du sous-ensemble

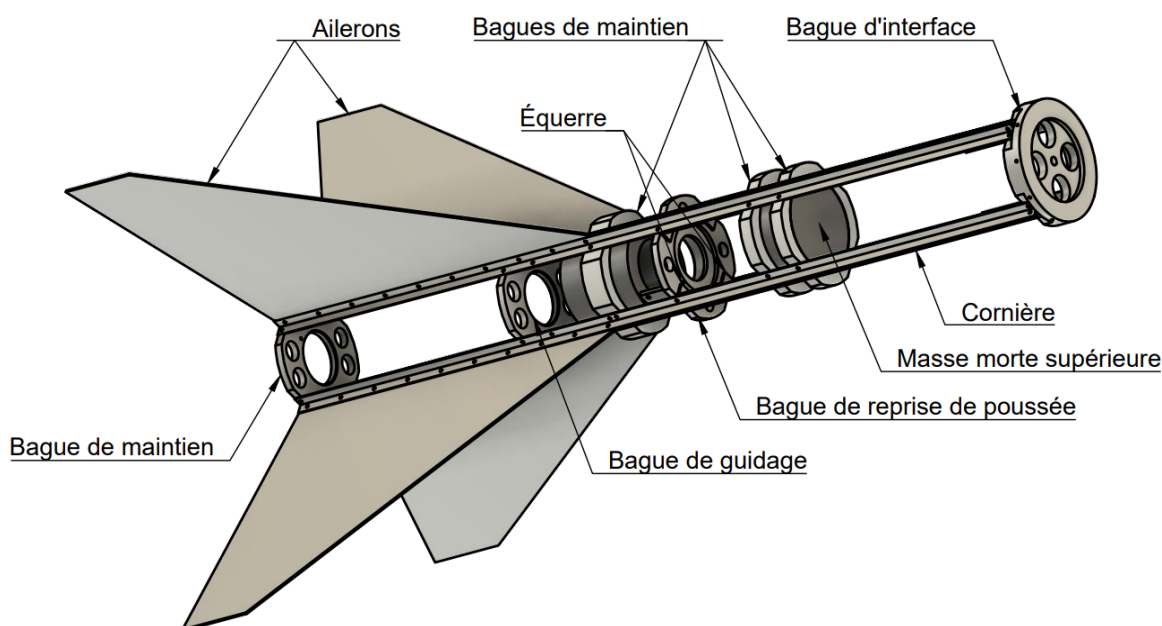
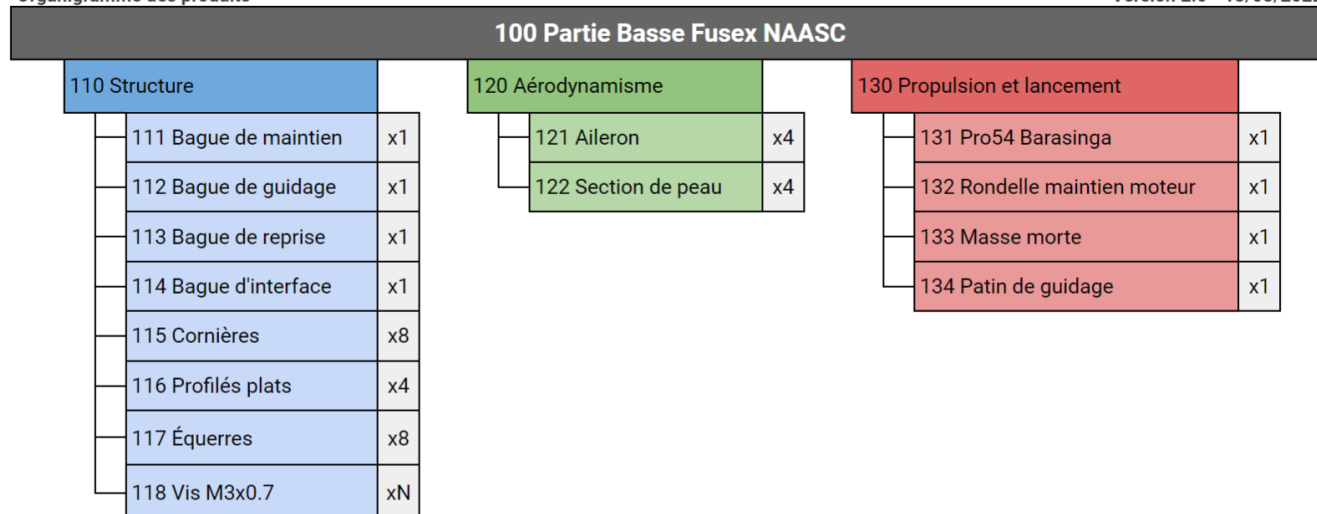


Schéma détaillé. Des profilés plats sont placés entre les paires de cornières au-dessus des ailerons. La peau est un tuyau d'aération de diamètre intérieur 125 mm.

