



FEDERATION
Open Space Makers



INSSET
Institut Supérieur des Sciences Et Techniques
SAINT-QUENTIN

RAPPORT DE STAGE

Open Space Makers

Du 06/04/2021 au 21/05/2021

Sujet : THEMIS OPEN « lasso » / système d'enlacement à la récupération d'étage VTVL



Elaboré par : *BUSSON Dorian*
3^e année Mécanique Numérique et Conception

Encadré par : *ZAMORA MEDINA Erwan*
Master Degree, Sorbonne Université, UFR Mécanique

CHUECOS Nicolas
Ph.D. – Mechanical Vibrations, Thermal Sciences, Optics,
Nondestructive Testing, Nano Sciences



AD ASTRA

Table des matières

Introduction	1
Présentation des différentes parties prenantes	<u>1</u>
<i>Open Space Makers</i>	1
<i>ArianeWorks</i>	2
<i>Ad Astra</i>	<u>3</u>
Contexte	2
Travail effectué	<u>2</u>
Conception et Développement	<u>1</u>
Problématique rencontrée	<u>2</u>
<i>Blocage des berceaux</i>	<u>1</u>
<i>Système de glissement</i>	<u>2</u>
Simulation	<u>3</u>
Prototypage.....	<u>4</u>
<i>Conception</i>	<u>1</u>
<i>Machinerie et Fabrication</i>	<u>2</u>
<i>Assemblage</i>	<u>3</u>
<i>Conclusion test</i>	4
Conclusion	3
Annexes	4

Remerciement

Je tenais avant tout développement, à remercier mes tuteurs Erwan Zamora et Nicolas Chuecos qui m'ont accompagné durant ce stage en faisant preuve de pédagogie et de sympathie, ainsi que Loeiz Zamora, membre du projet Ad Astra, pour sa présence et ses conseils tout au long de ce stage, et enfin, Damien Hartmann (President Federation Open Space Makers) sans qui ce stage n'aurait pu avoir lieu.

Introduction

Présentation des parties prenante :

Fédération Open Space Makers #3

La Fédération Open Space Makers est une initiative soutenue par le CNES qui vise à ouvrir le monde du spatial au plus grand nombre pour que chaque citoyen puisse participer avec ses connaissances ou en apprenant de nouvelle à l'aventure spatiale de demain.

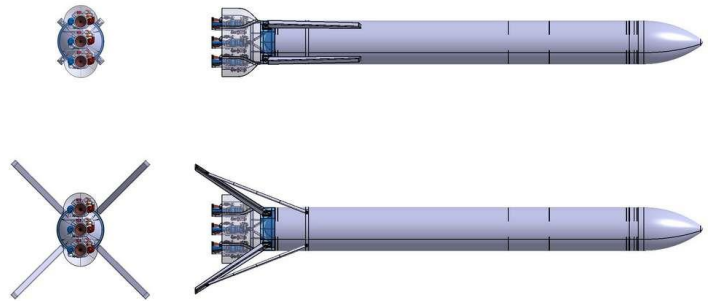


Signature de la Convention avec Damien Hartmann et Jean-Yves Le Gall

Fédération Open Space Makers s'adresse aux fablabs, makerspaces, hackerspaces et autres lieux de mise à disposition d'outils de fabrication collaboratifs, ainsi qu'au grand public qui a envie de contribuer directement à la création d'infrastructures pour relever des défis sociétaux comme la protection de notre planète, permettre à l'humanité de vivre un jour dans l'espace ou tout simplement donner forme à ses rêves.

ArianeWorks #4

ArianeWorks est une plateforme d'innovation lancée conjointement par le CNES et ArianeGroup et est destinée à accélérer la préparation des futures générations de fusées européennes. Le projet actuellement développé par ArianeWorks se nomme THEMIS. Il s'agit d'un démonstrateur de lanceur réutilisable qui représente une solution technologique essentielle pour l'avenir des lanceurs.



1 Illustration du démonstrateur Themis

Ad Astra #1

Le projet Ad Astra #1 faisant partie de l'initiative Open Space Makers vise à développer une famille de lanceurs consommables et ou partiellement réutilisables capables d'envoyer dans un premier temps des charges utiles d'une masse comprise entre 3kg et 75kg en orbite LEO (de 300 à 1000km).



2 Illustration de la Roadmap de As_Astra

L'objectif est de développer une plateforme modulaire de lanceurs à bas coûts conduisant à des standards basés sur le principe d'interopérabilité avec différents systèmes et notamment des systèmes de propulsion.

