

Rapport de projet



Mini-fusée Phobos

J u i l l e t 2 0 2 3

LéoFly

Résumé

Le projet de mini fusée Phobos est un projet d'initiation. Son but est de former les nouveaux élèves de Léofly pour leur permettre de participer à des projets plus ambitieux. Les membres de l'équipe sont encadrés durant le projet par des vétérans de l'association, leur apprenant à utiliser les différentes machines du pôle Léonard de Vinci ainsi que les différentes techniques utilisées. Bien que la Mini fusée ait fait un vol balistique, l'objectif, lui, est atteint. Les membres de l'équipe ont en effet obtenu les compétences techniques attendues : prise en main de logiciels de simulation et de modélisation, réalisation d'un tube et d'ailerons en carbone, élaboration d'un système de séparation, etc...



Figure 1 : Lancement de Phobos

Table des matières

I.	Introduction	3
1.	Acteurs du projet	4
II.	Partie mécanique	6
1.	Architecture	6
2.	Pièces modélisées	8
IV.	Partie électronique	16
V.	Expérience	17
VII.	Conclusion	17
VIII.	Remerciements	18

I. Introduction

Pour sa sixième année consécutive, notre association LéoFly a participé au C'Space, la campagne nationale de lancement des projets étudiants, en partenariat avec le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales). Le projet ici développé consiste en la réalisation d'une mini-fusée, tout en respectant un cahier des charges préalablement défini. La fusée doit être munie d'une expérience. Cette dernière peut être mécanique ou électronique. Cette année, nous avons décidé de mettre en place un système de ralentissement piloté.

Considérant la multitude de disciplines concernée par le projet, nous avons décidé d'organiser notre équipe selon trois principaux pôles : un pôle électronique principalement tourné sur les capteurs utilisés et l'expérience, un pôle mécanique dirigé vers la conception et le dimensionnement des pièces contenues dans notre fusée et enfin un pôle séparation dont le rôle est de mettre au point le système d'éjection.

Notre équipe est composée de 8 étudiants en école d'ingénieurs, passionnés par le domaine de l'aéronautique et la technique qui y est liée, nous sommes pour la plupart des 1^{ères années} de cycle ingénieur à L'ESILV. Ce projet fut la première expérience dans ce domaine pour tous les membres de l'équipe, les défis qui y sont liés nous ont motivé pour produire une mini-fusée digne de notre association.

Nos chefs de projets étaient des vétérans de l'association, ayant accumulé une certaine connaissance et expérience dans la création de fusées du cspace. En effet, ils ont participé à la réalisation de nombreuses mini-fusées, mais aussi de fusées expérimentales (ou fusex), étant des fusées plus imposantes que les mini-fusées. Tous les membres de notre association nous ont aussi grandement aidé, nous leur devons beaucoup.

Notre équipe est divisée en trois parties selon les différents pôles précédemment cités, 3 personnes dans le pôle électronique, 3 personnes dans le pôle mécanique et 2 personnes dans le pôle séparation.

1. Acteurs du projet

2.1 LéoFly

LéoFly est l'association d'aéronautique et aérospatiale du Pôle Universitaire Léonard de Vinci. C'est en 2015 que l'association voit le jour, à l'issue d'un projet de troisième année d'élèves ingénieurs. L'association dont l'objectif est de faire découvrir l'aéronautique et l'aérospatial aux élèves des trois écoles (ingénieur, management, digital) ne cessent d'entreprendre de nouveaux projets.

Elle se compose aujourd'hui d'une centaine de membres dont une partie participe à la réalisation de projets annuels. Par ailleurs, la plupart des projets menés par l'association est souvent reconduits sur plusieurs années pour permettre la réalisation de projets ambitieux.

Certains sont réalisés en partenariat avec le CNES (Centre National des Études Spatiales) dans le cadre du macro-projet PERSEUS (Projet Étudiant de Recherche Spatiale Européen Universitaire Scientifique) comme les projets de recherche MINI-APTERROS, ROAR et SERA-IV, ou sous sa supervision comme la campagne nationale de lancement de fusées C'Space (conception, fabrication puis lancement de fusées expérimentales). Des projets internes sont aussi entrepris tels que la réalisation d'un simulateur de vol et la conception et la fabrication d'une aile volante autonome.



Figure 2 : Logo de l'association LéoFly

2.2 Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)

Le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) est un établissement public à caractère industriel et commercial chargé d'élaborer et de proposer au gouvernement le programme spatial français et de le mettre en œuvre.



Figure 3 : Logo du Centre National d'Etudes Spatiales

2.3 Planète Sciences

Planètes Sciences est une association à but non lucratif proposant aux jeunes passionnés des activités scientifiques et techniques expérimentales, grâce à différents projets durant leurs études. Cette année, Planète Sciences nous a encadré grâce à 3 réunions techniques et de contrôle, ce sont les Rencontres Club Espace dites RCE. Les bénévoles sont également présents sur le Camp de Ger (lieu de la campagne C'Space pour l'édition 2023) pour nous apporter des conseils et pour effectuer les vérifications techniques imposées par le cahier des charges avant de procéder au décollage.



Figure 4 : Logo de Planètes Sciences

II. Partie mécanique

1. Architecture

La fusée est divisée en plusieurs sous parties, chacune avec une fonction particulière, les parties du haut vers le bas sont les suivantes : l'ogive, le module parachute, le module électrique, le module séparation, le corps de la fusée et le module propulseur.