Organigramme des produits

Version 2.0 - 13/03/2022



PBS (Product Breakdown Structure) de la partie basse. Il aide à l'organisation et définit la nomenclature des pièces.

4.3. Validation par simulation éléments finis

Afin de vérifier la tenue mécanique de notre conception pendant le vol, nous avons effectué des simulations par éléments finis sur certaines pièces ainsi que sur le sous-ensemble. Nous nous sommes servis du module "Simulation" de Fusion 360.

Les conditions aux limites utilisées proviennent du cahier des charges. L'intérêt était de vérifier la résistance de chaque bague à l'accélération (et à l'impulsion parachute pour la bague d'interface), la résistance des patins et des ailerons aux efforts du CDC, ainsi que la flèche de l'ensemble de la partie basse. À noter que les simulations éléments finis sur ensemble ne sont pas recommandées en général, mais faute de mieux, elles devaient être effectuées pour justifier la conception.

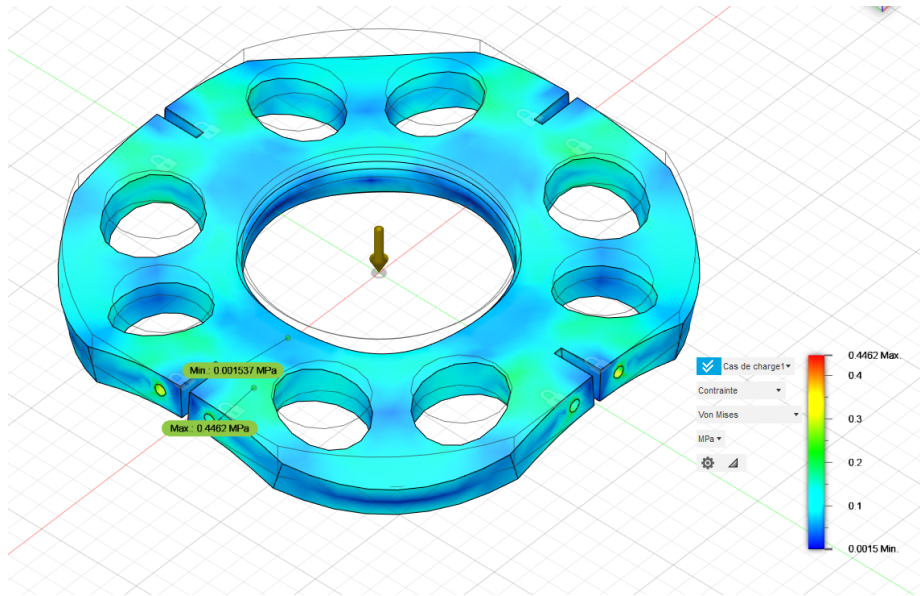
Exemple pour la bague de reprise de poussée :

Fonction de la pièce : Reprendre les efforts du moteur et les transmettre au reste de la fusée.

Conditions aux limites : Les perçages de liaison aux poutres sont fixés dans le repère de la fusée.

Charges appliquées : Force de poussée du moteur max (900 N) appliquée à la zone de contact avec le moteur.

Conclusion : Coefficient de sécurité de 14. La bague résistera à plus de 2 fois l'effort maximal du moteur, donc le cahier des charges est respecté.



Résultat d'une simulation par éléments finis. La déformation est exagérée visuellement.

Nous avons remarqué après assemblage de la fusée que les résultats obtenus par éléments finis sur les pièces en aluminium étaient faux. En effet, la limite d'élasticité utilisée pour les simulations, automatiquement fournie par Fusion 360, était trop grande. Il est donc nécessaire d'utiliser la limite d'élasticité réelle de l'aluminium utilisé. Nous avons calculé cette valeur pour PLUME 21 avec des essais de traction.

4.4. Validation par essai d'un modèle

En plus de la simulation par éléments finis, nous avons réalisé un essai de flexion sur la partie la plus critique de la structure. L'objectif était de savoir si la structure se déforme plastiquement ou non. Les bagues n'étaient pas encore réalisées donc nous avons utilisé du bois.

Une des bagues est encastrée sur une poutre rigide en acier bloquée dans un étau, et à l'autre bague est accrochée un arrosoir. Une force est appliquée sur la bague libre pour recréer les efforts du poids de l'ensemble de la fusée (même moment à l'encastrement) ces efforts peuvent être ajustés en changeant le volume d'eau dans l'arrosoir. (Cette méthode est à éviter lors de la présence de matériaux fragiles, comme du bois, car dans ce cas la rupture est inattendue.)

Cet essai s'est révélé inexploitable. La flèche était trop importante et venait probablement de la déformation du bois côté encastrement, ou bien des déplacements aux liaisons vissées.



Laser pour
la mesure
de flèche

Un autre essai fut réalisé avec la structure de la partie basse assemblée. La partie haute a été considérée infiniment rigide.