Contexte :

Le développement des lanceurs réutilisables connaît maintenant depuis quelques années un essor sans précédent. Space X avec la Falcon 9 fut parmi les premiers à développer ce type d'engins. Avec le succès que connaissent ces derniers, beaucoup ont décidé de suivre le chemin tracé. L'Europe et la France font partie d'entre eux. C'est dans cette démarche qu'a commencé le développement de Themis, un démonstrateur ayant pour but de démontrer la faisabilité et la pertinence de la réutilisation tout en gagnant en expérience dans cette compétence nouvelle avant de développer des projets plus pérennes tel qu'Ariane Next.

Dans cette démarche de recherche de nouvelles solutions technologiques vient s'imbriquer la participation de Open Space Makers et Ad Astra en participant activement au développement de briques technologiques via un partenariat nommé « Themis Open » visant à ouvrir le domaine du spatial au passionné en proposant à ces derniers de participer au développement de certaines innovations qui pourrait prendre place sur Themis lors de ses essais si elles se montrent pertinentes. Dans ces briques technologiques on peut retrouver le système alternatif de récupération d'étage. L'idée est donc avec ce système d'atterrissage alternatif, de chercher une solution différente de celle des pieds rétractables types Falcon 9 de Space X. L'un des avantages principaux qu'a cette solution est de justement se passer des pieds qui représentent un poids mort conséquent sur le lanceur qui réduit ses performances ce qui impacte nécessairement la quantité de charge utile.

Pour se passer des pieds il faut donc pouvoir attraper le lanceur par la seule excroissance présente : les ailerons ou « Grid-Fins ». L'objectif de ce stage n'est pas de développer le système dans son entièreté mais de se concentrer sur l'interface Lanceur/Surface d'atterrissage :



Zone de Travail

Il faut donc réfléchir à la meilleure manière supporter le poids du lanceur sur le croisement de câble en prenant en compte différents paramètres comme la répartition de l'effort sur les ailerons et sur les câbles, la taille et le poids d'un tel système, s'assurer d'un bon glissement du système sur les câbles. L'objectif final du stage est d'avoir un prototype qui permettra de tester à une échelle réduite le comportement du dispositif sur les câbles : Flexion, oscillation...

Travail effectué

Mission du stage :

Ce système de récupération alternatif serait une structure au sol composée de 4 câbles s'entrecroisant en formant un carré au centre qui viendra se réduire progressivement en venant attraper le lanceur. Les ailerons ne pouvant se poser sur les câbles eux-mêmes pour des raisons de concentration de contrainte et de stabilité. L'objectif est ici de déterminer la forme qu'aura la plateforme sur laquelle les ailerons viendront se poser.

Nous ne travaillerons pas sur l'entièreté du système qui représenterait un travail trop conséquent. D'autres équipes s'attèlent à développer d'autres sous-systèmes de cette structure, comme la détection de l'approche du lanceur par exemple.

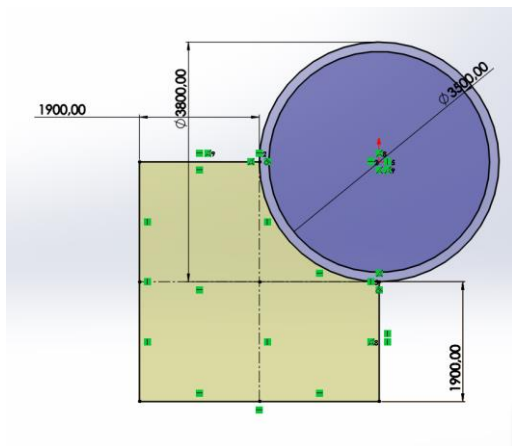
Développement et Conception :

Hypothèses de travail :

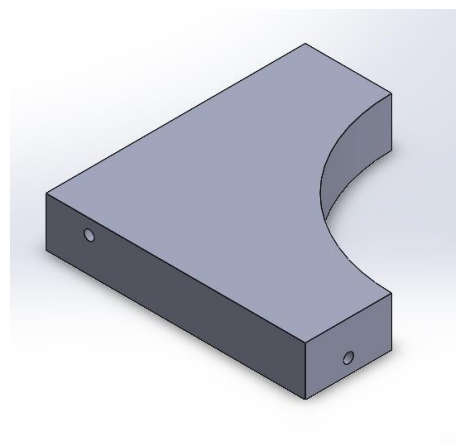
Suite à une réunion de démarrage avec ArianeWorks, nous avons pu échanger afin de connaître les contraintes à respecter pour le développement de ce sous-système. La contrainte majeure à respecter était de ne pas être intrusif sur le design du lanceur, ne devions donc faire qu'avec le préexistant, autrement dit, les ailerons. Nous devions donc trouver le meilleur moyen d'attraper le lanceur par les ailerons. D'autres éléments étaient aussi à prendre en compte, notamment la masse du lanceur, 30 Tonnes, un roulis de 2°/sec max au moment de l'atterrissage ou encore pouvoir démonter ces éléments sans démonter les câbles.