La peau, avec la bague mixte, les ailerons et la coiffe, constituent l'ensemble de l'extérieur de la fusée. Le corps de la fusée est formé d'un tube en carbone de 82 mm de diamètre intérieur et de 1 mm d'épaisseur. Il permet de donner une bonne robustesse aux mini-fusées tout en garantissant leur légèreté, tout cela à moindre coût. Enfin, son diamètre permet d'y insérer les cartes électroniques standardisées. Les ailerons sont en bois plaqué de fibre de carbone, ils ont une emplanture de 180 mm, la flèche, c'est à dire la partie de l'aileron qui est inclinée, a une hauteur de 114 millimètres. Le saumon, c'est à dire la partie droite, a pour hauteur 95mm. Ils ont une envergure totale de 120 millimètres. La coiffe est réalisée en impression 3D. Ses dimensions très précises sont détaillées dans la partie des pièces modélisées.

Le module propulseur sera attaché grâce à des bagues. Les bagues constituant le module se doivent de maintenir le propulseur dans son axe et à sa position pendant l'ascension et la descente.

Le module parachute a pour objectif de permettre l'éjection du parachute mais aussi du bloc élec pour pouvoir faire atterrir la fusée. Le servomoteur est commandé directement par le module carte décrit ci-dessous. Il bloque le ressort lors du vol, puis tourne d'un quart de tour à l'apogée, permettant à l'ogive d'être poussée vers l'extérieur par le ressort introduit dans la bague servomoteur. L'ogive sortira et le parachute ralentira la fusée jusqu'à la vitesse imposée par le cahier des charges (entre 5 m/s et 15 m/s).

Le rail électrique centralise toutes les mesures réalisées de la partie électronique du projet. Les bagues du rail sont en plexiglass ou en aluminium pour celles retenant le ressort et seront reliées entre elles avec des pièces en aluminium. Un certain nombre de composants doit tenir dans le rail, nous avons donc établis les mesures de chaque élément afin d'optimiser la place, et d'essayer d'avoir le moins d'étages possibles dans le rail afin de l'alléger au maximum.