Les résultats étaient plus acceptables, la flèche était de 10 à 15 mm selon le côté choisi. Ces résultats sont acceptables pour le cahier des charges cependant ils n'étaient pas suffisants car la partie haute n'avait pas encore été rajoutée.

4.5. Méthode d'assemblage

L'amélioration de la méthode d'assemblage était un objectif pour l'équipe partie basse. Étant donnés les outils disponibles à l'atelier de l'ENSMA, cette amélioration est restée et probablement restera limitée.

Conseils généraux :

- Pour **ébavurer** (enlever les pelures au bord d'un perçage frais), faire un court passage avec un foret plus grand (en quelque sorte on fait un chanfrein).
- Pour la **précision : faire un poinçon** avant de percer. Faire un pré-perçage avec un foret de petite taille (1 ou 2mm).
- Placer le foret le plus profondément possible dans la perceuse pour **éviter le flambage**.
- Ne pas hésiter à **construire un support** en bois pour faciliter le travail.
- **Numéroter les pièces** pendant l'assemblage.

Conseils pour réaliser des perçages alignés à travers deux plaques :

- Serrer les deux plaques fortement (serre-joints). On peut aussi les coller.
- Perçer les deux plaques ensemble. Perçer les plaques séparément est généralement pire, car les imprécisions de mesure s'additionnent.
- Commencer par les perçages aux extrémités puis procéder par dichotomie.
- Boulonner chaque nouveau perçage.
- Faire particulièrement attention à la précision lors de l'utilisation de gabarits. Une petite erreur sur un gabarit devient généralement une grande erreur sur la pièce finale.
- Si deux perçages ne sont au final pas alignés, utiliser un foret plus grand et mettre une rondelle.

Procédure d'assemblage effective :**1. Fabrication d'un gabarits pour les cornières**

On fabrique un premier gabarit en mesurant l'emplacement des perçages.

2. Perçage des autres gabarits

Il est nécessaire d'aligner les perçages des cornières sur le plan vertical afin d'assurer l'horizontalité des bagues. Pour cela, on fabrique 3 autres cornières-gabarits à l'aide du premier gabarit.

3. Fabrication des ensembles verticaux (2 cornières + aileron + profilé plat)

On perce les trois couches ensemble grâce aux cornières-gabarits. Ensuite, on les assemble et on vérifie leur cohérence.

4. Assemblage des ensembles verticaux avec les bagues

Vérification de l'horizontalité des bagues.

5. Perçage des équerres

Pour les perçages reliant les équerres aux bagues, on procède par mesure. Pour les autres, on perce directement à travers les cornières.

6. Ajout de la masse morte et de ses supports

Nécessite le perçage des cornières.

7. Découpe de la peau et assemblage avec les bagues

On trace le chemin de découpe au marqueur et puis on utilise une scie sauteuse.

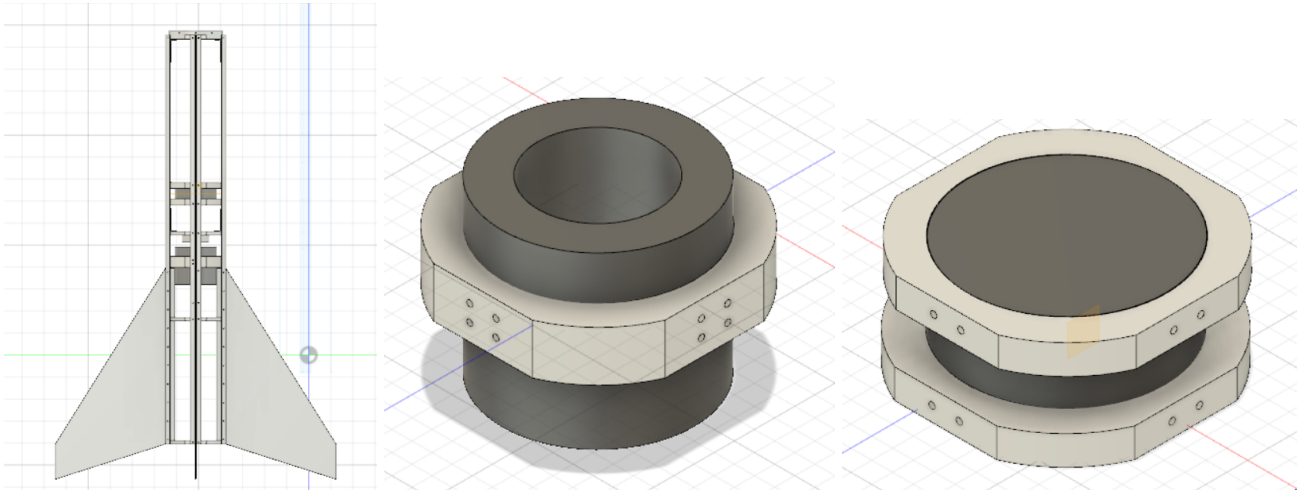
8. Ajout du patin de guidage et du système de maintien du moteur**4.6. Moteur bi-liquide futur et simulé par une masse morte**

