



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

Grado en Ingeniería Mecánica

Voile de désorbitation spatiale

Autor:

García Pérez, Nicolás

Responsable de Intercambio en la UVa

Blanca Giménez Olivarria

Universidad de destino

École Nationale Supérieure des Arts et Métiers

Valladolid, Agosto 2024.

TFG REALIZADO EN PROGRAMA DE INTERCAMBIO

TÍTULO: Voile de désorbitation spatiale
ALUMNO: Nicolás García Pérez
FECHA: 31/05/2023
CENTRO: École Nationale Supérieure des Arts et Métiers
UNIVERSIDAD: École Nationale Supérieure des Arts et Métiers
TUTOR: Philippe Cais

Resumen:

El objetivo global de este proyecto es desarrollar una vela para un CubeSat 3U. Partimos de un proyecto que consiste en el desarrollo de una carga útil de satélite, ICARE, embarcada en el nanosatélite NanoNAASC. Esta vela debe permitir que el satélite regrese a la atmósfera gracias a la fricción generada por esta vela. La desorbitación debe realizarse entre 80 y 365 días para el CubeSat de 6 kg a una altitud de 800 km. Tendremos que dimensionar y desarrollar un mecanismo para desplegarla. La elección de los materiales también es un objetivo muy importante de este proyecto. Nuestro trabajo durante el año se concentrará en la realización de un prototipo a escala. Este último será probado para validar o no las técnicas y sistemas elaborados.

Palabras clave:

Voile de désorbitation, nanosatellite, CubeSat 3U, impression 3D, pliage de la voile



Rapport final

31/05/2023

CHEF DE PROJET :

GARCÍA PEREZ Nicolás

EQUIPE DE PROJET:

GARCÍA PEREZ Nicolás

DE SAJA ÁLVAREZ Miguel

IZQUIERDO SACRISTÁN Pedro

ENSEIGNANTS: LINGOIS Clément, CAIS Philippe

Résumé

L'objectif global de ce projet est de développer une voile pour un CubeSat 3U. Nous sommes partis d'un projet qui consiste en le développement d'une charge utile de satellite, ICARE, embarquée sur le nanosatellite NanoNAASC. Cette voile doit permettre à au satellite de revenir dans l'atmosphère grâce aux frottements générés par cette voile. La désorbitation doit se faire entre 80- 365 jours pour le CubeSat de 6kg à une altitude de 800km. Nous devons dimensionner et développer un mécanisme pour la déployer. L'élection des matériaux est aussi un objectif très important de ce projet. Notre travail durant l'année sera concentré sur la réalisation d'une maquette prototype. Cette dernière sera testée afin de valider ou non les techniques et systèmes élaborées.

Mots-clés :

CubeSat, NAASC, ICARE, DEDALE, maquette, déploiement, voile, matériaux, pliage, modèle.

Table de Matières

INTRODUCTION.....	9
I) CONTEXTE, PÉRIMÈTRES ET OBJECTIFS.....	9
II) INTÉRÊTS DU PROJET	10
III) CADRE THEORIQUE	11
a) État de l’art.....	11
b) Cahier des charges fonctionnel.....	16
i) Cas du produit final ICARE	16
ii) Cas de nos maquettes DEDALE	17
c) Solutions.....	18
IV) Cadre pratique.....	18
a) Premier design	19
i) Résultats.....	19
ii) Inconvénients.....	22
b) Outils mis à disposition	22
i) Fusion 360.....	22
ii) Matériaux pour la construction de la maquette.....	23
d) Deuxième design	25
i) Résultats.....	25
ii) Inconvénients	26
V) REALISATION DU PROJET	27
VI) PHASE EXPERIMENTAL	28
a) Pliage de la voile.....	28
b) DEDALE Alpha	29
i) Objectif	29
ii) Conception	29
iii) Resultats.....	30
IV) Erreurs.....	31
V) Solutions.....	31
c) DEDALE Bêta.0	31
i) Objectif	31
ii) Conception	32
iii) Erreurs.....	32

iv) Solutions	32
d) DEDALE Bêta.1	32
i) Objectif	32
ii) Conception	32
iii) Erreurs.....	33
iv) Solutions.....	33
e) DEDALE Bêta.2	33
i) Objectif	33
ii) Conception	34
iii) Resultats.....	35
iv) Solutions.....	35
f) MONTAGE DU MODELE	36
i) Matériaux utilisés.....	36
ii) Procédure de montage	38
VI) SOLUTIONS POUR LES FUTURS MODÈLES.....	39
a) Fixation de la voile	39
b) Nimesis triggy.....	40
VII) PRESPECTIVE ET ANALYSE DU PROJET.....	40
CONCLUSION.....	42
BIBLIOGRAPHIE	43

Table de Figures

Figure 1- Logo NAASC	10
Figure 2- Illustration de la pollution Spatiale	10
Figure 3- Voile plain versus voile pyramidale c.m-c.p. comparaisons de décalage.....	11
Figure 4 - Configuration de la voile en fonction du satellite	11
Figure 5 - Pliage en forme de Z	12
.....	12
Figure 6 – Double pliage en Z.....	12
Figure 7 - Exemple de double pliage en Z	13
Figure 8 - Structure a lame souple	14
Figure 9 9 - Ex : Inflatable Antenna Experiment placée par la NASA, Jet Propulsion Laboratory (JPL)	15
Figure 10 - Inflable Antenna Experiment (IAE).....	15
Figure 11 - Quart de voile	19
Figure 12 - Division en 4 triangles.....	19
Figure 13- Plaque inférieure	20
Figure 14- Axe central	20

Figure 15 - Plaque supérieure	20
Figure 16 - Mât enroulé autour de l'axe sur la plaque inférieure	20
Figure 17 - Structure complète avec les deux plaques	20
Figure 18 - Structure avec un quart de voile.....	21
Figure 19 - Enroulement des 4 mâts.....	21
Figure 20 - union mâts-axe	21
Figure 21 - Exel pour le calcul du diamètre optimal des mâts	22
Figure 22 - Logo Fusion 360	23
Figure 23 - Couverture thermique (VOILE)	23
Figure 24 - Fils métalliques (MÂTS).....	24
Figure 25 - Machine à impression 3D	25
Figure 26 - Plaques crée par impression 3D.....	25
Figure 27 - Design axe.....	26
Figure 28 - Clé allen pour tourner l'axe	26
Figure 29 - Plaque supérieure avec les nouveaux guides.....	26
Figure 30 - Deuxième design.....	26
Figure 31 - Division de la voile pour le pliage.....	28
Figure 32 - Pliage vertical.....	28
Figure 33 - Pliage horizontal	28
Figure 34 - Quart de la voile plié.....	29
Figure 35: Plaque sup DEDALE 0	29
Figure 36: Plaque inf DEDALE 0.....	29
Figure 37: DEDALE 0.....	30
Figure 38: Axe DEDALE 0.....	30
Figure 39 - Clé Allen	30
Figure 40 - Fils métalliques	30
Figure 41 - Essai de déploiement des fils.....	30
Figure 42 - Exemple de mauvaise impression.....	31
Figure 43 - Mâts à memoire de forme $\varnothing 1,1\text{mm}$ et $\varnothing 1,8\text{mm}$	31
Figure 44 - Axe Dedale Bêta.0.....	32
Figure 45 - Plaque supérieure DEDALE Bêta.1	33
Figure 46 - Plaque inferieure DEDALE Bêta.1.....	33
Figure 47 - Ressort à torsion	33
Figure 48 - Explication modèle DEDALE Bêta.2.....	34
Figure 49 - Implémentation des ressorts sur notre modèle	34
Figure 50 - Modèle DEDALE Bêta.2 enroulé.....	35
Figure 51 - Modèle DEDALE Bêta.2 bloqué.....	35
Figure 52 - Modèle enroulé	39
Figure 53 - Deformation plastique du mât.....	39
Figure 54 - Modèle complète.....	39
Figure 55 - Mâts bien enroulé.....	39

Figure 56 - Embouts avec notre voile	40
Figure 57 - Embouts de câble de frein	40

INTRODUCTION

Ce projet consiste à implémenter une voile sur un satellite CubeSat 3U pour le désorbiter. Ce rapport inclut un état de l'art des solutions existantes sur lesquelles nous nous sommes appuyés pour développer notre mécanisme. Pour ce faire, nous utiliserons des logiciels comme Fusion pour modéliser et nous emploierons les matériaux nécessaires afin de fabriquer une maquette finale. Notre projet est séquencé en deux parties, et le premier semestre concerne l'étude et le développement du mécanisme. Durant le second semestre nous allons créer et aboutir à une maquette finale, on l'espère avant la fin de cette période.

Le projet est réalisé par un groupe de quatre élèves du Programme Grande École à Arts et Métiers. Trois d'entre nous sommes des étudiants espagnols en double diplôme entre l'ENSAM et l'Université de Valladolid. Le reste des personnes concernées par le projet sont deux enseignants encadrants qui travaillent aux Arts et Métiers.

I) CONTEXTE, PÉRIMÈTRES ET OBJECTIFS

Actuellement l'ENSAM dispose d'un espace dédié à une entreprise spatiale, NAASC (Nouvelle-Aquitaine Academic Space Center), et offre ainsi de nombreuses possibilités de réalisation dans le cadre de projets de recherche ou d'élèves ainsi que pour la demande de travaux de la part d'entreprises extérieures.

Dans ces installations, nous travaillons en parallèle avec trois groupes, chacun chargé de différentes parties sur projet global Cubesat. Cela nous permet de partager des informations d'un groupe à un autre ou du matériel chaque fois que cela semble nécessaire. De plus toutes les deux semaines se tiennent des réunions d'avancement, où de nombreuses équipes provenant de plusieurs écoles d'ingénieur interviennent et partagent leur progrès ou problèmes si ils en rencontrent.

Notre objectif est de créer un système efficace et simple pour un déploiement de voile qui permettra la désorbitation d'un satellite. Nous avons réalisé une première partie de bibliographie. Cela nous a permis de choisir ce que nous avons considéré la meilleure méthode de déploiement et les matériaux les plus pertinents. Nous nous projetons maintenant dans une séquence de conception et de réalisation de maquettes. Nos contraintes liées au cahier des charges seront vues à la baisse, car nous souhaitons déjà vérifier qu'un système tel qu'il est imaginé peut fonctionner.



Figure 1- Logo NAASC

II) INTÉRÊTS DU PROJET

Les calculs de l'ESA (European Space Agency) estiment qu'il y a plus de 130 millions d'objets (non opérationnels) contaminant l'orbite terrestre. Parmi ceux-ci, 36 500 sont des débris spatiaux de plus de 10 centimètres, 1 million mesurent entre 1 et 10 centimètres et le reste est composé d'objets entre 1 millimètre et 1 centimètre. [1]

Une loi en France, la loi n° 2008-518 du 3 juin 2008 relative aux opérations spatiales (LOS) traite des opérations privées dans l'espace [2]. Parmi toutes les restrictions, une qui nous intéresse particulièrement. Cette dernière dit que tout objet envoyé dans l'atmosphère doit revenir; c'est-à-dire qu'il ne peut pas être laissé là-haut comme débris spatial.

On en conclut que notre projet de développer une voile consiste à une contrainte réelle pour la conception et la réalisation du CubeSat 3U. Nous participons à ce que le nanosatellite réponde à toutes les exigences légales. Mais aussi à ce qu'il n'amène pas à des répercussions écologiques néfastes telles que la pollution de l'espace.



Figure 2- Illustration de la pollution Spatiale

III) CADRE THEORIQUE

a) État de l'art

i. Configuration de la voile

De nombreux systèmes de déploiement de voile actuels utilisent des voiles plates qui ont tendance à basculer en raison de la pression atmosphérique et des rayonnements solaires. En raison des variations de l'orientation de la voile par rapport à la direction de l'écoulement, la traînée obtenue à partir de la surface de voilure n'est pas optimale. Pourtant les voiles plates ont une surface frontale plus grande qu'une voile pyramidale avec la même longueur de bôme, une géométrie pyramidale carrée, illustrée à la Fig. 3, offre l'avantage d'une stabilité aérodynamique passive autour de l'orientation de traînée maximale, car le centre de masse du système (c.m.) est décalé du centre de pression (c.p.). Étant donné que l'amplitude du couple de rappel dépend de la c.m.-c.p. distance, un décalage plus important génère un plus grand couple pour la même force appliquée. [8]

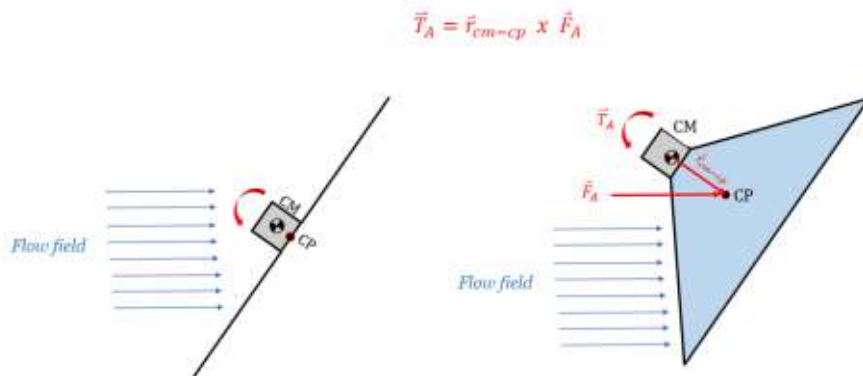


Figure 3- Voile plain versus voile pyramidale c.m.-c.p. comparaisons de décalage

Les cas ont été évalués pour une gamme de configurations d'engins spatiaux hôtes, comme présenté dans le tableau 4. Après une évaluation de l'altitude à laquelle se trouvera le satellite et de ses dimensions, la configuration pyramidale fonctionnera mieux que la configuration plate.