Contrainte à prendre en compte	
Masse	30 Tonnes
Conception	Non-intrusive
Roulis	2°/sec
Assemblage	Ne pas démonter les câbles

Nous avons alors commencé par déterminer une géométrie globale de la pièce en nous basant sur les dimensions du démonstrateur Themis, large de 3,5 mètres de diamètre.



4

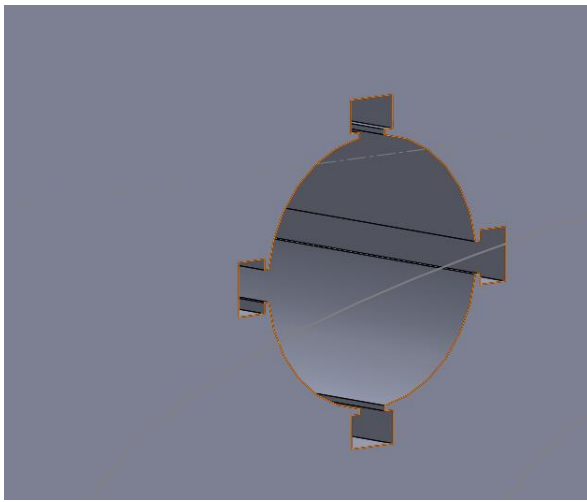


3

L'idée derrière cette première esquisse est que notre sous-système est divisé en 4 plateformes que nous nommerons « berceau » qui doivent aller entourer le lanceur sans le toucher de manière à ce que les ailerons puissent se poser sur les berceaux.

Systeme de glissement :

Il fallait ensuite trouver le moyen d'intégrer un système de glissement permettant de poser cette plateforme sur les câbles. Pour cela nous avons dans un premier imaginé un roulement à billes linéaire :

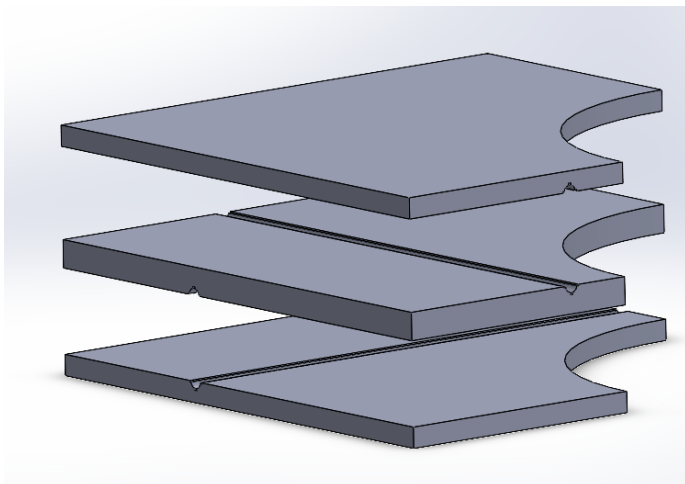


5

Les billes passant dans les rainures et permettant un glissement optimal du câble.

Assemblage :

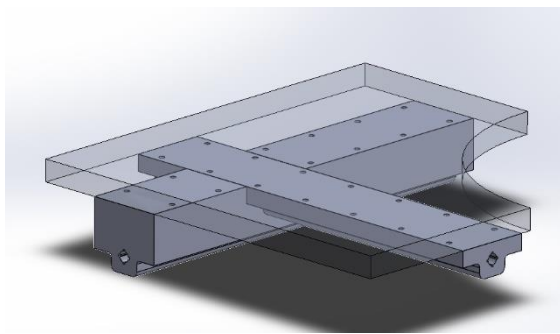
Mais il ne fallait pas oublier le fait que ce système de roulement doit pouvoir se démonter sans toucher au câble. Pour cela une première itération d'une version démontable a été réalisé :



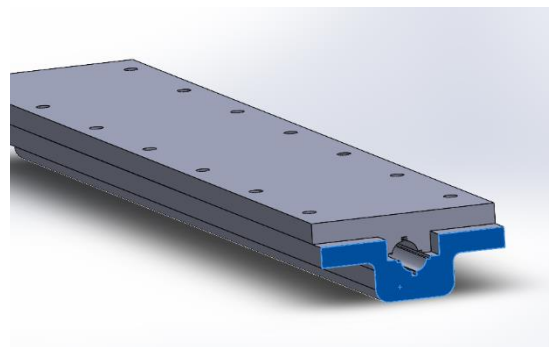
6

Il apparaît tout de suite après la réalisation de cette modélisation que la mise en place d'une telle structure paraît périlleuse car pour rappel, il s'agit de pièce en acier de 3,8 mètres en l'état, il s'agit donc de pièces très lourdes et difficiles à manœuvrer. Il apparaît donc beaucoup plus pertinent d'externaliser le système de glissement de la plateforme.