Cette année, le bureau d'études moteur bi-liquide de l'ENSMA a fourni une prévision de masse de 7,5 kg. Le centre de gravité du moteur a été pris à mi-hauteur de la longueur totale prévue, c'est-à-dire à 450 mm du bas de la fusée (longueur prévue 900 mm). Ces informations ont permis d'établir l'intégration d'une masse morte dont la masse totale est de 5,8 kg (après déduction des 1,7 kg du Barasinga). La position de la masse morte a été établie à 450 mm du bas de la fusée (le CDG du moteur Barasinga n'a pas été pris en compte).

Étant données les contraintes géométriques, la masse morte a été découpée en 2 : une partie cylindrique annulaire autour du Barasinga et une partie cylindrique pleine au-dessus de la plaque de poussée. Ces deux masses mortes sont maintenues par des supports en PLA imprimés en 3D et vissés aux cornières. Une fois la masse inférieure placée, des calculs de CDG ont permis de déterminer la position de la masse supérieure. L'équation suivante a été appliquée :

$$(m_i \times p_i + m_s \times p_s) / (m_i + m_s) = 450 \text{ mm}$$

où m_i et m_s sont respectivement les masses inférieure et supérieure, et p_i et p_s leurs positions.



De gauche à droite : partie basse avec les masses mortes, masse morte inférieure puis masse morte supérieure.

L'intégration des masses mortes a été un succès fragile. Un manque de communication avec la partie expérimentale (mesure de température) l'a mise en péril : une pièce de mesure non prévue par l'équipe partie basse prenait de la place trop proche de la masse morte inférieure. À quelques millimètres près, cela a pu être résolu.

*
**

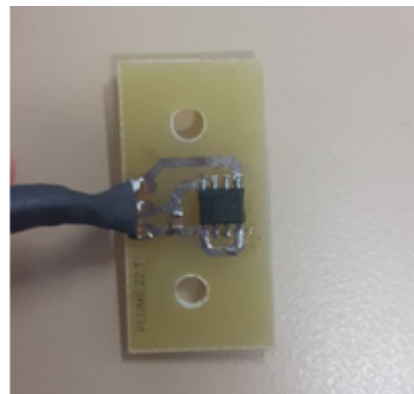
5. Système de Récupération / Expérimental (ENSAM)

5.1. Partie expérimentale

5.1.1. Choix des expériences

Comme leur nom l'indique, les fusées expérimentales embarquent des expériences lors du vol. Ainsi, nous avons fait le choix d'introduire 2 expériences différentes :

- Mesure de la température du moteur ;
- Mesure de la force exercée au niveau du câble de parachute.



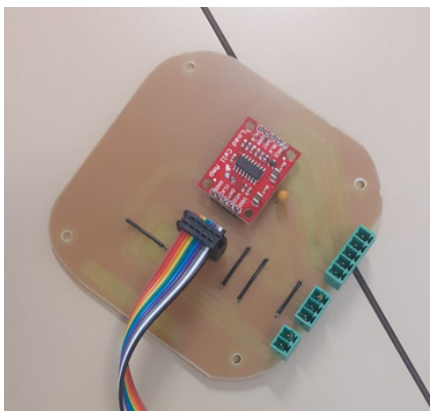
5.1.2. Choix des capteurs

Pour choisir les capteurs, nous avons eu besoin de les dimensionner.

Pour le capteur de force, nous avons utilisé les données du Stabtraj (fichier excel fourni par Planète Sciences). Ce logiciel calcule la force théorique subie par le câble principal du parachute, qui était de 870 N. Ainsi nous avons choisi un capteur résistant à 1000 N.

Pour le capteur de température, le choix a été plus difficile car nous n'avions pas d'informations. Nous avons donc directement contacté Planète Sciences qui nous a donné la température atteinte par le moteur Barasinga (70 °C). Ainsi, nous avons choisi un capteur de température capable de mesurer des températures entre -40 °C et 120 °C.

5.1.3. Fabrication des cartes



Nous avons réalisé une première carte qui va nous permettre de réunir sur une seule et même carte les données des expériences.

L'avantage de réaliser cette carte est que l'on pourra communiquer facilement avec la carte d'enregistrement grâce au connecteur 8 broches.

Nous avons donc branché une nappe qui connectera le connecteur 8 broches de cette carte au connecteur de la carte enregistrement.

Ainsi, sur cette carte, nous aurons donc un capteur température, un capteur de force ainsi qu'un optocoupleur qui permettra de lancer l'enregistrement des mesures.

Nous avons également conçu une carte d'enregistrement car l'ENSEIRB était dans l'incapacité de pouvoir la concevoir dans les temps. Ainsi, dans le cadre de notre rôle d'ensemblier, nous avons pris la décision de fabriquer une carte électronique qui permet d'enregistrer les données des expériences sur une carte SD.