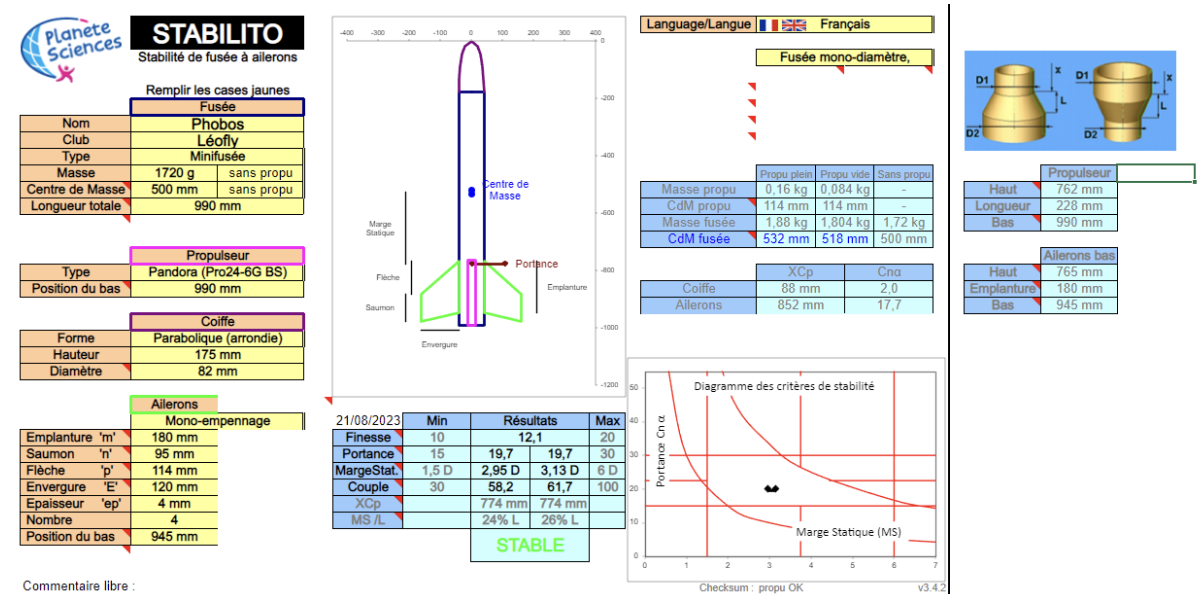


Figure 5 : Stabilito de Phobos

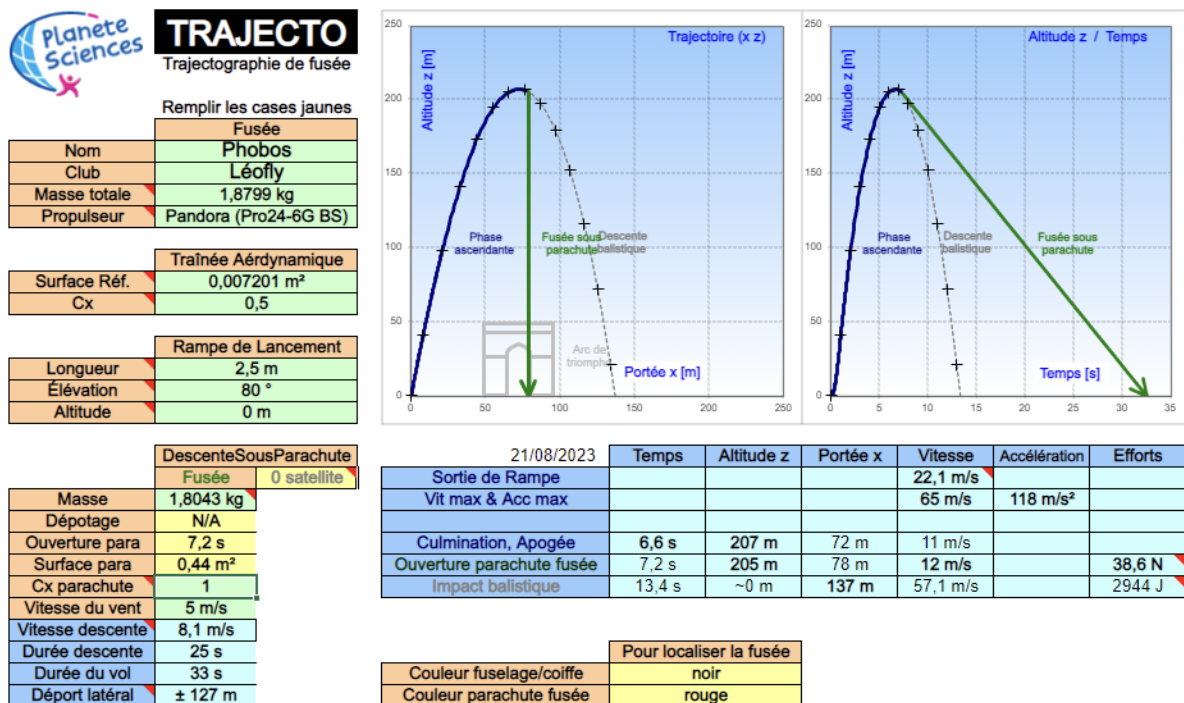


Figure 6 : Trajecto de Phobos

2. Pièces modélisées

➤ La coiffe

Le premier module correspond à la coiffe de la fusée et il sera imprimé en PVC. Pour modéliser cette ogive nous avons regardé des études qui grâce à une soufflerie déterminaient quelle forme d'ogive était la plus aérodynamique et entraînait le moins de résistance à l'air pour la vitesse et l'altitude que nous allons atteindre. Cette étude donnait pour meilleure forme l'ogive elliptique. Nous avons ainsi déterminé une formule pour le tracé de l'ogive sur SolidWorks.

$$y = R\sqrt{1 - \frac{x^2}{L^2}}$$

Figure 7 : Equation utilisée pour la modélisation de la coiffe (Avec R le rayon de 82mm et L la longueur de 175mm)

Vient s'ajouter à la coiffe une épaule qui va lui permettre de rester bien en place durant la phase ascensionnelle. Des encoches sont aussi présentes pour maintenir l'ogive avec le tube durant la descente à l'aide d'une corde.

➤ Le corps de la fusée

Le corps de la fusée est un tube de carbone qui a été entièrement construit par les membres de notre équipe. Nous avons décidé de le construire nous-même pour plusieurs raisons. D'abord, nous ne pouvons pas utiliser les imprimantes 3D de notre école pour imprimer en carbone. Or nous voulions ce matériau pour le tube afin d'obtenir un faible poids mais aussi une solidité accrue. De plus, la construction d'un tube en carbone par un particulier ou par une entreprise coûte cher. Nous voulions dépenser un minimum d'argent pour ce projet, le carbone a en effet été fourni par un de nos sponsors. Enfin, les membres de notre association connaissent parfaitement les techniques de construction du tube en carbone. Ainsi, nous avons pu procéder à la fabrication sans trop de problèmes.

Nous avons d'abord utilisé un tube en PVC qui a déjà été utilisé pour fabriquer les tubes en carbone des précédentes mini fusées de notre association de 80mm de diamètre. Nous l'avons enroulé de papier sulfurisé pour permettre à la résine de s'accrocher au tube facilement et pour faciliter le démoulage.

Ensuite, une fois que le tube était entièrement enroulé de papier sulfurisé, nous avons scotché les bords pour que le papier ne bouge plus. Nous avons positionné le tube sur deux cales pour le surélever afin de passer à l'étape suivante : l'enroulement du tube par la plaque de fibres de carbone. Pour cela, nous avons utilisé de la résine époxy.

Nous devions appliquer de la résine époxy sur tout le long du tube, puis enrouler petit à petit la plaque de fibres de carbone afin qu'elle épouse parfaitement la forme du tube. Il fallait répéter cette opération plusieurs fois afin que toutes les fibres de carbone soient collées et pour avoir un total de trois couches. Comme pour le papier sulfurisé, il ne devait pas y avoir de bulles d'air emprisonnées, ce qui était assez difficile. Il fallait utiliser des gants car la résine époxy peut être nocive pour la peau ; il fallait aussi une blouse car cette résine tâche les vêtements, et cela ne part pas au lavage.

Enfin, lorsque toute la plaque de fibres de carbone avait été enroulée, il fallait attendre plusieurs heures afin que la colle sèche. Nous avons attendu que la résine soit presque sèche pour retirer le tube de pvc ainsi que le papier sulfurisé. Le tube final avait une masse de 145 grammes.

Ce fut le deuxième tube que nous fabriquions pour ce projet. Nous voulions tester une nouvelle technique qui reprend les mêmes étapes précédemment évoquées mais auxquelles s'ajoute la mise sous vide du tube. Cette étape avait pour but de solidifier d'avantage le tube. Cependant, à la fin du procédé, nous avons remarqué que la pression sur le tube lors de la mise sous vide était trop importante et que la résine était aspirée vers un même point. Cela a eu pour effet de fragiliser le tube et de rendre la surface irrégulière.

Enfin, nous avons remarqué qu'une résistance plus grande du tube n'était pas forcément nécessaire, étant donné que le tube a résisté à une chute balistique de 200m et cela sans la moindre égratignure.