Host Spacecraft	DragSail Configuration	Sail Geometry	Spacecraft Mass (kg)	DragSail Frontal Area (m ²)	Maximum Deorbit Altitude (km)
1U CubeSat	Spinnaker1	Pyramid	1.33	1.77	1145
3U CubeSat	Spinnaker1	Pyramid	4	1.77	980
6U CubeSat	Spinnaker1	Pyramid	12	1.77	855
12U CubeSat	Spinnaker1	Pyramid	24	1.77	795
27U CubeSat	Spinnaker3	Flat	54	18	845
ESPA-Class SmallSat	Spinnaker3	Flat	180	18	770
SmallSat	Spinnaker3	Flat	400	18	730
LV Upper Stage	Spinnaker3	Flat	1000	18	680

Figure 4 - Configuration de la voile en fonction du satellite

ii. Pliage de la voile

La technique la plus classique de pliage est le pliage en Z. Elle consiste tout simplement à aligner plusieurs couches prenant alors la forme d'un Z comme représenté sur l'illustration suivante.

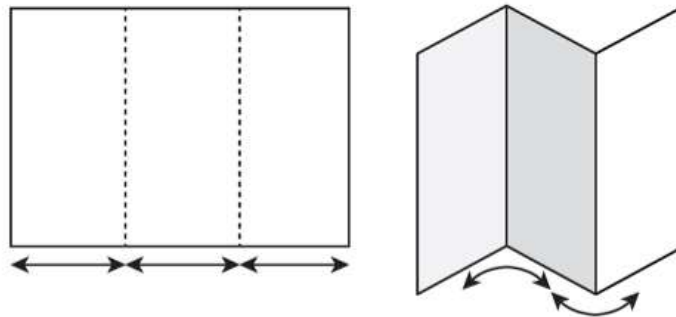


Figure 5 - Pliage en forme de Z

On s'inspire de cette méthode pour créer le double pliage en Z [3][4][5]. Ce modèle est préférable car réduit l'encombrement. Il consiste à plier la voile d'abord le long d'une direction, puis le long d'une perpendiculaire. A la fin, la voile formera une configuration prismatique : le premier sommet du triangle sera attaché au support central, les deux autres aux bouts des mâts.

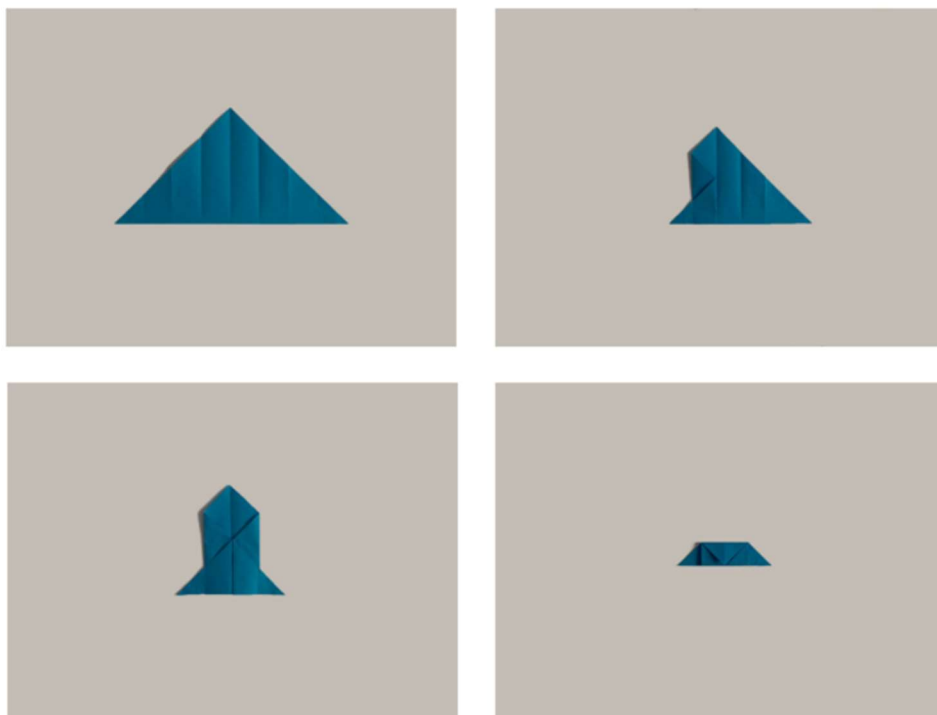


Figure 6 – Double pliage en Z

En répétant cette technique assez de fois nous pouvons plier une voile de presque deux mètres sur deux mètres, en limitant considérablement l'encombrement. On peut le voir avec l'exemple suivant.

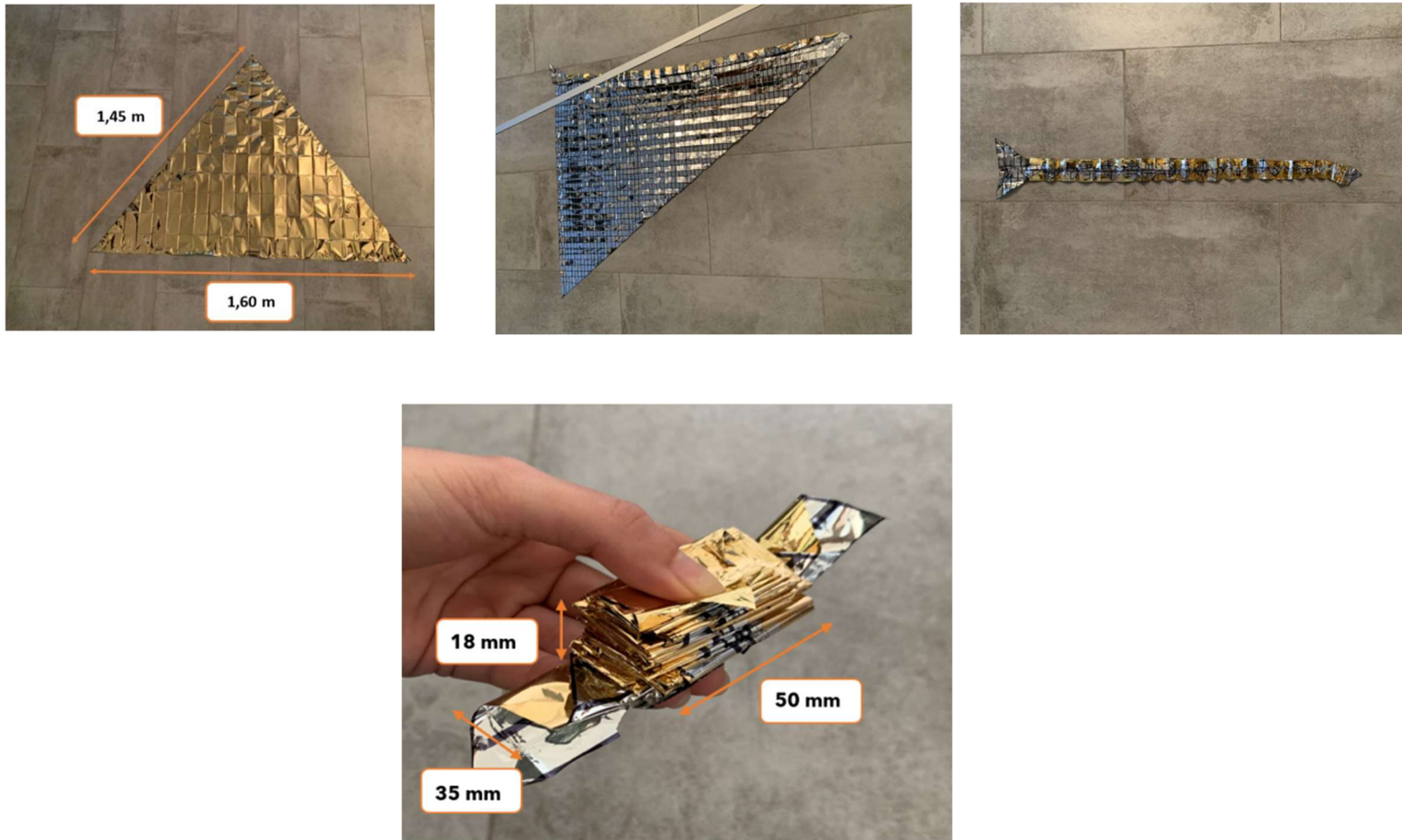


Figure 7 - Exemple de double pliage en Z

iii. Déploiement de la voile

La conception des structures spatiales pose d'énormes difficultés à cause de leur complexité, des limites de poids, des contraintes de lancement, de l'environnement opérationnel et des possibilités de maintenance virtuelles égales à zéro [6]. Les mâts, les panneaux solaires, les antennes et les télescopes sont les quatre principaux types de structures spatiales déployables. Les mâts sont typiquement utilisés pour éloigner des instruments électroniques afin de réduire les interférences ou supporter d'autres structures comme les panneaux solaires. Dans notre cas nous déployons des mâts dans le but de mettre en place une voile.

Structure a lames souples

L'exemple le plus connu de structure déployable à lame souple est les mètre de mesure à ruban. Ce dernier est constitué d'une lame flexible en métal (Cuivre-Beryllium, par exemple). Il dispose d'une section circulaire ouverte d'épaisseur constante. Les avantages de cette technologie sont qu'elles représentent des mécanismes légers, simples, relativement stables en position déployée. Nous aurons de plus une grande flexibilité au niveau des liaisons [6].

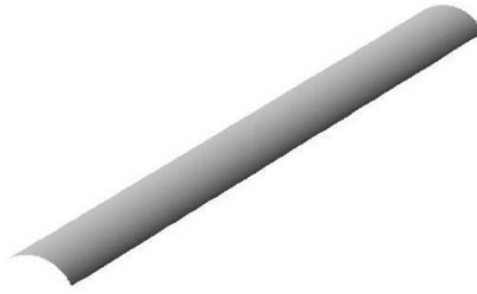


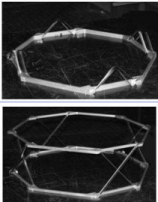
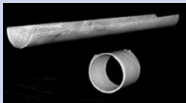
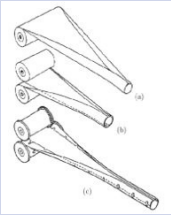



Figure 8 - Structure a lame souple

Par soucis d'esprit de synthèse, l'ensemble des technologies déjà existantes concernant les structures a lames souples sont répertoriées dans le tableau suivant [6].

Liaison Adèle	Liaison TSR (Tape-Spring Rolling Hinge)	VEDLTS (Visco-Elastically Damped Lenticular Tape Spring)	Tube en composite bi-stable	STEM (Storable Tubular Extendible Member)	Le CTM (Collapsible Tubular Mast)
<p>Deux rubans montés en roulement</p> <p>Liaison 'auto-bloquante' très efficace</p> <p>Assez complexe, encombrante et lourde</p> 	<p>Deux rubans face à face</p> <p>Augmente les moments de flexion et de blocage</p> <p>Faible friction générée par deux surfaces en roulement</p> <p>Des câbles guidés par des gorges maintiennent les deux surfaces en contact</p> 	<p>Déploiement amorti sans contrôle actif</p> <p>Deux rubans collés l'un à l'autre par un polymère viscoélastique</p> <p>Nécessite ressorts conventionnels de torsion pour initier le déploiement</p> 	<p>Matériau composite</p> <p>Peut être aplati et enroulé, à l'instar des rubans précédents</p> <p>Cependant : stable dans les deux configurations déployées et enroulée</p> <p>« bi-stable »</p> 	<p>Extension du principe utilisé dans les mètres de mesure</p> <p>Déployées : section circulaire de plus de 360° formant un tube</p> <p>enroulées autour d'une bobine</p> 	<p>Section fermée qui peut être aplatie et enroulée de manière similaire au STEM</p> <p>grande rigidité en torsion pour une faible densité</p> <p>Possibilité de plus de quatre mâts en parallèle</p> 

Structures de tenségrité

La tenségrité définit la faculté d'une structure à se stabiliser par le jeu des forces de tension et de compression qui s'y répartissent et s'y équilibrent. De telles structures articulées sont intéressantes car les éléments en compression disjoints permettent une grande compacité. Elles peuvent être

déployées de manière autonome, en libérant l'énergie de déformation élastique des longerons, ou motorisée [6].