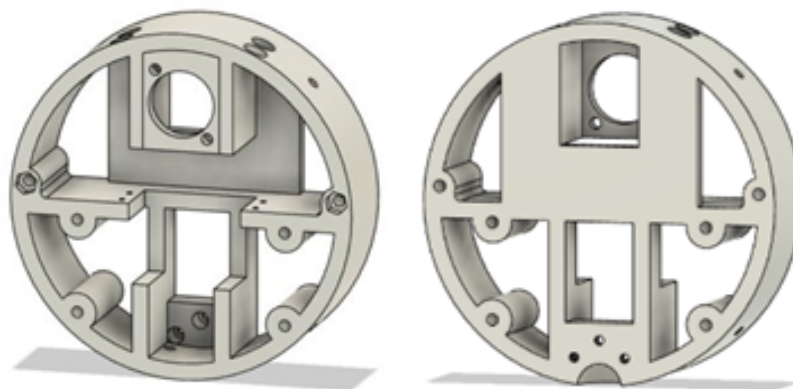
Les résultats seront traités grâce à une carte Arduino Nano qui enregistrera les données sur une carte SD. La partie expérimentale est aujourd'hui terminée. Les capteurs sont calibrés et l'enregistrement fonctionne parfaitement.

L'équipe de l'ENSEIRB essaye aujourd'hui de produire sa carte pour pouvoir l'intégrer dans la fusée avant le vol. Cette carte sera équipée d'un GPS pour pouvoir retrouver facilement la fusée ainsi que d'un altimètre.

5.2. Partie récupération

L'équipe de l'ENSAM est aussi responsable de la fonction de récupération de la fusée.

5.2.1. Bague haute



Conception de la bague haute.

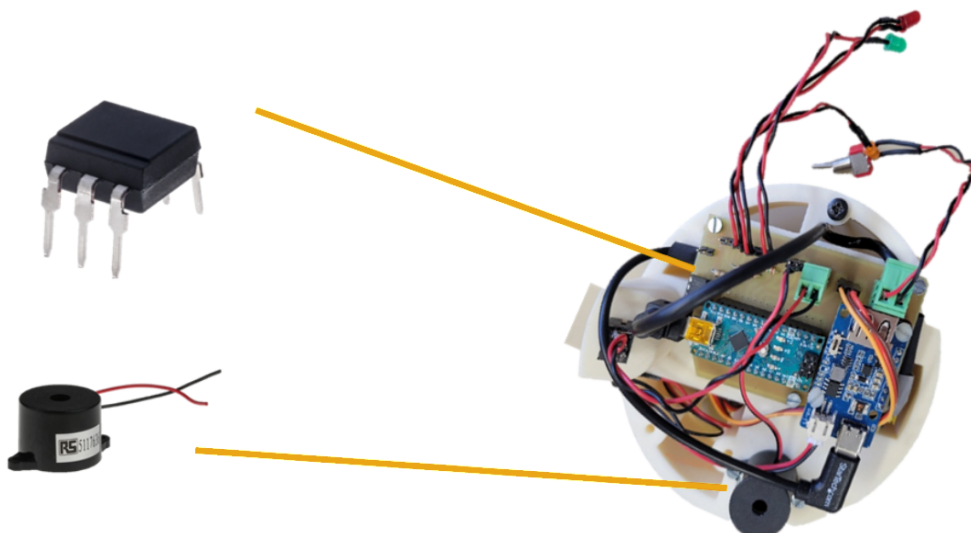
Cette bague permet d'intégrer l'électronique pour l'ouverture des portes et les fixations nécessaires à la mise en place de celle-ci.

**Servomoteur**

Vue du dessous avec l'électronique intégrée.

De haut en bas nous avons ci-dessus :

- Un compartiment pour la batterie nécessaire pour les Li-Po
- Un tube qui traverse la partie haute, il permet de remonter les câbles nécessaires des capteurs vers la carte health monitoring.
- Des ports USB qui donnent sur l'extérieur lorsque le système est totalement monté. Un pour recharger la batterie et un pour modifier le programme.



Vue du dessus avec l'électronique embarquée.