Figure 8 : Tube en fibre de carbone de Phobos

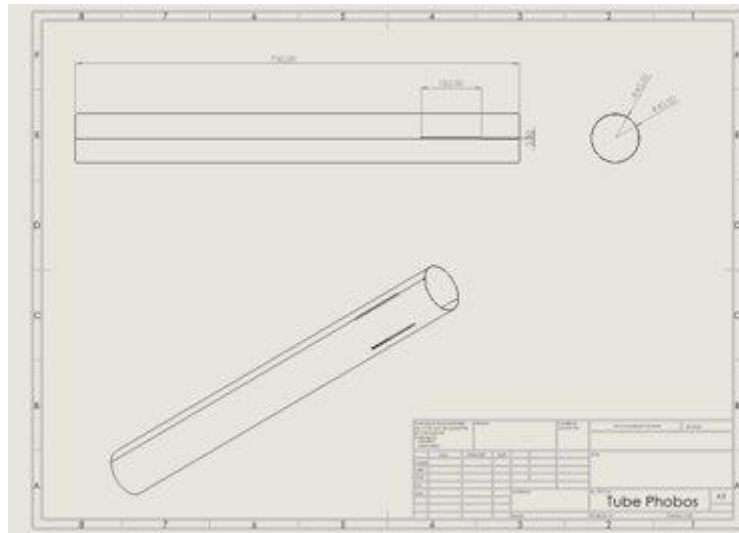


Figure 8 : modélisation du tube de Phobos

➤ Les ailerons

Les ailerons ont été fabriqués entièrement par des membres de notre équipe. Ils sont composés d'une plaque de bois de 3mm recouverte de deux couches de fibres de carbone de chaque côté, soit quatre couches de fibres de carbone de revêtement global par aileron. Les plaques de fibres de carbone sont les mêmes que celles utilisées pour le tube de notre fusée. Cette fois ci les deux couches ont été posées à 45° l'une de l'autre pour pouvoir maximiser la solidité des ailerons.

Nous avons commencé par découper les plaques de fibres de carbone à la forme de nos ailerons. Notre fusée contient quatre ailerons. Il fallait donc découper seize plaques de fibres de carbone car il fallait quatre couches de carbone par aileron. Le découpage des plaques de fibres de carbone est difficile et dangereux. En effet, le fait de découper peut créer des poussières qui sont très néfastes pour la santé. De plus, la découpe provoque un effilement, ce qui abîme le carbone. Afin de résoudre ce problème, nous avons utilisé un scotch et une paire de ciseaux performant, afin de protéger les fibres et qu'elles ne s'effilent pas. Cette technique a assez bien marché car les fibres étaient intactes après le découpage. Pour retirer le scotch il faut faire attention de ne pas effiler les fibres de carbones, pour ce faire nous devons humidifier le scotch avec de l'acétone. Cette technique est très pratique mais il faut faire attention car l'acétone est un liquide dangereux.

Après avoir effectué ces seize découpes, nous devions maintenant découper notre plaque de bois pour obtenir nos quatre ailerons. Il fallait être précis car c'est la forme de la découpe de la plaque de bois qui détermine la forme de l'aileron. Pour optimiser la précision, nous avons choisi d'utiliser la découpeuse laser de notre école, située dans l'atelier à l'étage -1. Pour cela, nous avons utilisé la modélisation de nos ailerons effectuée sur SolidWorks, et nous avons transformé ce fichier en format « DXF » car c'est celui qu'il faut utiliser pour la découpeuse laser. Nous avons placé la plaque de bois au bon endroit dans le compartiment de la découpeuse. Il fallait aérer l'atelier car la machine produit beaucoup de poussières. Ainsi, nous avons obtenu nos quatre plaques de bois découpées. Nous n'avons pas utilisé la découpeuse laser pour couper le carbone car elle était en panne lors de la découpe du carbone.