Ex : Coilable Mast (CM), SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) (2000), Cassini (1997), ...



Figure 9 9 - Ex : Inflatable Antenna Experiment placée par la NASA, Jet Propulsion Laboratory (JPL)

Structures gonflables

Ces structures sont ultralégères, elles reposent sur l'emploi de matériaux à la fois souples et rigidifiables.

Elles sont souples pour réduire le volume de stockage puisque la structure est pliée dans un conteneur et se déploie en orbite grâce à un gaz de gonflage. On les dit aussi rigidifiables car, une fois la structure déployée, la résine se polymérise sous l'effet du rayonnement ambiant ou d'une élévation de température, ce qui lui confère sa tenue.

En point négatif on note une faible capacité de chargement en compression [7].

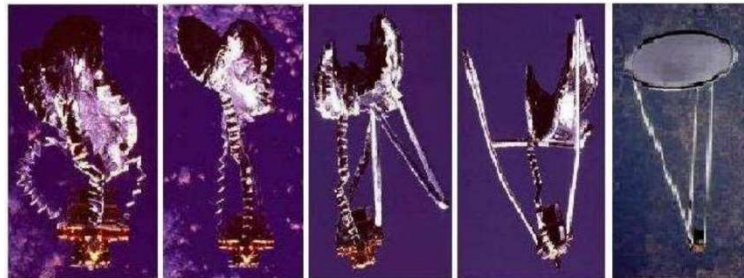



Figure 10 - Inflatable Antenna Experiment (IAE)

Bilan

Pliage en Z	Double pliage en Z	Pliage Miura	Pliage circulaire	Pliage en carrés torsadés	Pliage en "Leaf-in" et "Leaf-out"
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Simplicité du pliage ➤ Assez encombrant 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Simplicité du pliage ➤ Modèle compact ➤ Voiles triangulaires 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Simplicité du pliage ➤ Rigidité élevée de la structure ➤ Voiles carrés et triangulaires 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Nécessité d'un trou au centre ➤ Peu encombrant ➤ Voile carrée 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Pas la nécessité d'être percé en son centre ➤ Voile carrée 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Moins compact que les autres solutions ➤ Voile carrée
✗		✗	✗	✗	✗

b) Cahier des charges fonctionnel

i) Cas du produit final ICARE

Nous avons une grande quantité d'exigences pour notre module ICARE. Nous avons donc mis celles que nous considérons les plus représentatives et les plus importantes.

REEF	DESCRIPTION	PRIORITÉ
ICARE		
L4_3-0001	ICARE doit avoir un encombrement maximal XY de dimensions 85*85mm.	Critique
L4_3-0002	ICARE doit avoir un encombrement maximal Z de 18 mm.	Nice-to-have
L4_3-0003	Les arêtes en Z de la charge utile doivent permettre l'assemblage du composant en concordance avec les contraintes géométriques des rails du Cubesat.	Nice-to-have
L4_3-0004	Chaque arête Z d'ICARE doit présenter un congé de 2mm.	Nice-to-have
L4_3-0005	La masse totale du composant ne doit pas dépasser 0.206 kg.	Important
L4_3-0006	La voile déployée doit présenter une surface comprise entre 1-2 m ² .	Critique
L4_3-0007	Le processus complet de déploiement ne doit pas excéder 3 minutes.	Important
L4_3-0008	ICARE doit avoir la possibilité d'être enclenché depuis une station sol.	Critique
L4_3-0009	ICARE doit avoir la possibilité d'être enclenché automatiquement en cas de défaillance satellite majeure.	Critique
L4_3-0010	ICARE doit disposer d'un système d'éjection en cas d'anomalie entraînant un déploiement non désiré.	Critique
L4_3-1101	L'actionneur doit disposer d'un moyen de mise en tension mécanique (SOL).	Critique

L4_3-1102	L'actionneur doit disposer d'un moyen de RESET mécanique (SOL).	Critique
L4_3-1106	La coque doit être démontable.	Critique
L4_3-1201	ICARE ne doit pas avoir de dispositif pyrotechnique.	Critique
L4_3-1202	ICARE ne doit pas stocker de quelconque gaz.	Critique
L_4-3-1401	La durée de vie opérationnelle de l'instrument en orbite est de « 2 » an minimum.	Critique
L_4-3-1608	Un capteur permettant de s'assurer de l'état déployé ou non de la voile devra être présent et redondé.	Critique
L_4-3-2201	ICARE doit être connectée électriquement au reste du satellite par un connecteur P-C104.	Critique
L_4-3-4201	ICARE doit pouvoir être adaptés aux dispositifs de tests mécaniques vibratoires.	Critique
L_4-3-4202	ICARE doit pouvoir être adaptés aux dispositifs de tests mécaniques de chocs.	Critique
L_4-3-4203	ICARE doit pouvoir être adaptés aux dispositifs de tests de cyclage thermique à vide.	Critique
L_4-3-5002	ICARE doit pouvoir fonctionner dans le vide.	Critique
L_4-3-5101	ICARE doit pouvoir résister à l'ensemble des contraintes mécaniques engendrées par la phase de vol.	Critique
L_4-3-5102	ICARE doit pouvoir résister à l'ensemble des contraintes thermiques rencontrées en orbite.	Critique
L_4-3-5103	ICARE doit pouvoir fonctionner sur une plage de température de -60°C à 80°C.	Critique

ii) Cas de nos maquettes DEDALE

Pour la maquette DEDALE, nous pouvons nous dispenser de toutes les exigences liées à l'endurance dans l'espace. Nous choisissons de plus des dimensions plus grandes afin de tester plus confortablement le pliage de la voile et le déploiement.

Exigences fonctionnelles		
L4_3-0001	DEDALE doit avoir un encombrement maximal XY de dimensions inférieure à 200*200mm.	Critique
L4_3-0002	La voile doit être pliée au dessus du système de déclenchement.	Critique
L4_3-0003	La voile déployée doit présenter une surface compris entre 1-2 m ² .	Critique
L4_3-0004	La voile doit être attachée à des mats qui se déploient avec un angle supérieur à 15°.	Critique
L4_3-0005	La voile doit être déployée une seule fois (non ré-armable).	Critique
L4_3-0006	DEDALE doit être déclenché par une action mécanique (relachement de contrainte).	Critique

Exigences opérationnelles		
Sécurité		
L4_3-1101	DEDALE ne doit pas avoir de dispositif pyrotechnique.	Critique
L4_3-1102	DEDALE ne doit pas stocker de quelconque gaz.	Critique
L4_3-1103	DEDALE ne doit blesser le personnel lors d'un déclenchement intempestif.	Important
Ergonomie		
L4_3-1201	Une opération de maintenance ne doit pas nécessiter d'outillage spécifique.	Important
Exigences d'interfaces		
Interface mécanique		
L4_3-2001	DEDALE doit disposer d'un système de liaison mécanique avec le Cubesat conforme au standard, ie des tiges filetées M3.	Nice-to-have
Exigences de réalisation		
Démontabilité/Réparabilité		
L4_3-3001	DEDALE doit faire appel à une logique d'assemblage reposant sur de la visserie.	Important

c) Solutions

Globalement nous avons une solution pour l'aspect de la voile et son pliage et une solution pour le système de déploiement.

Pour la voile nous utiliserons du mylar, un matériel capable de supporter toutes les conditions de pression et de température dans l'espace. Pour le pliage, nous allons utiliser la méthode du pliage qui sera expliquée plus bas ([link](#)). Cette technique de pliage nous permet un déploiement sans ruptures ou plis de la voile et qui prendra ainsi la forme des mâts.

Pour le système de déploiement, nous allons utiliser un matériel avec mémoire de forme pour les mâts. De cette façon, les mâts seront entre deux plaques et sortiront par quatre trous. Grâce à la mémoire de forme, ils s'étireront jusqu'à être tendus comme nous le souhaitons. Cette partie sera expliquée et illustrée avec le [premier design](#), qui consiste à un modèle 3D du système de déploiement.

IV) Cadre pratique

Nous portons un nouveau projet qui a pour objectif d'innover. Pour rappel nous développons une maquette d'un système de déploiement d'une voile dans un CubeSat 3U. Une telle technologie n'a encore jamais vu le jour. Ainsi nous devons employer les outils et les ressources nécessaires afin

d'imaginer et créer. Nous étudierons dans cette partie les ressources utilisées ainsi que les démarches à suivre pour le bon avancement de notre travail.

a) Premier design

Dans cette partie nous allons parler du premier design. Ce dernier nous a causé des difficultés de conception. Cependant il donne une idée globale du fonctionnement du mécanisme.

i) Résultats

Tout d'abord nous présentons l'idée du mécanisme, avec le pliage, la disposition de la voile ainsi que le mécanisme qui va la déployer.

Voile :

Pour la voile nous avons décidé, d'après notre étude bibliographique, de faire le double-Z-folding qui nous emmène à diviser la voile en 4 triangles. La voile aplatie aura une forme carrée de dimensions encore à définir et la division sera donc :

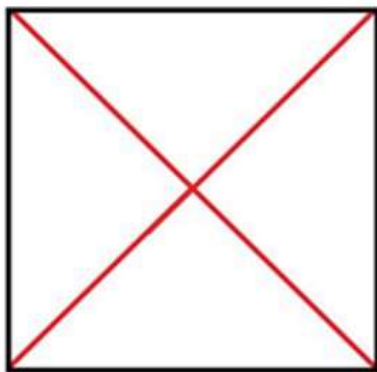


Figure 12 - Division en 4 triangles

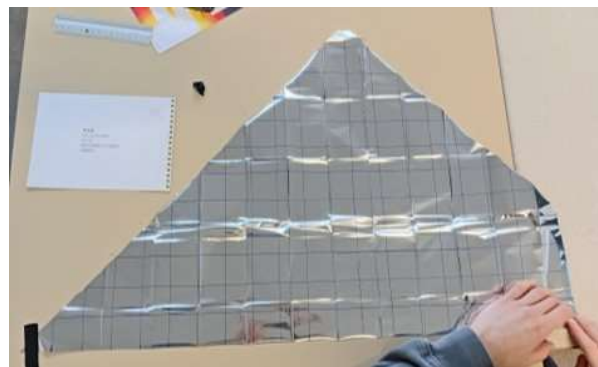


Figure 11 - Quart de voile

Quand la voile sera déployée, les quatre triangles formeront les faces supérieures d'une pyramide. Ainsi les mâts devront donc avoir une certaine inclinaison.

Mâts :

Dans notre conception nous trouverons 4 mâts, chacun représentant une moitié de diagonale du carré de la voile. Ils auront un comportement superélastique. D'abord déformés, ils reprendront leur forme stable ensuite pour mettre en place la pyramide une fois le système déclenché. Ces mâts seront enroulés autour d'un axe central et sortiront grâce à des guides situés dans la plaque supérieure du CubeSat, ils auront une inclinaison de plus de 15° .

Structure :

Pour le développement de la structure nous avons choisi d'installer une plaque supérieure et une plaque inférieure qui simuleront l'espace de notre module dans le CubeSat et aussi un axe central qui doit pouvoir tourner afin de permettre aux mâts enroulés de se déployer.