De haut en bas nous avons ci-dessus :

- Un optocoupleur pour signaler à la partie expérimentale que la fusée a décollé
- Un buzzer qui va compléter par un signal sonore les vérifications visuels faites avec les LEDs

Maintenant que nous avons vu en détail la composition de cette bague, il est important de connaître son séquençage :

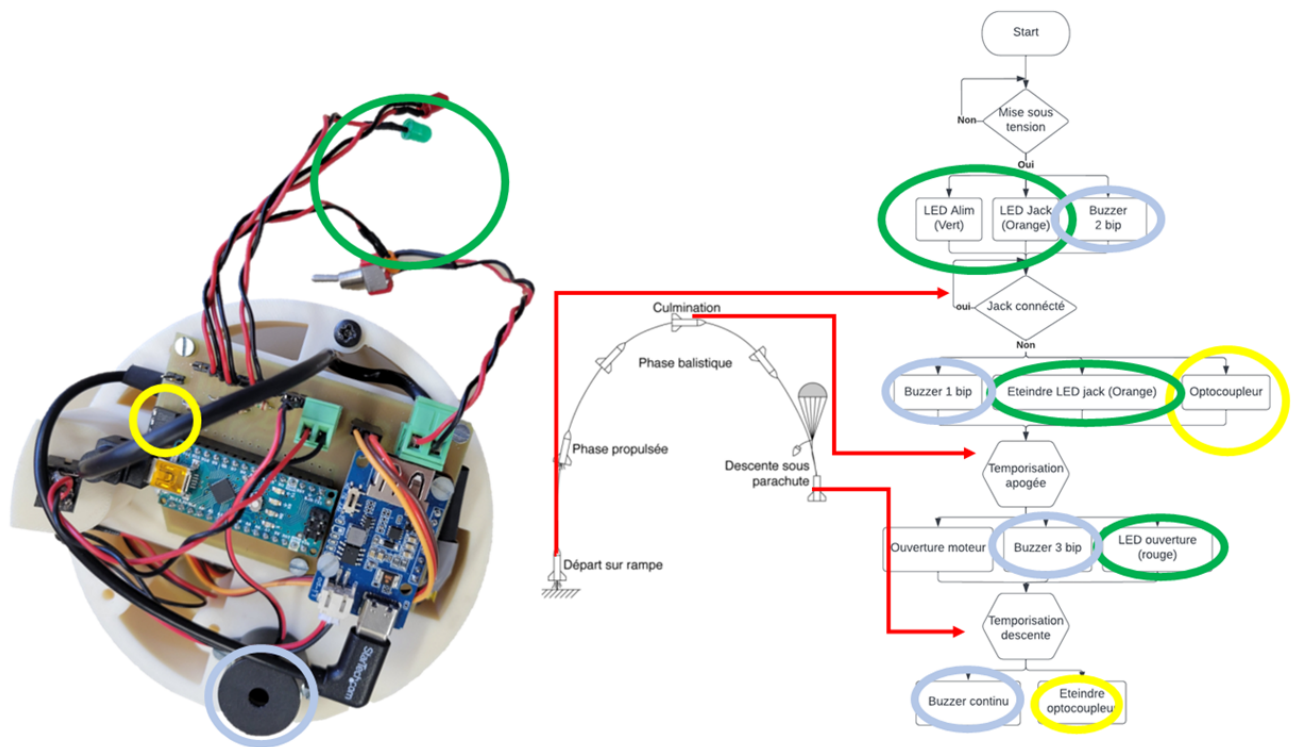
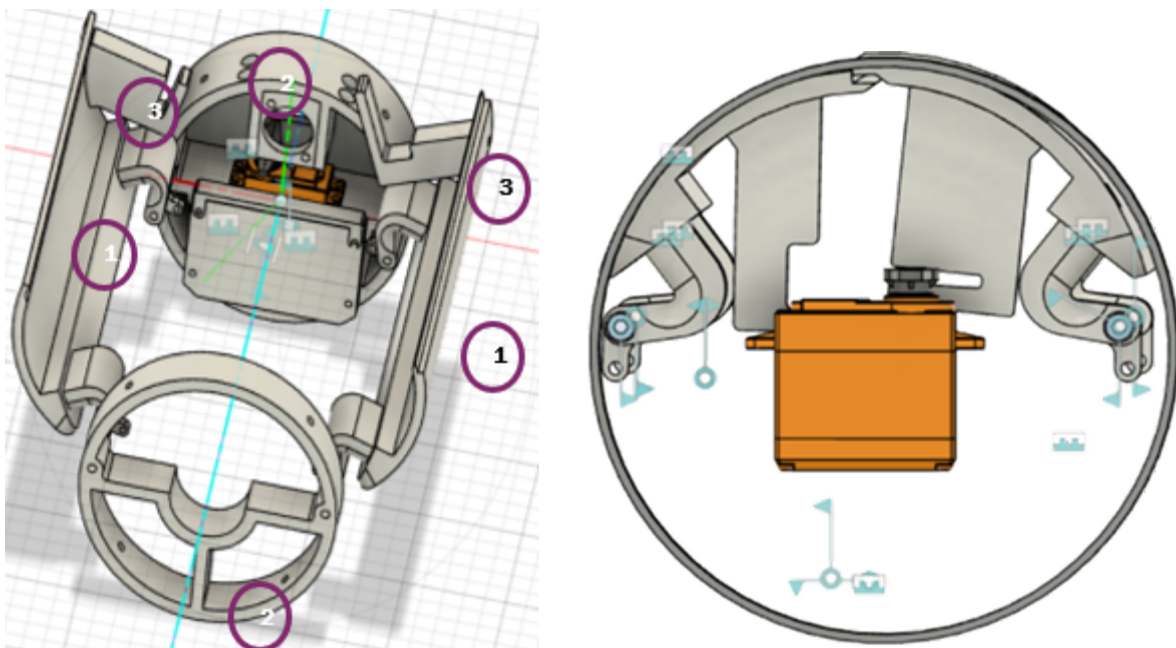


Schéma de la séquence d'ouverture des portes.