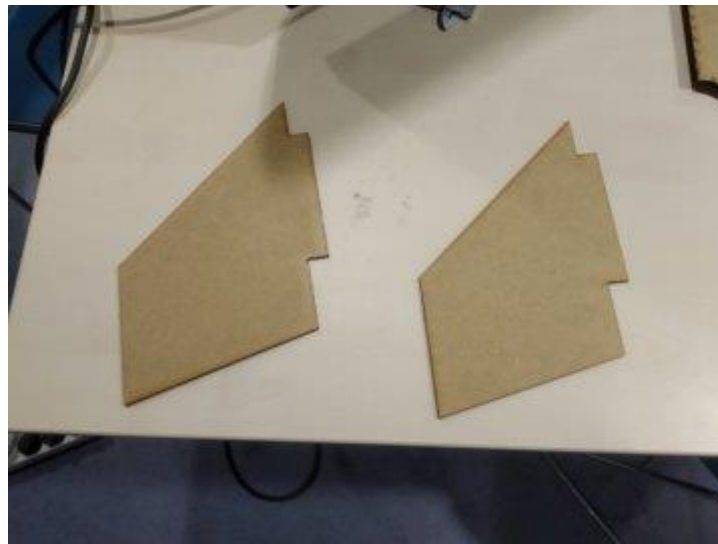


Figure 9 : Ailerons en bois découpés à la découpeuse laser

Suite à ces découpes, il fallait maintenant passer à l'assemblage de toutes ces pièces. Nous avons décidé de les coller avec de la résine époxy, avec une méthode de collage sous vide. Il fallait appliquer de la résine époxy sur les deux côtés d'une plaque de bois, puis coller une couche de fibres de carbone sur chaque côté. Ensuite, il fallait mettre l'ensemble sur une plaque en métal et dans une pochette plastique et aspirer la totalité de l'air présent dans la pochette. Il fallait ensuite recommencer afin d'appliquer la deuxième couche de fibres de carbone de chaque côté, en appliquant donc la résine époxy sur les fibres de carbone cette fois-ci. Nous avons répété l'opération pour chaque aileron. Ce mécanisme permet de coller entièrement les fibres de carbone à la plaque de bois. C'est une méthode très efficace et pourtant peu complexe. Nous avons poncé chaque aileron et coupé les excédants de carbone afin d'éviter des blessures et d'avoir la forme que nous voulions avec une dremel pneumatique. Cette étape est dangereuse car elle produit de la poussière de carbone. Bien que la poussière de fibre de carbone ne soit pas toxique, elle peut irriter les yeux et les poumons. Des protections étaient donc exigées.

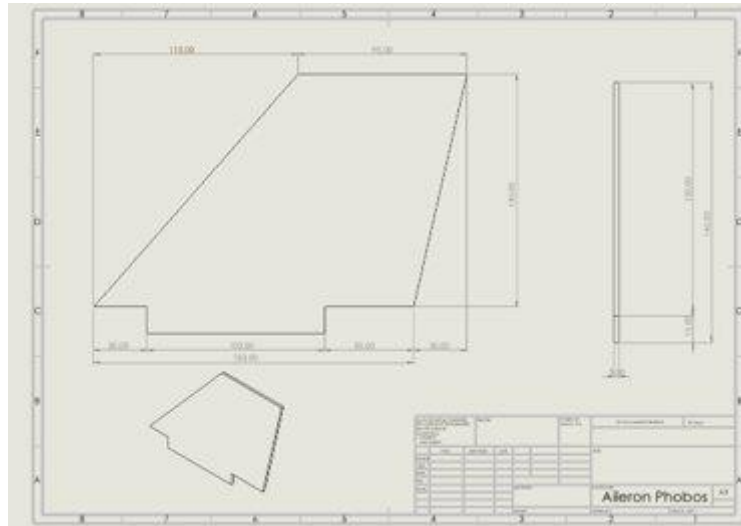


Figure 10 : modélisation des ailerons de Phobos

➤ Le module propulseur

Le propulseur est fourni par Planète Science. Il est fixé à la fusée par trois bagues. La bague possède quatre encoches destinées à accueillir les quatre ailerons de la fusée. Le propulseur utilisé est le propulseur Pandora (PRO24-6G). Les bagues à l'intérieur du tube se doivent de maintenir le propulseur dans son axe et à sa place mais aussi de maintenir les ailerons en place par un trou dans le tube où les ailerons viennent se faufiler. La bague de reprise de poussée se doit de maintenir le propulseur à sa place pendant l'ascension et la descente mais aussi de reprendre la force du propulseur pour le transmettre à la totalité de la fusée. C'est pour cela que la bague n'est pas à l'intérieur du tube mais vient s'emboîter avec lui pour transmettre la force à la totalité du tube.



Figure 11 : bague de retenue moteur

Description	Value	Unit
Masse totale	0.1599	kg
Masse à vide	84.3	g
Masse du chargement	0.0756	kg
Position du centre de gravité ¹ plein	114	mm
Position du centre de gravité ¹ vide	114	mm
Longueur totale	228	mm
Diamètre nominal enveloppe métallique	24	mm
Poussée Maximale	250	N
Poussée moyenne	100	N
Impulsion totale	142.4	N.s
Temps de combustion	1	s
Impulsion Spécifique	192	s