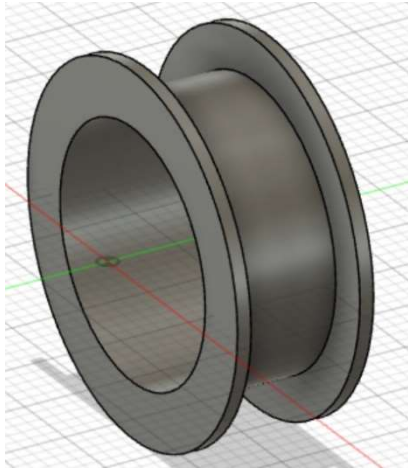


Figure 14- Axe central

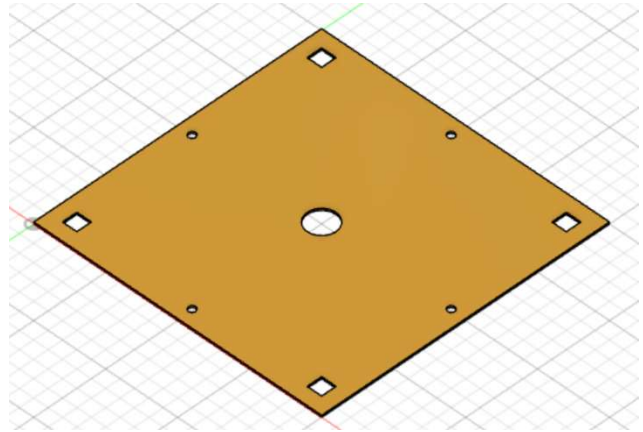


Figure 13- Plaque inférieure

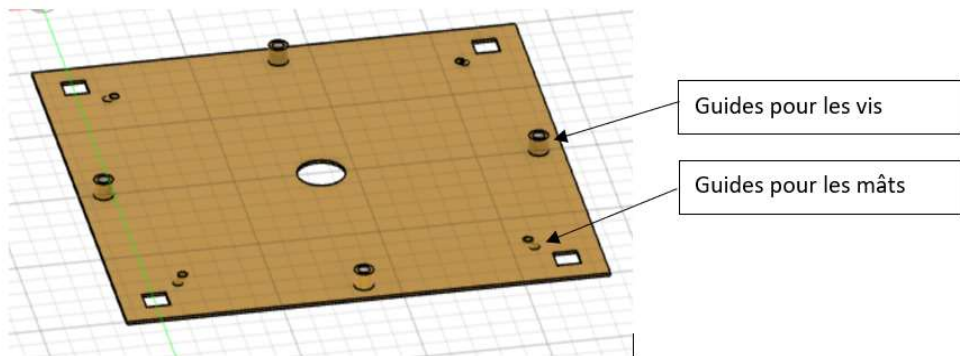


Figure 15 - Plaque supérieure

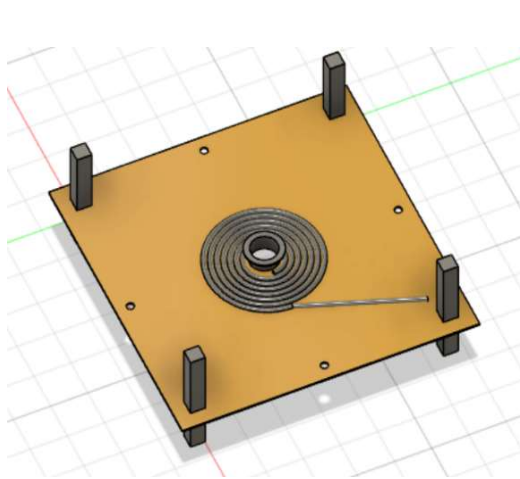


Figure 16 - Mât enroulé autour de l'axe sur la plaque inférieure

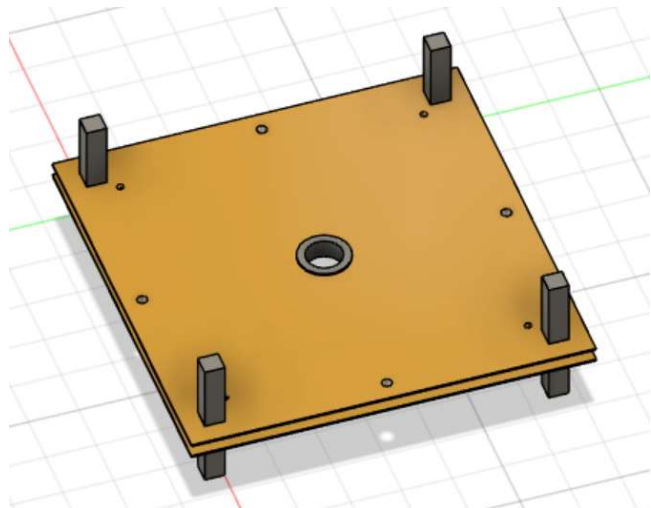


Figure 17 - Structure complète avec les deux plaques

Nous devons trouver un déclencheur qui permettra aux mâts de se déployer. Cependant pour les premiers tests, nous forcerons les mâts à s'enrouler et se déployer en faisant tourner l'axe. Nous trouverons les quarts de voile au-dessus de la plaque supérieure de la manière suivante :

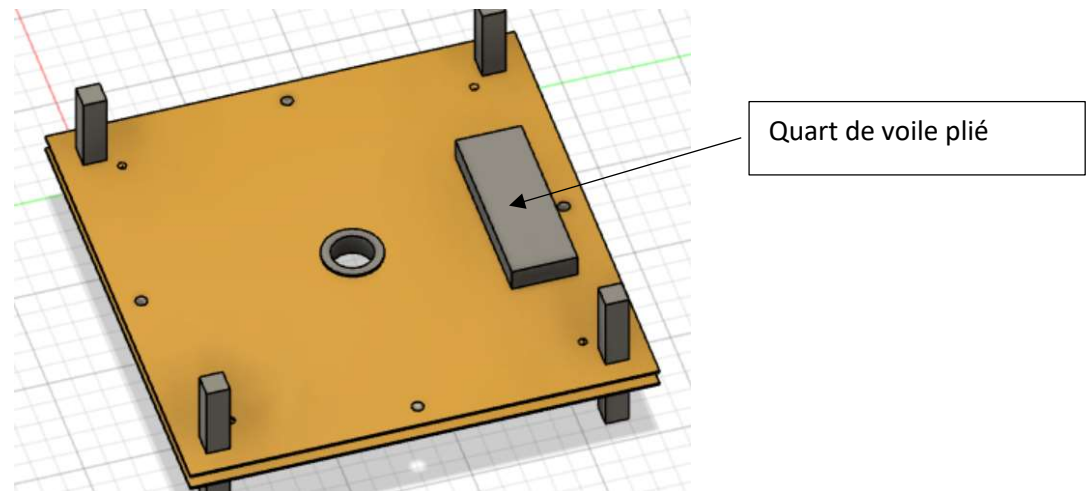


Figure 18 - Structure avec un quart de voile

La voile ne sera pas prise en compte jusqu'à ce que nous ayons vérifié le bon fonctionnement du reste du mécanisme, mais la position qu'elle occupera sur notre maquette est celle montrée sur l'image précédente.

Enroulement des mâts :

Les mâts seront enroulés entre les plaques inférieures et extérieures autour de l'axe de rotation. Chaque extrémité des mâts sera accrochée à l'axe pour que les mâts s'enroulent et se déenroulent avec la rotation de l'axe.

Pour minimiser l'encombrement, les quatre mâts vont être enroulés les uns sur les autres.

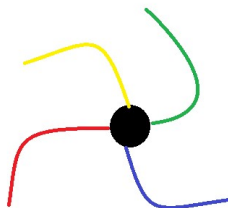


Figure 20 - union mâts-axe

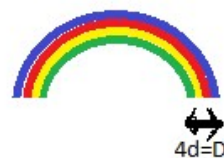


Figure 19 - Enroulement des 4 mâts

Ensuite une des deux extrémités de chaque mât sera placé dans un trou traversant la plaque supérieure. De cette façon, une fois que l'axe commencera à tourner, les mâts sortiront par ces trous et seront guidés selon la forme souhaitée.

Pour calculer quelle serait le diamètre adéquat pour les mâts, nous avons créé un Excel. Il en résulte l'obtention du diamètre optimal pour une longueur de mâts et un rayon d'axe données. Nous

prenons de plus en compte l'encombrement maximum que nous pouvons avoir entre les deux plaques pour que la sortie des mâts par ses guides se fassent bien et sans frottements.

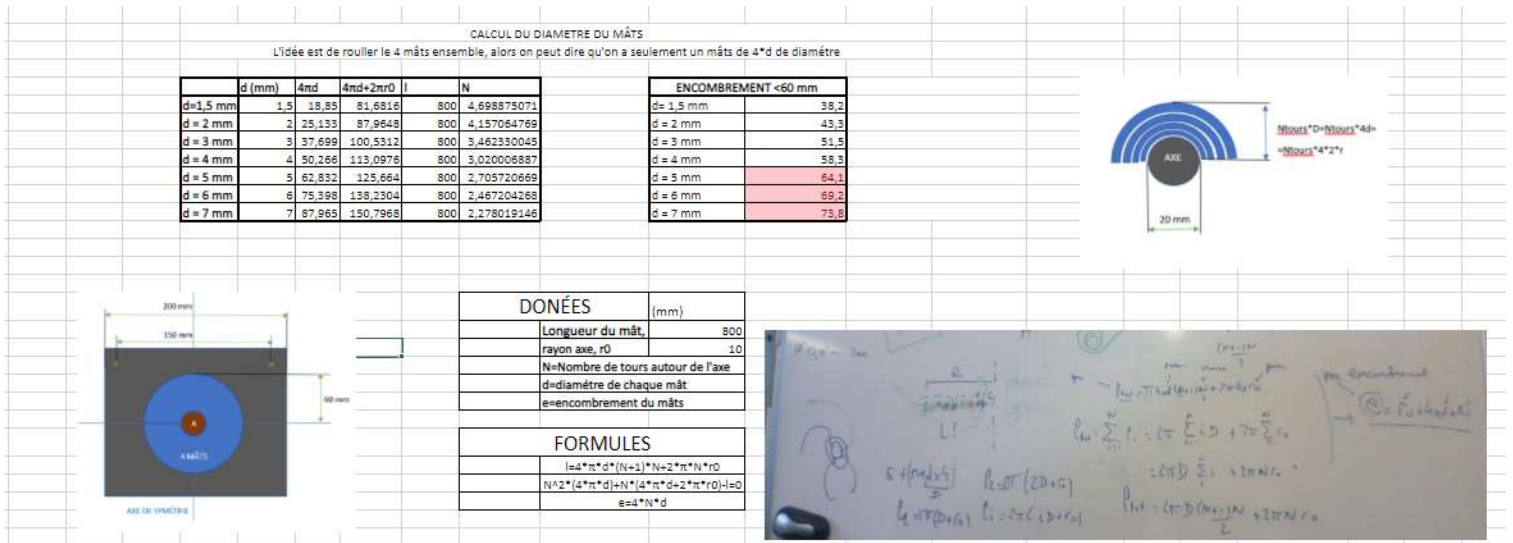


Figure 21 - Exel pour le calcul du diamètre optimal des mâts

ii) Inconvénients

Dans cette première approche nous avons trouvé des problèmes dans le montage de l'axe avec les deux plaques. Ce design montre que l'axe nous forcerait à une division de celui-ci en deux parties afin d'introduire les deux plaques à l'intérieur. Concevoir un axe démontable est d'une grande difficulté. Nous avons dû résoudre cette contrainte dans notre deuxième design que nous verrons plus bas.

D'autre part, nous avons constaté que les guides de la plaque supérieure par lesquelles glissent les mâts ne sont pas optimaux. Ces guides sont petits et très éloignés des mâts lorsqu'ils sont enroulés. Ainsi quand les mâts vont être déployés, ils exerceront une force très élevée sur les guides qui empêchera un déploiement correct des mâts.

Nous devons trouver des solutions aux problèmes présentés ci-dessus, mais globalement nous avons une idée pour notre mécanisme et son fonctionnement. Nous essaierons de perfectionner tout cela par la suite.

b) Outils mis à disposition

Les outils mis à disposition pour ce projet ont été découverts au cours des séances en analysant les besoins de notre projet.

i) Fusion 360

Premièrement, nous avons utilisé Autodesk Fusion 360 pour le modelage virtuel 3D de notre maquette DEDALE. Fusion 360 est une plate-forme logicielle 3D de modélisation, de CAO, de FAO, d'IAO et de conception de circuits imprimés destinée au design et à la fabrication de produits, c'est-à-dire, c'est une plateforme dans laquelle nous pouvons réaliser la conception et l'ingénierie de notre produit comme nous le souhaitons pour en assurer l'esthétique, la forme, l'adéquation et le fonctionnement du modèle.

C'est avec Fusion 360 que nous avons réalisé nos mesures et conçu le design de la maquette. Nous avons aussi utilisé des éléments auxiliaires qui aideront au processus de déploiement, comme une clé Allen ou des cylindres pour unir les plaques. Aussi, ce logiciel nous a permis de voir le modèle fini, et de rendre compte d'éventuelles erreurs ou détails que nous n'avions pas encore pris en compte, comme l'enroulement des mâts entre les plaques ou la forme de l'axe de rotation.



Figure 22 - Logo Fusion 360

ii) Matériaux pour la construction de la maquette

Deuxièmement, la réalisation de notre maquette a pour objectif de prouver le bon fonctionnement du mécanisme qui va déployer la voile dans le satellite. Ainsi, les matériaux de la maquette ne doivent pas différer en comportement de ceux qui seront utilisés dans le produit réel (CubeSat 3U).

Voile :

Pour notre voile nous avons décidé d'utiliser une couverture thermique possédant des propriétés similaires à celles du mylar. Cette idée est venue après une recherche bibliographique où nous avons trouvé les types de matériaux qui sont utilisés actuellement. L'épaisseur de cette couverture est de $12\mu\text{m}$, assez peu supérieure à celle du mylar utilisée pour les voiles qui reste ainsi dans les ordres de grandeurs recherchés.



Figure 23 - Couverture thermique (VOILE)

Mâts :

Les mâts sont la ressource la plus compliquée à retrouver et nous ne savons pas exactement le matériau que nous allons finalement choisir. Nous savons que ces mâts doivent avoir un comportement superélastique puisqu'ils vont être déformés à l'intérieur du système et devront retrouver leur forme lors du déclenchement pour déployer la voile. Le diamètre des mâts qui ont une section cylindrique est aussi très important pour éviter l'encombrement. Dans une première approche, nous avons décidé d'utiliser des fils de 1,5mm de diamètre ayant un comportement plastique favorable afin de tester les guides des mâts et le mécanisme d'enroulement de ces derniers.