5.2.2. Trappes d'ouverture & système de blocage



Le système de récupération de la fusée est constitué de quatre éléments principaux :

- Les trappes d'ouverture (1).

- Les bagues supérieure et inférieure (2).
- Les « blocage-servo » (3).
- Des élastiques d'éjection, qui sont fixés sur les portes entre les charnières.



Au début du vol, le servomoteur bloque les trappes jusqu'à l'arrivée de la fusée à son apogée. Une fois l'apogée atteinte, ces trappes sont libérées. Grâce à un système de ressorts, les deux trappes s'ouvrent et les élastiques dirigent le parachute, fixé à bague supérieure, vers l'extérieur de la fusée.

Nous avons agrandi les portes pour plier en 3 le parachute et plus en 4 afin de faciliter le son déploiement lors de l'éjection. De plus, afin de rendre le système plus léger, nous avons creusé les portes. Enfin nous avons rendu démontable le système d'éjection à l'aide de scratch, ainsi qu'améliorer la force d'éjection en ajoutant en parallèle des ressorts un tissu élastique.

5.2.3. Parachute

Dans le cadre de notre fusée, nous devons choisir un système de récupération pour pouvoir récupérer la fusée dans un bon état.

Nous avons choisi d'utiliser un parachute, ce qui est une solution assez courante. Pour le dimensionner, nous nous sommes servis du Stab Traj fourni par Planète Sciences. Ce logiciel nous donne le diamètre intérieur ainsi que le diamètre extérieur pour être stable.

*
**

6. DÉROULEMENT DU C'SPACE ET DU VOL

6.1. Modification effectuée suite aux tests qualitatifs

Les qualifications ont mis en lumière plusieurs problèmes liés à la communication entre écoles et à la conception. Ils sont présentés ici du plus au moins important :

- Le problème principal était lié à la partie basse. Les tests en flexion dynamique étaient excellents mais la flexion statique a donné des résultats différents sur chaque face de la fusée, révélant ainsi une forme naturellement bananée de la fusée. Cela peut être lié aux sollicitations lors d'essais de flexion précédents sur la partie basse ou à une légère différence de serrage et de placements de vis en partie basse. L'équipe partie basse savait à l'arrivée sur place que cela pourrait poser problème, les poutres en L n'étant pas bien adaptées à ce type de contraintes. Le test de flexion a été passé par dérogation (flèche statique dépassant de 1 mm la valeur limite sur une des faces) après resserrage des vis pour limiter la flexion.
- La sortie parachute n'était pas suffisamment franche. Pour l'améliorer, un resserrage du système de ressort ainsi qu'un pliage plus adapté du parachute a été effectué. Le test est finalement passé, mais nous verrons que le manque d'élan du parachute s'est avéré être la cause du vol balistique.
- La température très élevée lors du C'Space (près de 40° à l'ombre) a causé un ramollissement du PLA, par endroit les inserts ont commencé à se déloger, nous avons dû arrêter de visser entre 14h et 18h. Heureusement le nombre de vis par interface était suffisant pour se permettre de perdre 1 ou 2 inserts par interface.
- La prise Jack a montré des signes de faux contact. Par chance, cela n'était pas lié à un problème interne (interrupteur défectueux etc...) mais à la prise elle-même. Sur les conseils d'une autre équipe, le jack a été remplacé par un clou de diamètre adapté lié à un fil. Cela fut efficace.
- La tenue du moteur pour éviter sa chute par gravité sur la rampe était effectuée par une petite plaquette qui pouvait être décalée par application manuelle d'un moment suffisant. Certains membres du C'Space ont recommandé de rendre ce système resserable par les pyrotechniciens avec une vis papillon (ou tout autre système leur permettant une manipulation simple avec leurs gants). Cela a été anecdotique mais peut éviter des pertes de temps dans la qualification.

6.2. Déroulement du vol

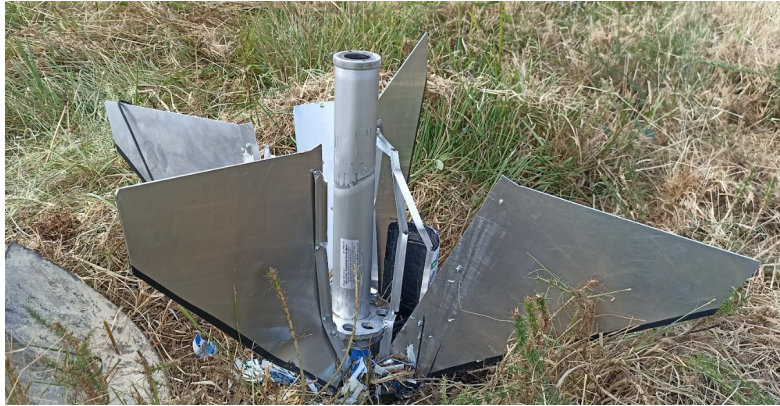
Un problème de démarrage moteur lié aux pyrotechniciens a eu lieu avant le vol (non feu) mais a été réglé rapidement.