Figure 12 : Caractéristiques techniques et performance

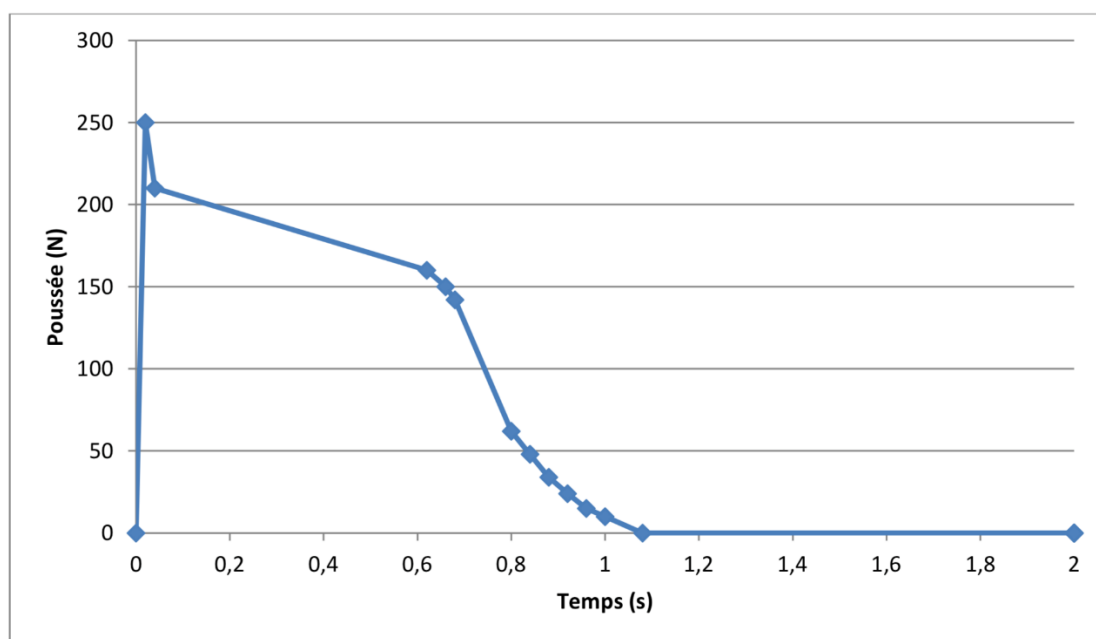


Figure 13 : Courbe de poussée

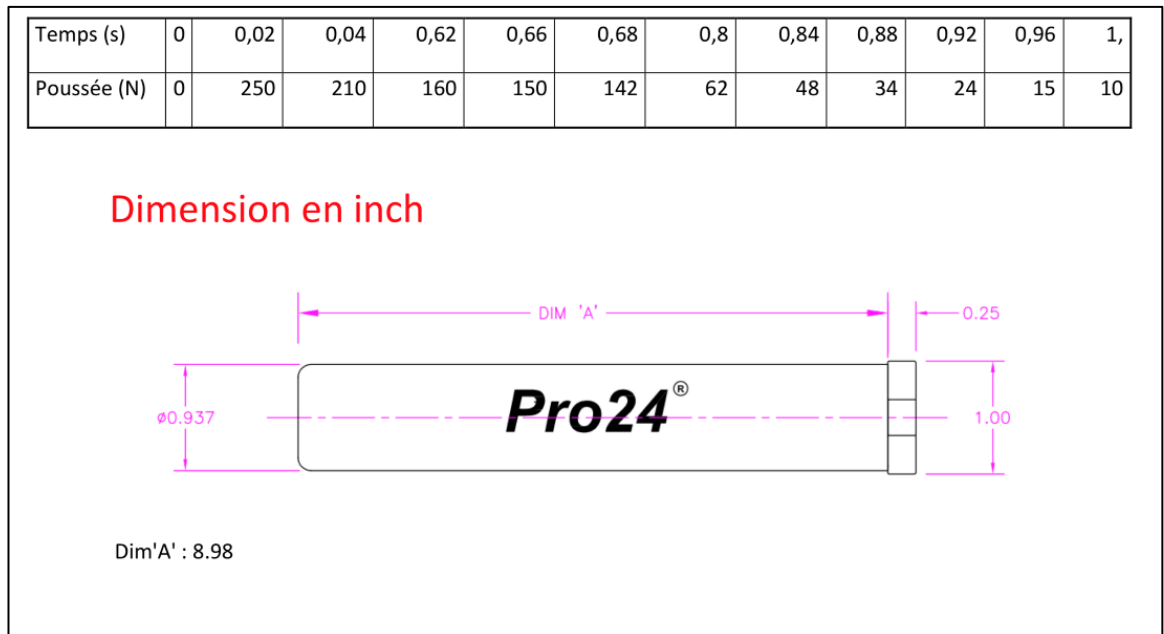


Figure 14 : Caractéristiques & performances

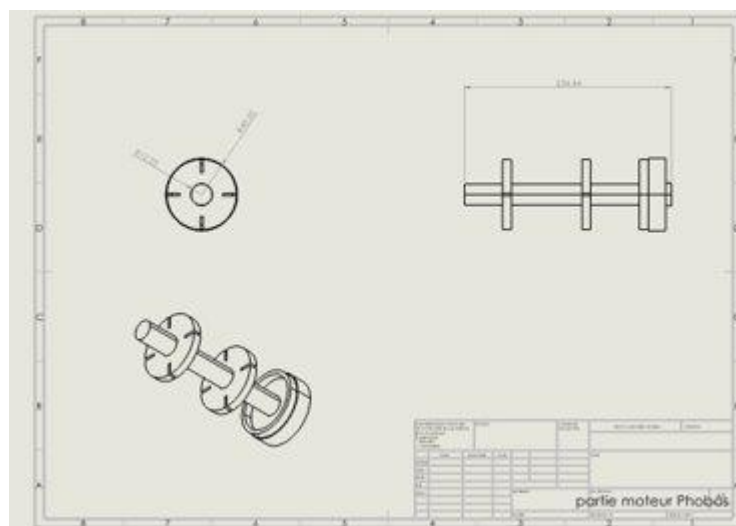
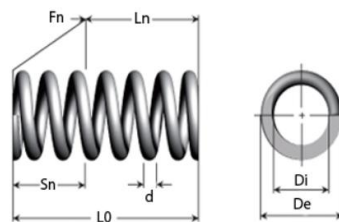


Figure 15 : Modélisation du module propulseur

➤ La séparation

La séparation est faite par un ressort de compression 3N/mm qui est retenue par une tige en aluminium et relié au rail électrique. Nous avons fait le choix d'un tel ressort pour avoir une force conséquente pour pouvoir éjecter le bloc élec, l'ogive et le parachute. Il nous fallait aussi un ressort avec un diamètre intérieur important, cela pour pouvoir faire passer la tige qui retiendra le système et aussi limiter les frottements lors de l'éjection. Le ressort est donc compressé pendant la phase ascensionnelle et maintenu en place par une tige métallique. A l'apogée, un servomoteur vient tourner cette tige pour la décrocher et donc libérer le ressort.