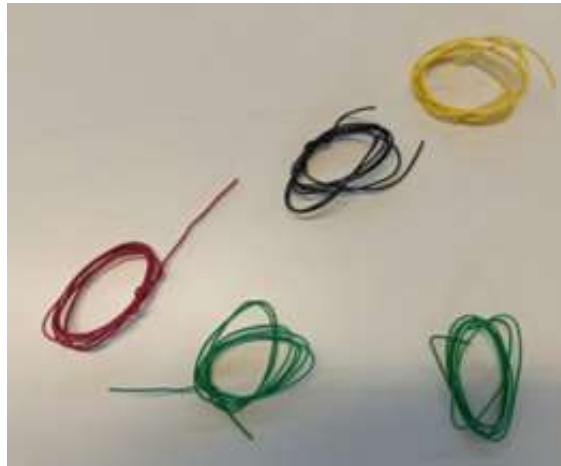


Figure 24 - Fils métalliques (MÂTS)

Cependant, ces fils ne seront pas utilisés dans la maquette finale car nous avons besoin de contraindre pour se déformer. Dans le deuxième semestre nous discuterons avec notre encadrant Clément Lingois pour commander les mâts définitifs chez un fournisseur de matériaux superélastiques.

Structure :

La structure composée de deux plaques et de l'axe central sera imprimée en 3D dans un premier temps. L'impression 3D est une des solutions que M.Caïs nous a donné lorsque nous avons présenté notre conception. C'est ainsi que pour un premier modèle nous allons utiliser l'impression 3D à partir d'un fichier fusion.

L'impression 3D ne propose pas un comportement similaire aux matériaux qui seront présents dans le CubeSat, mais sa rigidité nous permettra de valider ou non le mécanisme de déploiement.

D'autre part, nous utiliserons sûrement des écrous pour fixer les deux plaques et un mécanisme simple pour faire tourner l'axe. Ces outils ne présenteront pas des difficultés particulières et seront faciles à trouver.

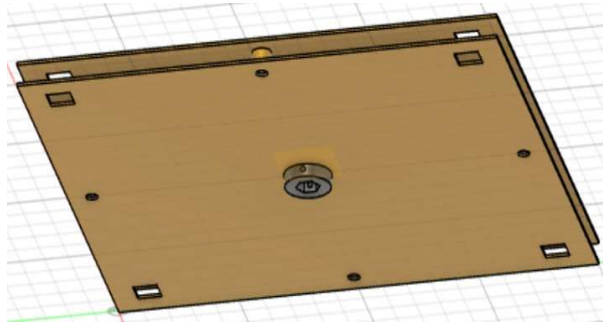


Figure 26 - Plaques créées par impression 3D



Figure 25 - Machine à impression 3D

Difficultés rencontrées :

Nous devons encore dimensionner la division du pliage de la voile pour qu'elle corresponde avec la maquette mais c'est un travail que nous réaliserons dans le deuxième semestre après avoir validé le mécanisme de déploiement. Pour l'instant nous avons seulement vérifié que ce pliage est possible et ce sera celui que nous utiliserons finalement. Nous pouvons observer que la voile une fois pliée permet d'accrocher celle-ci aux mâts et au centre de la plaque supérieure grâce aux petits triangles que le pliage nous permet d'obtenir. Cependant, nous avons constaté que la manipulation d'un matériau aussi fin est compliquée, alors lors du pliage nous devons être très précis.

d) Deuxième design

i) Résultats

Dans ce deuxième design nous avons corrigé quelques erreurs que nous avons trouvées dans la conception du premier design.

Le premier changement a été l'axe de rotation. Le design initial avait des incompatibilités avec le montage des deux plaques avec l'axe. Le nouveau design permet de monter les deux plaques avec l'axe sans avoir à le démonter en deux parties. Aussi, il facilite l'enroulement des mâts autour de lui-même et il a la forme nécessaire pour qu'une clé Allen puisse le visser.

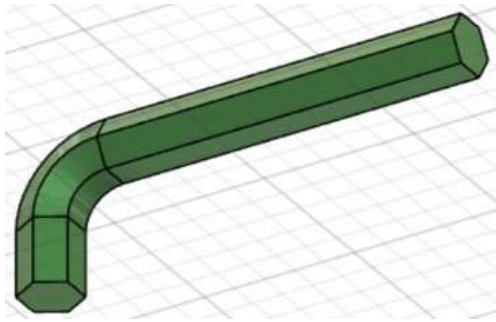


Figure 28 - Clé allen pour tourner l'axe

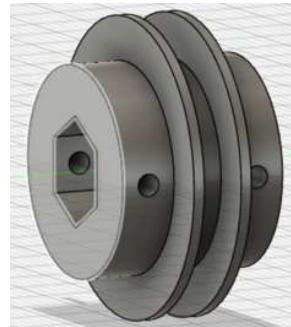


Figure 27 - Design axe

La deuxième adaptation que nous avons réalisé sur le design sont les guides. Les nouveaux guides accompagnent les mâts depuis la fin de l'enroulement et sont plus adaptés pour que la direction des mâts déployés soit celle que nous souhaitons.

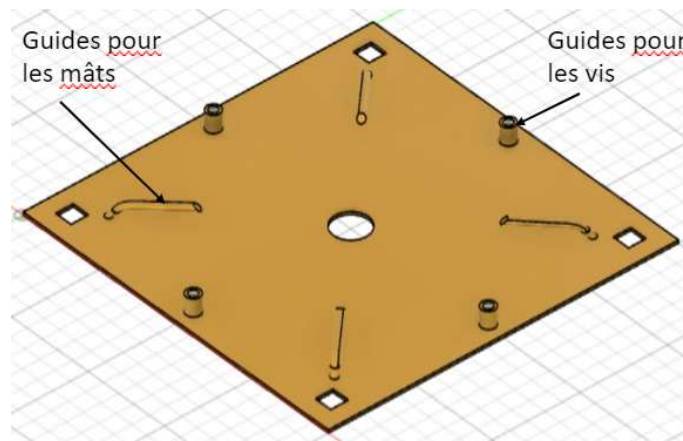


Figure 29 - Plaque supérieure avec les nouveaux guides

Notre deuxième design est plus correct que le premier mais présente aussi des inconvénients que nous devons découvrir expérimentalement.

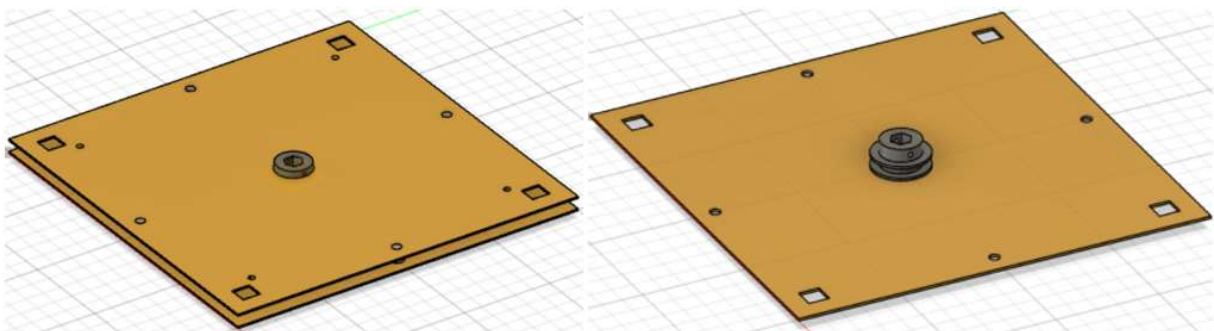


Figure 30 - Deuxième design

ii) Inconvénients

L'idée était d'accrocher une extrémité de chaque triangle plié de la voile au centre de la plaque. Mais, nous aurons l'axe de rotation a cet emplacement et il va tourner sur lui-même. Nous avons pensé à mettre un couvercle bombé sur l'axe mais nous devons analyser cette possibilité ou penser

à des alternatives. L'accroche des mâts à la voile et des mâts à l'axe est un autre problème auquel nous devons penser.

De plus, nous notons le risque que les mâts se mêlent les uns aux autres pendant le déploiement, ou qu'ils ne soient pas assez tendus dans l'enroulement.

Ces inconvénients et risques témoignent de la nécessité d'une démonstration expérimentale que nous réaliserons et qui dira quels sont les éventuels problèmes à corriger. Nous espérons en effet que ces expérimentations mettent en lumière des nouveaux problèmes auxquels nous n'avons pas encore pensé. Nous pourrions alors les résoudre.

V) REALISATION DU PROJET

L'objectif de la première période de quatre mois était d'étudier le mécanisme et d'analyser les matériaux pour mettre en place une maquette durant le deuxième semestre et réaliser un premier modèle 3D sur Fusion.

La phase suivante du projet consiste à mettre en pratique tout ce qui a été étudié jusqu'ici, et nous appellerons cette phase "phase expérimentale". Pour le développement de cette phase, nous avons divisé la progression en trois modèles différents, expliqués ci-dessous :

- **DEDALE-Alpha**

Lorsque nous finirons le modèle sur Fusion nous réaliserons la première maquette, le DEDALE-0. Nous voudrions ici tester la bonne sortie des mâts à l'aide des guides, nous utiliserons des fils métalliques de 1,5 millimètres. Pour ce faire, nous fabriquerons les plaques et l'axe de rotation avec l'impression 3D. Ensuite, nous ferons une analyse du test et nous concevrons le nouveau modèle corrigeant les erreurs qui auraient pu survenir.

Une fois cela terminé, nous devons concevoir un nouvel axe qui fonctionne avec les mâts en matériau superélastique qu'il faut commander.

- **DEDALE-Bêta**

Cette deuxième maquette aura pour objectif de vérifier le bon fonctionnement des mâts avec un matériau superélastique et le nouvel axe. Comme avant, nous analyserons le test et nous concevrons le nouveau modèle et axe si cela est nécessaire.

- **DEDALE-Gamma**

Si tout ce qui précède fonctionne bien, il sera temps de plier la voile et de l'attacher aux mâts. L'idéal serait, pour ce dernier test, de fabriquer des plaques en aluminium dans les ateliers de l'ENSAM. L'aluminium sera le matériau final des CubeSat qui seront envoyés dans l'espace.

VI) PHASE EXPERIMENTAL

Comme expliqué précédemment, dans cette phase, nous mettons en œuvre de véritables modèles de notre module DEDALE. L'objectif de cette phase est de finaliser la conception des différents modèles alpha, beta et gamma, et de détecter et corriger d'éventuelles erreurs.

Le pliage de la voile est la première étape sur laquelle nous travaillons. Après avoir analysé toutes les options expliquées dans l'état de l'art, nous sommes parvenus à la conclusion que la meilleure méthode est le pliage en double z.

a) Pliage de la voile

Après notre premier design nous avons voulu analyser la technique de pliage double-Z-folding pour notre couverture de survie. Nous avons déjà à notre disposition les couvertures et pour une séance nous avons mis de côté la conception de la maquette afin de vérifier et valider le pliage. Notre objectif était d'observer les difficultés du pliage pour un matériau très fin et conclure si ce pliage est valide pour notre maquette. [3]