Le vol a été réussi jusqu'à l'apogée. La structure a tenu et la fusée était stable. Le déclenchement du minuteur s'est effectué correctement. Cependant, le vol a été balistique.

Pour cause, le parachute s'est déployé tardivement (sûrement à cause de l'éjection peu puissante, la prise au vent n'a pas suffi à le déployer dès l'ouverture des portes). La fusée ayant pris de la vitesse, les suspentes se sont visiblement brisées au déploiement. Elle a été récupérée dans un piteux état, sans possibilité de récupération des résultats d'expériences.

6.3. Résultats des expériences

Malheureusement, aucune récupération d'expériences n'a été possible étant donné l'état de la fusée.



*
**

7. RETOUR D'EXPÉRIENCE

Plusieurs points sont à prendre en compte pour les 2 années finales du projet PLUME. Ils sont triés ici du plus au moins critique.

- La **communication et l'investissement** des différentes écoles doivent être homogénéisés. À cet effet, la mise en place de groupes de travail par interface impliquant des membres de chaque équipe concernée est recommandée. Toute autre méthode de travail équivalente serait aussi bénéfique. Cela éviterait des malentendus comme la non prise en compte d'une pièce de mesure de température dans la mise en place de la masse morte et la non possession des codes Arduino par les membres présents lors de la semaine du lancement. Il faudrait idéalement la présence d'un membre de chacune des 4 équipes-école du projet. Si une école ne peut être là, elle devrait alors fournir toutes les données cruciales pour le vol.
- Il est fortement recommandé d'**abandonner les poutres en L** qui fragilisent la partie basse de la fusée en flexion statique. Des méthodes alternatives de gain de masse doivent être recherchées. L'utilisation de **bagues en delrin** peut être envisagée et a été conseillée par une autre équipe rencontrée au C'Space. Les **poutres en U ou les profilés carrés** sont à garder en tête.
- La technique d'assemblage de la partie basse doit être améliorée de façon à réduire les jeux entre les pièces qui contribuent à la flèche de la fusée.
- Le **système de déploiement** du parachute doit être beaucoup **plus franc** pour résister aux efforts d'accélération de la fusée. Un système de trappe par exemple, bien que moins "propre", serait plus sûr qu'une porte.
- Il est conseillé d'implémenter un **système de serrage par vis papillon** ou autre système facilement manipulable pour le maintien du moteur sur la rampe de lancement. Cela peut être utile aux pyrotechniciens.
- La **méthode du clou** pour remplacer le câble Jack est excessivement simple et efficace et est donc à conserver pour les années à venir.
- La **méthode des bips** pour indiquer le débranchage du jack et le bon fonctionnement du déclenchement parachute (bip grave/aigu) a été très utile et est à conserver. En effet, au soleil les systèmes de LEDs sont souvent déficients puisque difficiles à voir.
- Il est intéressant de tenir compte des **conditions météo** : il fait souvent très chaud lors des lancements de fusées et la fonte de pièces en plastique ou la fragilisation des systèmes électroniques est tout à fait envisageable. Il faut donc éviter les peintures foncées sur les pièces ou zones fragiles.

*
**

PERSPECTIVES ET REMERCIEMENTS

Cette année a révélé un certain nombre de problématiques liées à un manque de communication et à des systèmes mécaniques ou structurels défaillants. Cela n'est pas alarmant ; le principe même de ce projet est d'avoir 4 ans pour favoriser l'identification de ces problématiques et les résoudre les années suivantes. Nous sommes confiants quant à la suite du projet, et plus motivés que jamais.

L'année prochaine aura pour objectif d'améliorer chaque partie, notamment au niveau de la masse et des marges de sécurité. Nous élargirons aussi l'envergure de notre projet, d'une part grâce à une préparation plus poussée de l'intégration du futur moteur bi-liquide, et d'autre part avec l'implication de jeunes passionnés grâce aux Cordées de la Réussite.

L'ensemble des équipes remercient le NAASC et l'AJSEP pour leur encadrement bienveillant et professionnalisant ; les écoles ENSAM Bordeaux, ISAE-ENSMA, ESTIA et ENSEIRB-MATMECA pour avoir permis la réalisation de ce projet ; ainsi que le CNES et Planètes Sciences pour les moyens accordés à nos projets et à leurs bénévoles.