Matériau	Corde à piano
d - Diamètre du fil (mm)	3.76
De - Diamètre extérieur (mm)	49.20
Di - Diamètre intérieur (mm)	41.68
L0 - Longueur libre (mm)	127.00
Ln - Longueur sous charge max. (mm)	67.95
Sn - Course maximale (mm)	59.05
Fn - Charge maximale sous Ln (N)	193.14
R - Constante de ressort (N/mm)	3.27
Série	B

Figure 16 : caractéristiques du ressort de Phobos

III. Partie électronique

La partie électronique de la mini fusée comporte deux systèmes distincts. Le premier système a pour rôle de s'occuper de l'éjection du parachute et le second doit réaliser l'expérience. Une telle séparation est nécessaire afin de respecter le cahier des charges et ainsi assurer une isolation galvanique entre le système de récupération et l'expérience. Si un problème survient au niveau de l'expérience, la séparation et la sécurité ne seront donc pas impactées.

La séparation est assurée par une carte arduino nano. Lors de la mise en place de la fusée en rampe, une prise jack est insérée dans la fusée permettant qu'un courant arrive à la carte. Pendant le décollage et l'éjection de la fusée, la prise jack est arrachée. La carte arduino nano le remarque avec l'absence du courant. Un compte à rebours est activé jusqu'à ce que la fusée atteigne son apogée (simulé par le stabtraj). A la fin de ce compte à rebours la carte arduino nano va faire tourner un servo et enclencher la séparation.

L'expérience utilise une carte arduino uno. Un GPS est relié à cette carte et permet de donner la position initiale de la fusée en rampe. Cette position est retenue et servira d'objectif à atteindre pour la fusée. De la même manière que pour l'éjection, la carte remarque le décollage avec l'arrachage de la prise jack et met en place un compte à rebours jusqu'à l'apogée. Une fois l'apogée atteint, la position est calculée, la carte ordonne au servo moteur contrôlant l'orientation du parachute de tourner si cela est nécessaire, ces deux étapes sont répétées jusqu'à ce que la fusée atteigne son objectif.

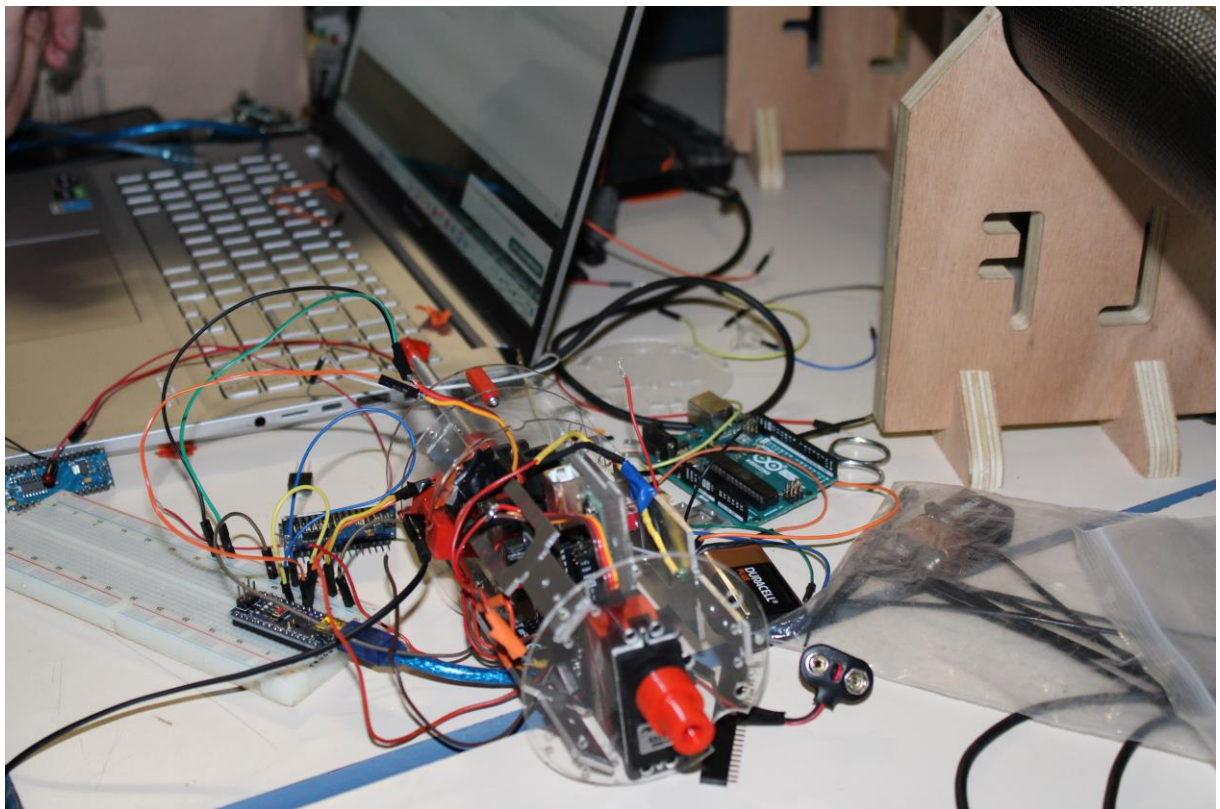


Figure 17 : bloc elec de Phobos

IV. Expérience

1. But de l'expérience

L'expérience que nous avons voulu réaliser pour cette mini fusée est un système de récupération piloté. A la manière d'un parafoil que nous avons fabriqué, la fusée doit être capable de connaître sa position durant le vol par rapport à son point de départ et de s'y diriger durant la descente. Pour ce faire, un servo moteur viendra tirer sur le parafoil pour faire dévier la descente.