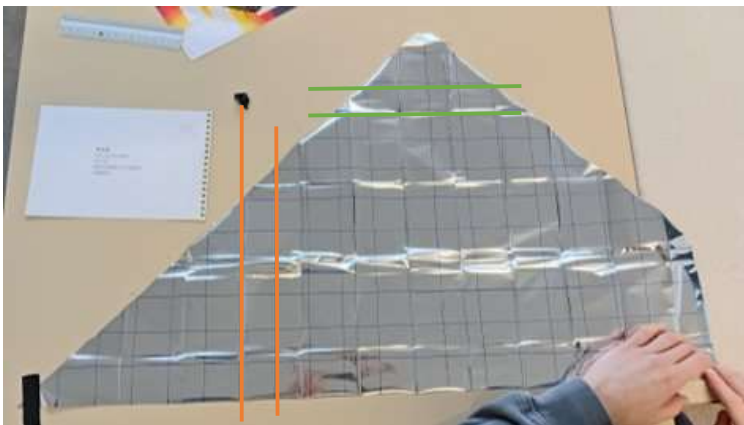


Figure 31 - Division de la voile pour le pliage

Division horizontale pour le pliage ———

Division verticale pour le pliage ———



Figure 32 - Pliage vertical



Figure 33 - Pliage horizontal

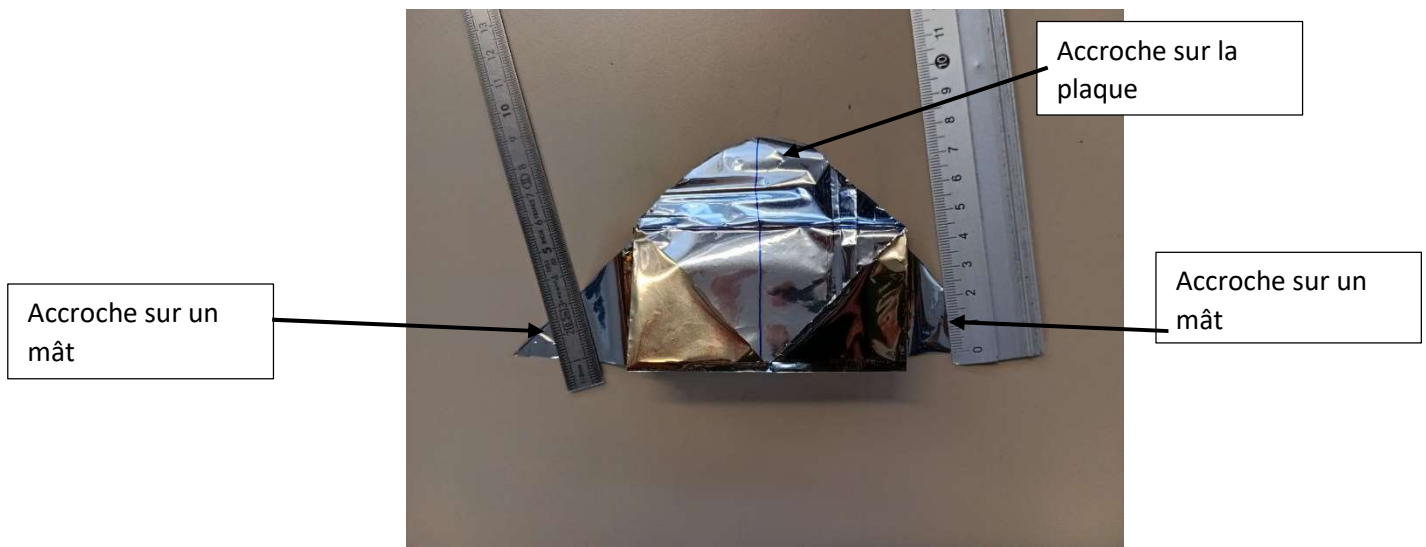


Figure 34 - Quart de la voile plié

b) DEDALE Alpha

i) Objectif

L'objectif de ce premier essai était de prouver l'idée générale de notre modèle. Pour cela, nous avons utilisé des fils métalliques de 1,5 millimètres car ils sont plus malléables que ceux que nous utiliserons pour le modèle final. Dans ce test, nous avons voulu vérifier que nous étions capables de les enrouler autour de l'axe et qu'en les tirants, nous réussissions à les faire sortir par les trous pratiqués dans la plaque supérieure en même temps que l'axe se déroule.

ii) Conception

Pour le réaliser, nous avons conçu le modèle en Fusion et nous l'avons exporté aux imprimantes disponibles à l'école. Les pièces utilisées sont les suivantes :

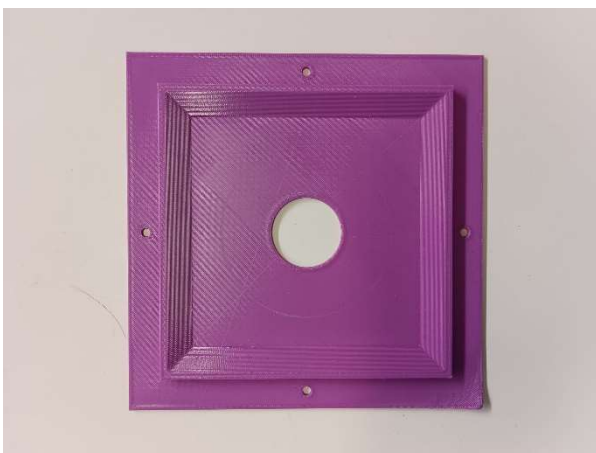


Figure 36: Plaque inf DEDALE 0

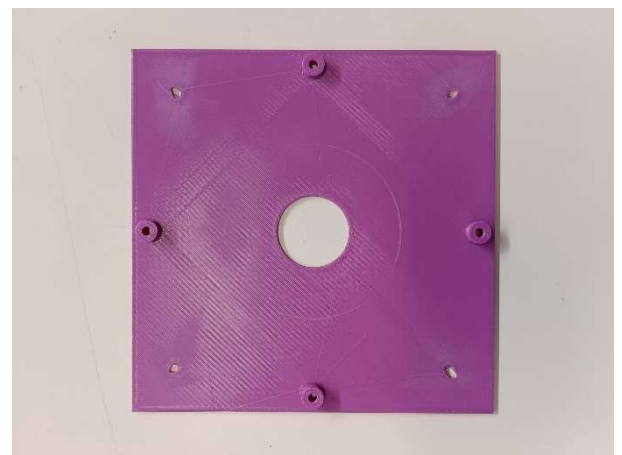


Figure 35: Plaque sup DEDALE 0

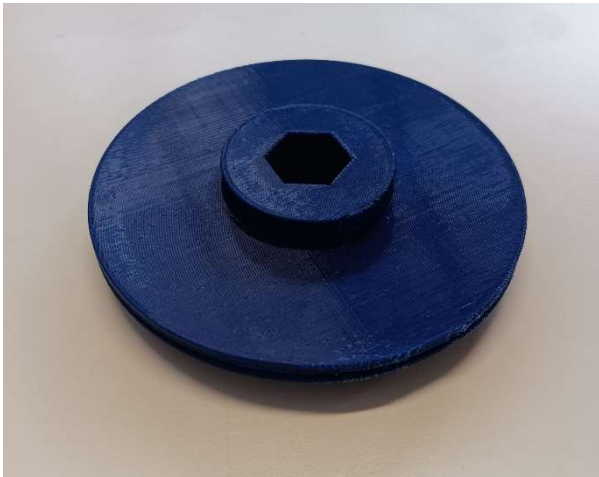


Figure 38: Axe DEDALE 0

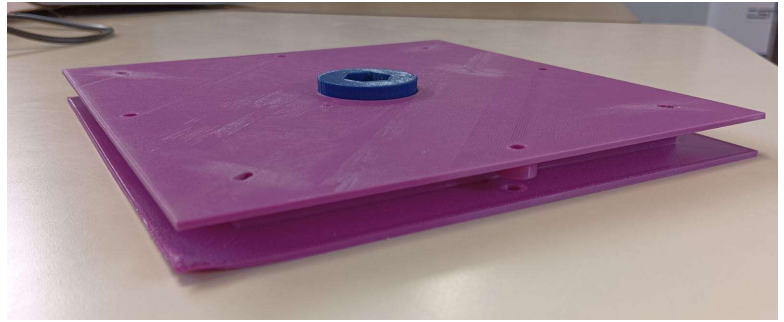


Figure 37: DEDALE 0



Figure 39 - Clé Allen



Figure 40 - Fils métalliques

iii) Resultats

Les résultats ont été satisfaisants. La conception des plaques et de l'axe n'avait quasiment aucun frottement entre eux et les fils métalliques sortaient sans problème par les trous.

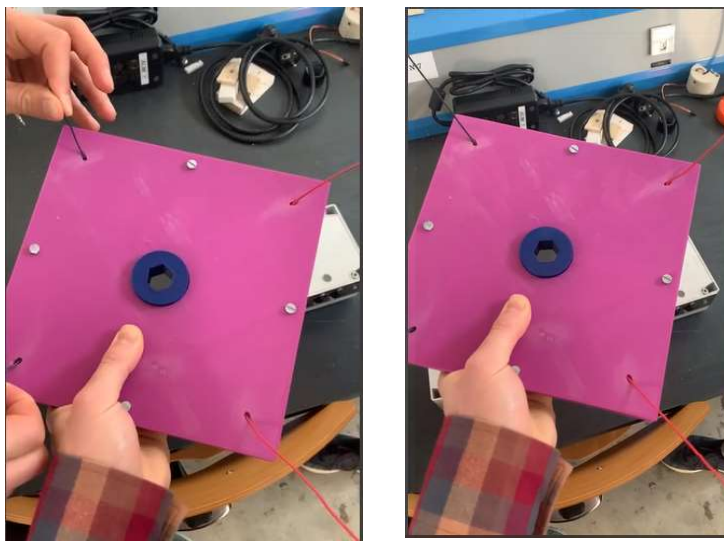


Figure 41 - Essai de déploiement des fils

IV) Erreurs

Nous avons rencontré des problèmes d'impression avec l'imprimante 3D, comme le montre la photo. Ce problème s'est produit sur l'ensemble de nos modèles DEDALE, mais en le mentionnant spécifiquement dans ce modèle, nous pensons que cela suffit.

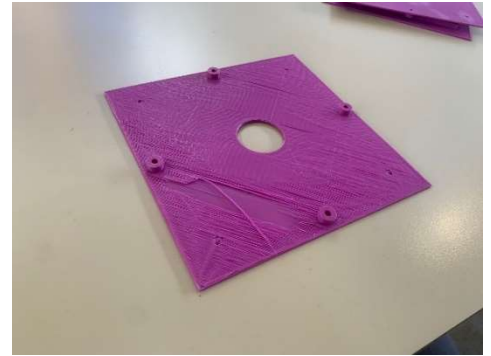


Figure 42 - Exemple de mauvaise impression

V) Solutions

L'idée est d'aller vérifier régulièrement que l'impression se fait correctement, puisque celle du plateau supérieur a duré 6 heures. Si à un moment on voit que l'impression ne se fait pas bien, on arrête l'impression, et on la relance.

c) DEDALE Bêta.0

i) Objectif

Par rapport au modèle précédent, l'idée était d'inclure des mâts à mémoire de forme et de garantir le bon fonctionnement du système de déploiement. Cela signifie que l'axe doit être capable de tourner uniquement grâce à la force de la mémoire de forme, permettant ainsi aux mâts de sortir par les guides.

Pour atteindre cet objectif, nous avons conçu un nouvel axe et nous nous sommes procuré des mâts à mémoire de forme. Nous avons acheté deux types de mâts différents, l'un avec un diamètre de 1,1 mm et l'autre avec un diamètre de 1,8 mm.

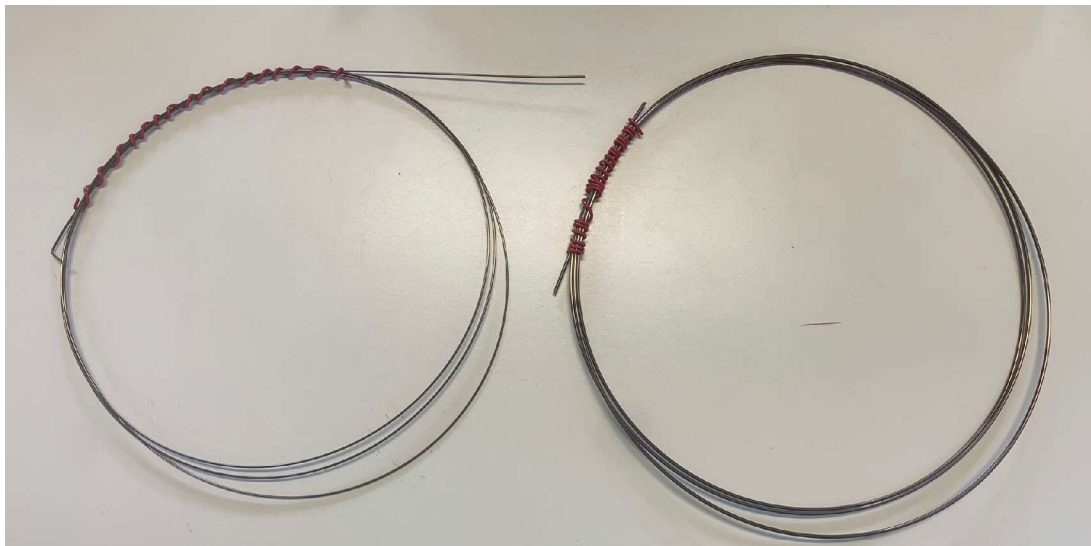


Figure 43 - Mâts à memoire de forme $\varnothing 1,1\text{mm}$ et $\varnothing 1,8\text{mm}$

ii) Conception

Afin d'intégrer les nouveaux mâts dans le modèle, nous devons concevoir un nouvel axe. Dans ce nouvel axe, nous avons créé des trous internes pour pouvoir insérer les mâts et avons également ajouté des rainures afin de visualiser tout le processus lorsque nous les enroulons. De plus, nous avons modifié l'espace entre les plaques pour permettre l'entrée et l'enroulement correct des deux nouveaux mâts à mémoire de forme.

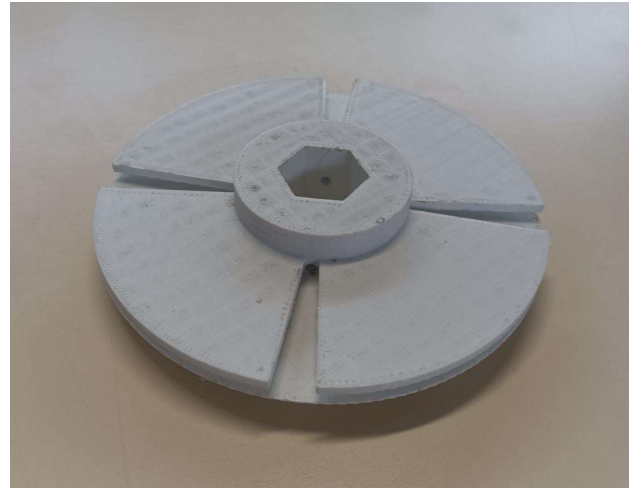


Figure 44 - Axe Dedale Bêta.0

iii) Erreurs

Le problème que nous avons rencontré est que la tension n'est pas relâchée de la manière souhaitée, ce qui empêche les câbles de sortir par les trous de la plaque supérieure.

Lorsque nous relâchons l'axe, la tension accumulée par l'enroulement des câbles autour de celui-ci provoque tout d'abord leur expansion, ce qui nous fait perdre l'impulsion nécessaire pour les faire sortir par les trous.

iv) Solutions

Reconception de la plaque supérieure et inférieure pour créer de guides extras pour redirectionner la sortie des mâts.

d) DEDALE Bêta.1

i) Objectif

L'objectif est d'éviter l'expansion horizontale des mâts et de réussir à les faire sortir par les trous situés aux coins de la plaque supérieure. L'idée consiste à installer des guides qui limiteront la surface d'expansion des mâts et serviront à tracer la trajectoire de sortie des mâts.

ii) Conception

L'idée de ces guides était d'empêcher l'expansion horizontale des mâts et aussi de servir de guide dans le sens du départ. La position des murs est presque la même que celle de tous les mâts enroulés autour de l'axe, de cette façon nous avons réussi à limiter l'expansion. Les parois ont également une certaine inclinaison pour que la sortie par les trous de la plaque supérieure ne provoque pas de frottement.

Aussi, nous avons augmenté l'épaisseur des plaques et de l'axe pour éviter d'éventuelles déformations



Figure 45 - Plaque supérieure DEDALE Bêta.1



Figure 46 - Plaque inférieure DEDALE Bêta.1

iii) Erreurs

Le problème reste le même. Les mâts déforment la structure et cherchent de l'espace pour l'expandit au lieu de sortir par les trous souhaités

iv) Solutions

Afin de résoudre cette problématique, nous allons mettre en place des ressorts de torsion qui appliqueront une force variable sur les mâts, empêchant ainsi leur expansion. Nous devons concevoir une nouvelle plaque pour intégrer les ressorts.

Par ailleurs, nous avons augmenté l'épaisseur des plaques et de l'axe afin d'éviter toute déformation potentielle.

e) DEDALE Bêta.2

i) Objectif

Dans ce modèle, notre objectif principal est d'éviter l'expansion horizontale des mâts grâce à l'utilisation de ressorts de torsion qui exerceront une force dans le sens opposé à l'expansion.



Figure 47 - Ressort à torsion

ii) Conception

Un ressort de torsion est conçu pour subir une déformation due à une énergie mécanique de torsion, de rotation, de pliage ou de flexion. Grâce à sa mémoire de forme et à ses propriétés élastiques spécifiques, il peut restituer cette énergie et revenir à sa dimension initiale. Le ressort de torsion a la particularité d'exercer une force rotative en action, puis une rotation inverse pour revenir à sa position de repos.

Avec ces informations, nous avons envisagé d'utiliser ces ressorts pour empêcher les mâts de sortir vers l'extérieur en les plaçant à l'intérieur de la zone où les mâts sont enroulés. L'idée est d'avoir quatre ressorts répartis autour de l'axe pour fournir la force nécessaire afin d'éviter l'expansion horizontale des mâts.

La plaque supérieure est la même que dans le Dedale Bêta.1

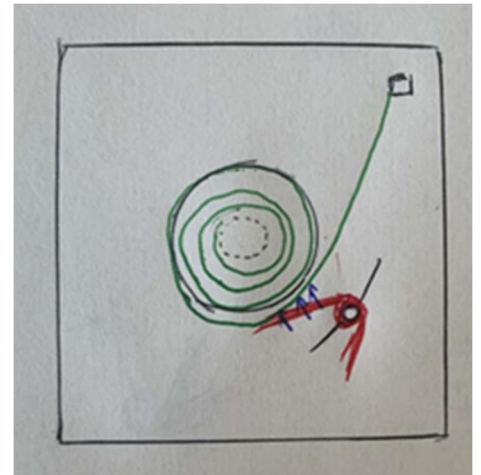


Figure 48 - Explication modèle DEDALE Bêta.2

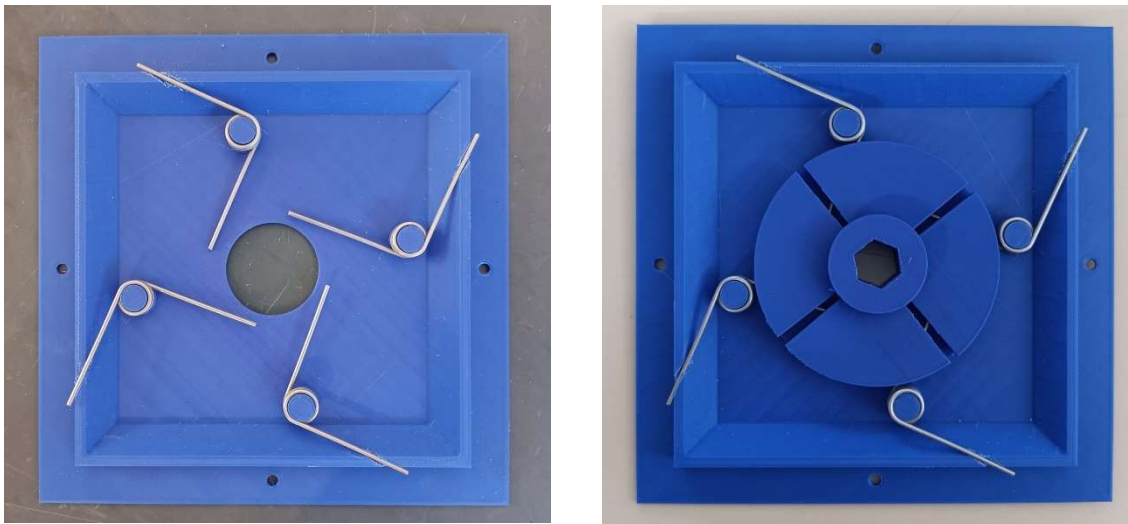


Figure 49 - Implémentation des ressorts sur notre modèle

iii) Resultats

En utilisant les ressorts de torsion nous avons réussi à bloquer l'expansion des mâts et donc la dissipation de l'énergie nécessaire pour faire tourner l'axe.

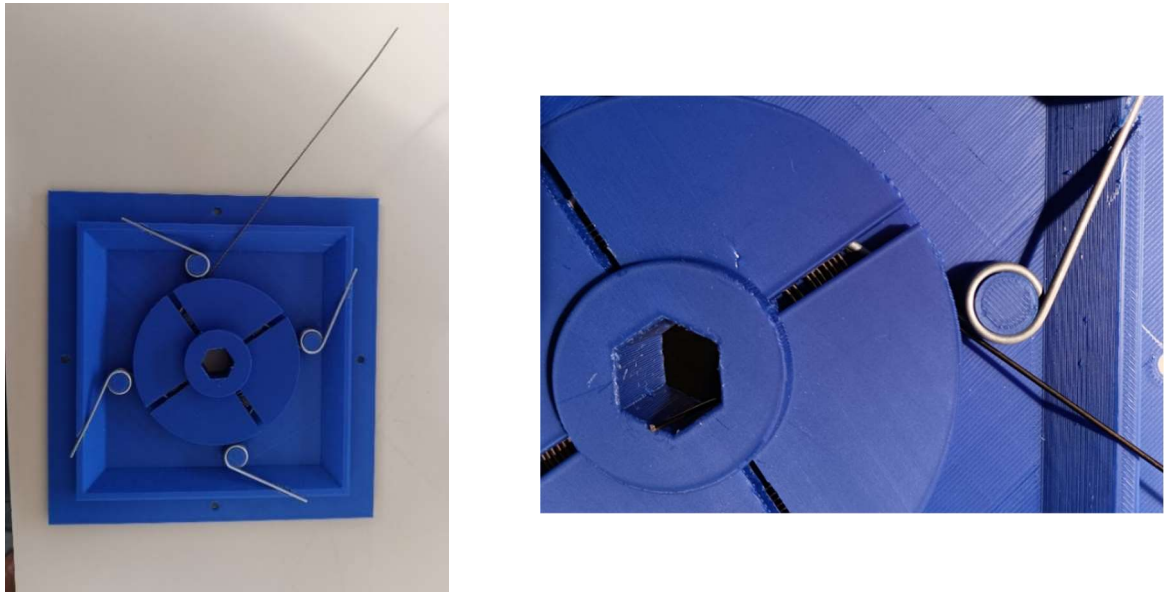


Figure 50 - Modèle DEDALE Bêta.2 enroulé

Pourtant, les ressorts sont trop puissants et ils bloquent le système, ils ne laissent pas tourner l'axe. Nous avons essayé de le forcer pour le faire tourner mais l'axe se déforme avec cette force et les câbles se superposent aux ressorts. Donc nous n'avons pas réussi à faire sortir les câbles en tournant l'axe dû à la faible rigidité des plastiques d'impression 3D.

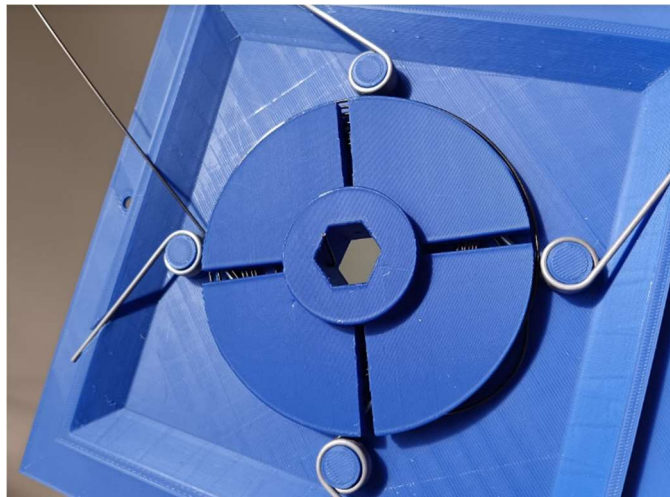


Figure 51 - Modèle DEDALE Bêta.2 bloqué

iv) Solutions

Les ressorts se révèlent trop rigides et exercent une pression si importante sur les mâts qu'ils préfèrent déformer l'impression 3D plutôt que de se comprimer davantage. Nous en sommes également arrivés à la conclusion que l'utilisation de l'impression 3D comme substitut au métal n'a pas fonctionné. En utilisant du métal, nous pourrions éviter toutes les déformations que l'impression 3D a causées sur l'ensemble de nos modèles. De plus, le métal présenterait une friction moindre, facilitant ainsi la rotation et le déroulement.

f) MONTAGE DU MODELE

i) Matériaux utilisés

Voici les pièces utilisées pour l'assemblage d'une maquette est :

4 vis M6x1,6 :



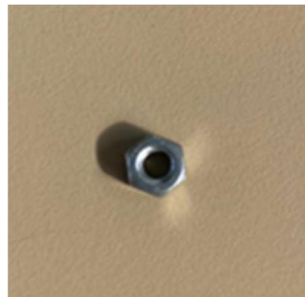
Vis M6

4 rondelles :



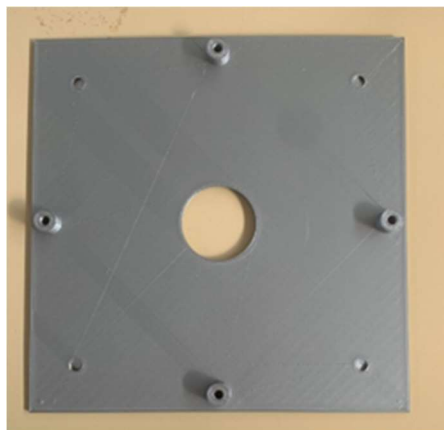
Rondelle

4 écrous :



Écrous

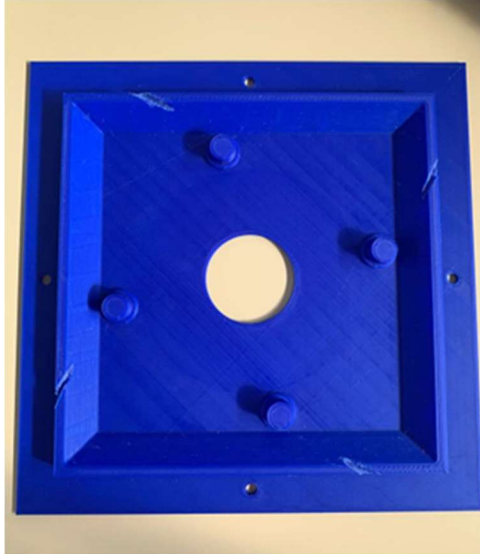
1 plaque supérieure 200x200mm :



Plaque supérieure

L'épaisseur de la plaque est de 4mm.