Afin de réaliser cette expérience il nous faut mesurer certains paramètres : La position GPS est obtenue grâce à un capteur GPS dans la fusée, l'accélération de la fusée grâce à un gyroscope. Ces données sont ensuite traitées pour obtenir la position de la fusée à tout moment. Suite à cela, la fusée est dirigée vers son point d'origine : cela est fait par un servo moteur tournant et enroulant le fil d'un côté, tirant ainsi le parachute d'un côté, et par conséquent la fusée. L'efficacité du parachute et de l'expérience en général sera évaluée en fonction de la durée de descente et de la distance entre la rampe et la fusée lors de l'atterrissage.

La fusée ayant fait balistique, l'expérience n'a pas pu être entièrement mise en place. Cependant, nous pouvons tirer la conclusion que le parachute que nous avons réalisé n'a pas fonctionné comme nous l'entendions. Nous avons en effet remarqué que la séparation a eu lieu mais que le parachute n'a pas pu se déployer pleinement. Le système électronique quant à lui semble avoir fonctionné étant donné que nous entendions le servo moteur de l'expérience tourner avant le décollage, mais nous ne pouvons pas en être pleinement sûr.

V. Conclusion

L'objectif principal de la mini fusée était de former les prochains membres de l'association, sur ce point nous pouvons dire que le projet est un succès. Les membres de l'équipe ont pu apprendre à utiliser la plupart des machines présentes dans notre école (découpeuse laser, cnc, dremel pneumatique...) mais aussi certaines techniques (fabrication d'un tube en carbone, fabrication d'un parachute, ailerons en carbone...). Cependant pour ce qui est de la gestion du projet et de l'avancement du projet le bilan est plus mitigé. L'association avait 4 projets pour le Cspace cette année, ainsi étant donné que nos chefs de projets avaient un travail déjà important avec ces fusées plus complexes et leurs études, stages, ils ont eu du mal à nous encadrer comme ils l'aurait voulu. Par conséquent nous étions sur certains points laissés à nos propres moyens ce qui a eu pour effet de provoquer un désintéressement de certains membres vis-à-vis du projet. Cependant nous n'avons pas abandonné le projet pour autant, mais avons persévéré pour pouvoir lancer la mini fusée cette année, malgré quelques problèmes techniques évidents qui nous ont valu un vol balistique.

Globalement, et ceci malgré le vol balistique, nous sommes grandement satisfaits du projet Phobos. Cette épreuve technique et humaine fut une véritable révélation pour la plupart des membres de notre équipe. Son apport de connaissance constant ainsi que la difficulté de la tâche fut le moteur qui nous a motivés tout le long de l'année. Et c'est avec beaucoup de motivation et de satisfaction que nous espérons participer au Cspace une nouvelle fois l'année prochaine, avec un projet tout aussi passionnant et complexe.

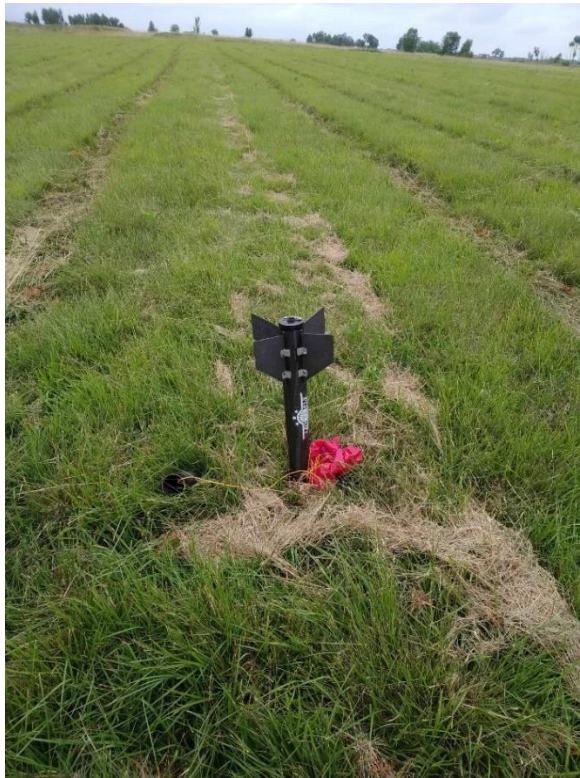


Figure 17 : Phobos après son vol

VI. Remerciements

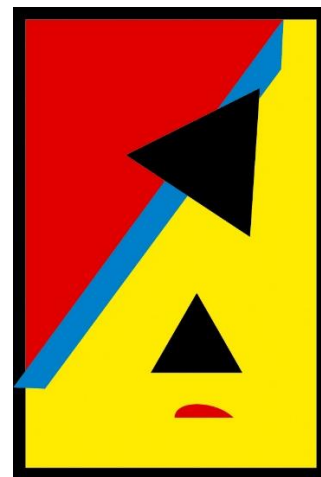
A l'issue de ce projet de mini-fusée Phobos, nous souhaitons remercier chaleureusement tous ceux qui nous ont aidés à réalisation de cette aventure :

Nos partenaires académiques au sein de l'ESILV : la direction, l'EGPE, le DVIC,



Figure 18 : Logos de l'ALDN (Association Leonard de Vinci) et du DVIC (De Vinci Innovation Center)

Nos partenaires industriels, sans qui nous n'aurions pas pu faire aboutir le projet :



AL TEN



Figure 18 : Sponsors de Léofly

Ceux qui nous ont soutenus au sein du Pôle Universitaire Léonard de Vinci : le service de la Vie Associative, les services Généraux, le service de la Pédagogie Digitale.

Ceux qui nous soutiennent techniquement et logistiquement tout au long de l'année dans nos réalisations : l'Atelier (Jean-Marc Bidault et Kévin GALLAIS),

Enfin, merci au CNES et à Planète Sciences pour cette aventure incroyable.