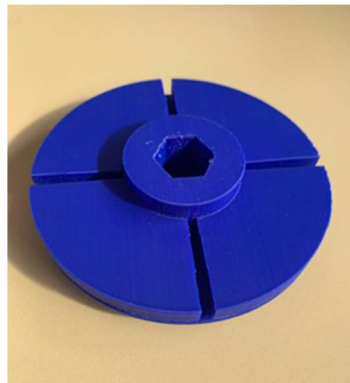
1 plaque inférieure 200x200mm :



Plaque inférieure

L'épaisseur de la plaque est de 4mm. Lors de l'assemblage l'encombrement entre les 2 plaques sera de 9,5mm.

1 axe d=39mm et D=99mm :



Axe

4 mâts de L=0,8m et d=1,1mm :



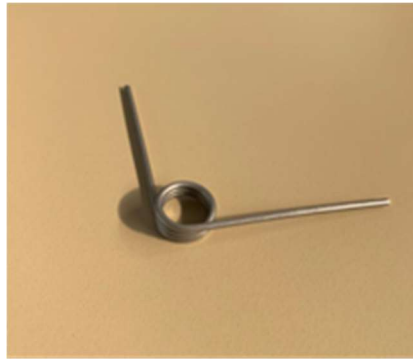
Mât à mémoire de forme

4 quarts de voile pliés :



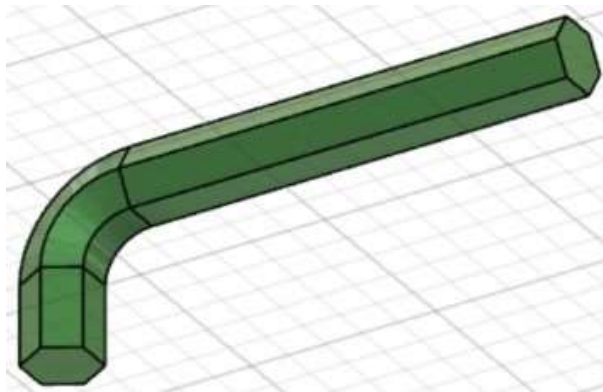
Quart de voile pliée

4 ressorts de $d=1,78\text{mm}$ $D_i=11,5\text{mm}$:



Ressort

1 clé allen :



Clé allen pour tourner l'axe

ii) Procédure de montage

Dans cette partie, nous allons vous expliquer les étapes nécessaires pour assembler notre dernier modèle afin que vous puissiez les suivre. Ce modèle est conçu pour être testé avec un seul mât.

1. Effectuer une déformation plastique à une extrémité du câble.
2. Faire passer le câble à travers l'un des trous de l'axe.
3. Placer l'axe sur la plaque inférieure.
4. Positionner les ressorts.
5. Placer la plaque supérieure au-dessus de l'axe.
6. Fixer les plaques en utilisant les trous dans les plaques et les vis.
7. Enrouler le câble autour de l'axe en utilisant la clé

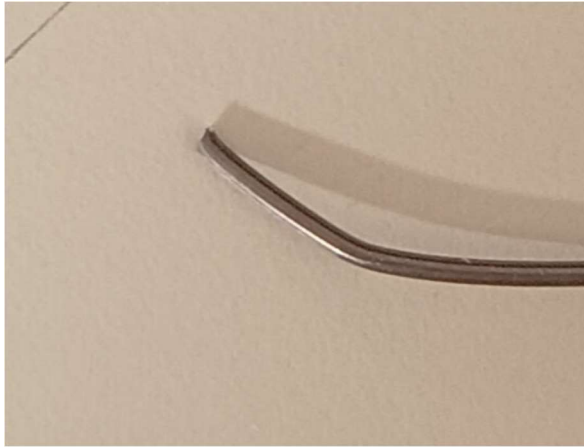


Figure 53 - Déformation plastique du mât

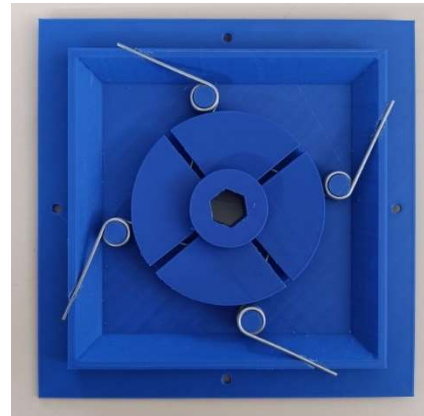


Figure 52 - Modèle enroulé

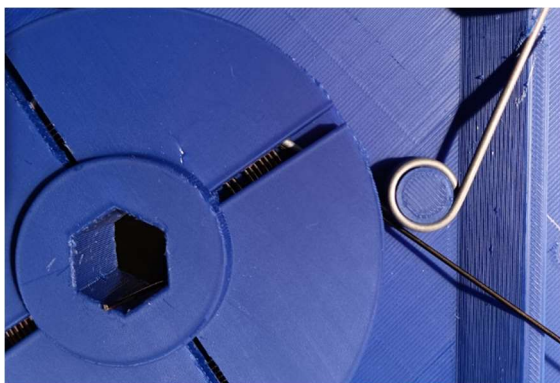


Figure 55 - Mâts bien enroulé

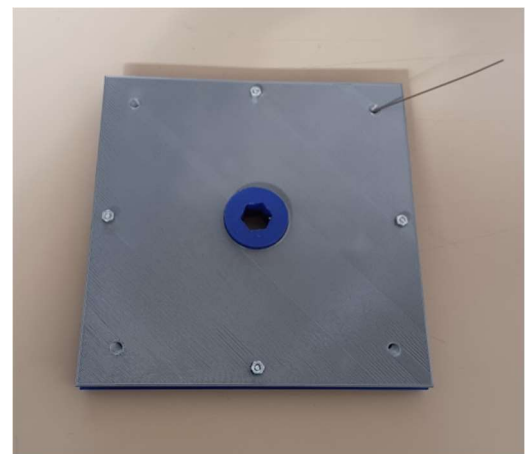


Figure 54 - Modèle complète

VI) SOLUTIONS POUR LES FUTURS MODÈLES

En raison du manque de temps, nous n'avons pas réussi à terminer le modèle bêta. Cependant, nous avons identifié des solutions pour le modèle gamma et le module ICARE dans le futur, une fois que le modèle DEDAILE sera complété.

a) Fixation de la voile

Après avoir testé et validé le pliage de la voile, il a fallu réfléchir à un moyen d'attacher la voile aux mâts. Le principal problème était la finesse de la voile, une épaisseur de 12 μm , qui peut casser facilement, et que le système développé devait prendre le moins de place possible.

En pensant aux freins d'un vélo, on se rappelle que les freins du vélo sont protégés par un chapeau qui l'empêche de se coincer n'importe où. Nous avons pensé à utiliser ces embouts de câble de frein de 12 mm pour protéger le câble avec la voile à l'intérieur, et ainsi les joindre.

Après plusieurs tests, nous avons vérifié que l'accroche est forte et que la voile ne se casse pas à cause de mouvements brusques.



Figure 57 - Embouts de câble de frein



Figure 56 - Embouts avec notre voile

b) Nimesis triggy

TRIGGY est un actionneur idéal pour le déploiement, le verrouillage/déverrouillage, la libération ou le démantèlement de mécanismes spatiaux.

Notre proposition consiste à utiliser ce dispositif pour déployer la voile de manière télématique depuis le sol lorsque le satellite est dans l'espace.

Nimesis, la société qui fabrique cet actionneur, propose une gamme complète (M2 à M12), qui s'adapte à toutes tailles d'engins spatiaux (NanoSatellites, satellites, rovers..)



VII) PRESPECTIVE ET ANALYSE DU PROJET

Ce projet a connu une évolution significative dans son ensemble, ce qui nous permet de tirer d'excellentes idées de conception. Bien que la maquette ne soit pas encore fonctionnelle, les tests effectués nous permettront de continuer dans la bonne direction en apprenant de nos erreurs. Nous constatons que le pliage de la voile et son accrochage aux mâts sont assez satisfaisants, tandis que l'enroulement du matériau superélastique pour le déploiement des mâts nécessitent une reconception ou remise en question.

L'objectif de cette année était principalement de jeter les bases du projet DEDALE qui partait de zéro. Nous pouvons également souligner que le nombre de membres travaillant sur ce projet n'était pas suffisant, avec seulement 4 personnes au cours du premier semestre et 3 au cours du second semestre.

Nous pouvons dresser un tableau décrivant notre vision pour la poursuite du projet. Voici nos recommandations :

Domaine	Recommandations
Conception des mâts	Poursuivre la reconception de l' enroulement du matériau superélastique pour le déploiement des mâts afin d'améliorer son efficacité.
Conception	Concevoir un mécanisme qui permettra d'accrocher la voile à la plaque supérieure sans empêcher son déploiement (Nous avons pensé à utiliser de la colle). Il est nécessaire aussi de trouver une solution pour compacter la voile lorsqu'elle sera sur la plaque puisqu'elle a tendance à se déplier.
Accrochage de la voile	Continuer à développer les techniques d'accrochage de la voile aux mâts, en mettant l'accent sur la solidité et la fiabilité de cette partie cruciale du système.
Objectifs à court terme	Se concentrer sur la résolution des problèmes identifiés lors des premiers tests, en accordant une attention particulière à l'amélioration de l'efficacité du déploiement des mâts.
Tests et optimisation	Réaliser des tests approfondis sur la maquette afin d'identifier les éventuelles faiblesses et d'optimiser les performances globales pour réussir le dépliement des mâts. Utiliser les erreurs rencontrées comme des opportunités d'apprentissage pour orienter les prochaines étapes. Essayer si possible de tester la maquette avec des matériaux métalliques.
Tests et optimisation	Si le déploiement des mâts est vérifié, continuer les nouveaux tests en intégrant la voile.
Conception	Possibilité d'utiliser des nouvelles solutions comme celle que nous avons étudié pour éviter l'expansion des mâts : 
Tests et optimisation	Si les étapes précédentes sont réussies finir avec une maquette finale en utilisant les matériaux qui iront dans l'espace.
Ressources humaines	Augmenter l'effectif dédié au projet afin de bénéficier d'une plus grande expertise et d'une meilleure répartition des tâches. Encourager la collaboration et l'échange d'idées au sein de l'équipe pour favoriser l'innovation.
Objectifs à long terme	Viser l'aboutissement d'une maquette fonctionnelle et performante, prête à être développée à une échelle plus grande pour des applications réelles. Explorer les possibilités d'intégration de nouvelles technologies pour optimiser les performances du système.

Ce tableau fournit une direction pour la continuité du projet, en mettant en évidence les domaines clés qui nécessitent une attention particulière et en soulignant les objectifs à court et à long terme à atteindre.

CONCLUSION

Pour conclure l'objectif de cette première année du projet DEDALE était d'imaginer un mécanisme de déploiement d'une voile, et de déterminer les matériaux nécessaires pour la mise en place d'une maquette représentative et fonctionnelle du mécanisme. Nous avons bien avancé sur le mécanisme bien qu'il nous reste des zones d'ombres concernant certaines problématiques techniques. Nous espérons que ces dernières vont être résolues dans les années à venir par les élèves qui continueront notre travail.

Nous pouvons affirmer avec certitude que nous avons accompli de grands progrès dans la réalisation et la conception des maquettes, étant donné que ce projet a démarré à partir de zéro. Bien que nous ne l'ayons pas encore achevé, nous laisserons derrière nous une base solide, regorgeant d'idées très prometteuses qui pourraient s'avérer essentielles pour l'avenir du projet.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]: Article sur le site de Star Walk intitulé The Problem of Space Junk - How We Block Our Way Into Space, publié October 07, 2022: <https://starwalk.space/en/news/space-junk>
- [2]: Website legifrance.gouv.fr: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000018931380>
- [3] Dynamic Model and System Design of a 1U CubeSat Drag Sail Module, Author: Ilaria Ciriolo, Luca Diazzi, 2020-2021, file:///C:/Users/peter/Downloads/2022_04_Ciriolo_Diazzi_02.pdf
- [4] Origami-based Drag Sail for CubeSat Propellant-free Maneuvering, Colin MASON, Grace TILTON, Nomita VAZIRANI, Joseph SPINAZOLA, David GUGLIELMO, Seth ROBINSON, Riccardo BEVILACQUA, Johnson SAMUEL, <http://riccardobevilacqua.com/Origami-based%20Drag%20Sail%20for%20CubeSat%20Propellant-free%20Maneuvering.pdf>
- [5] Solar sail strategies for satellite's direct and modulating deorbiting, Cecilia Giovannini, 2020-2021, https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/183320/3/2021_12_Giovannini.pdf
- [6] Dynamique du déploiement autonome d'un hexapode à rubans pour applications spatiales. présentée devant L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Par Gwenaëlle ARIDON Ingénieure en Mécanique, INSA Lyon en 2007.
- [7] Solutions innovantes pour des structures spatiales déployables, William Bettini, 24 septembre 2018, Université de Montpellier
- [8] Meeting Planning Service, The First International Orbital Debris Conference (IOC): <https://www.hou.usra.edu/meetings/orbitaldebris2019/orbital2019paper/pdf/6020.pdf>