C'est donc ce qui a été réalisé sur l'itération suivante :



8



7

Cette version apporte la possibilité de placer le système de glissement sur les câbles avant de y poser le berceau.

Analyse de masse :

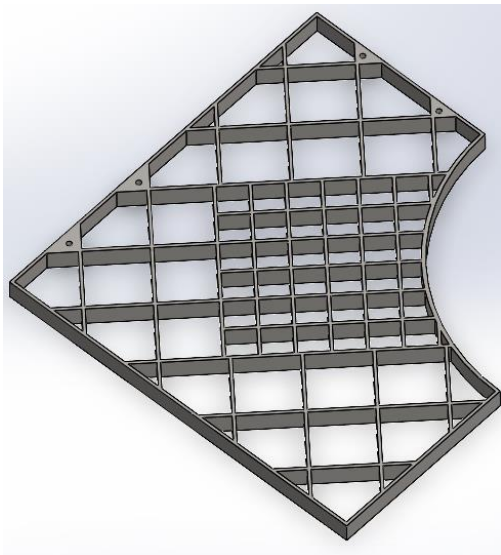
Il apparaît cependant un problème de poids, littéralement de poids car il a été choisi que cette pièce serait en acier car il s'agit d'un matériau peu cher, facile à travailler et résistant. Cependant ces pièces pour l'instant sont pleines et à l'aide d'un rapide calcul on peut facilement déterminer leurs masses :

Grace au logiciel de CAO on connaît le volume du berceau : **$V = 2.32094253 \text{ m}^3$**

La masse volumique d'un acier d'environ 7400 Kg/m^3 : **$\rho = 7400 \text{ Kg/m}^3$**

On sait que **$M = \rho \times V = 17\,174 \text{ kg}$** soit **17.1 Tonnes**

Sachant qu'il y aurait 4 exemplaires de cette pièce, il n'est pas concevable d'avoir un système aussi lourd car il ne faut pas oublier que ce système sera motorisé, et donc, même si la masse du système n'est pas une contrainte majeure, il n'en reste pas moins qu'il est important de ne pas avoir un système trop lourd. Ainsi nous avons décidé de mailler la pièce afin de réduire significativement son poids sans trop altérer sa résistance à l'effort :



9

Nous avons décidé de réaliser un maillage en deux temps, l'un plus serré car étant l'endroit où se poserait l'aileron et permettrait une meilleure répartition des efforts avec plus de points de contact, limitant ainsi les potentielles déformations de l'aileron.

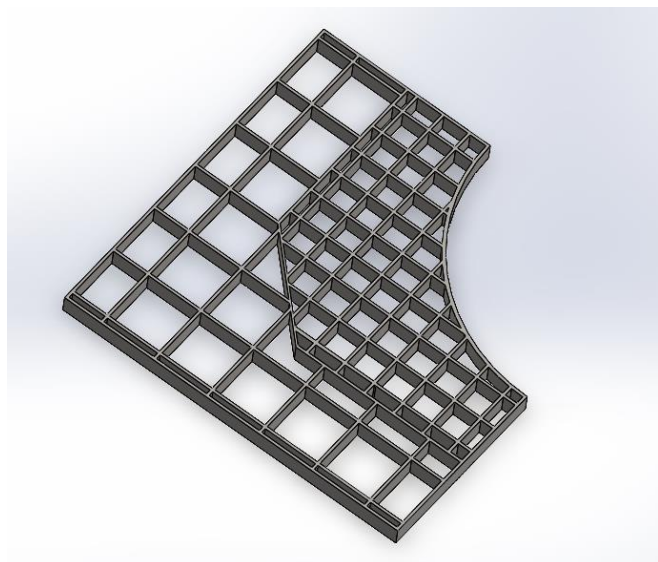
Puis un autre moins serré car rien ne se serait censé se poser dessus et il s'agirait donc de zones moins soumises à l'effort.

Cependant il m'est apparu un problème en documentant [les cas d'atterrissage du lanceur](#). Du fait du roulis du lanceur, il est impossible ou en tout cas, très difficile de déterminer où seront les ailerons du lanceur, par conséquent, avec le design actuel, il parfaitement possible que les ailerons se posent sur des zones du berceau non prévu pour, et le maillage serré ne serait donc d'aucune utilité.

Par conséquent le design a été revue de manière à ce que peu importe l'endroit où se posent les ailerons, ils soient sur une zone à maillage serré leurs permettant de répartir au mieux les efforts.

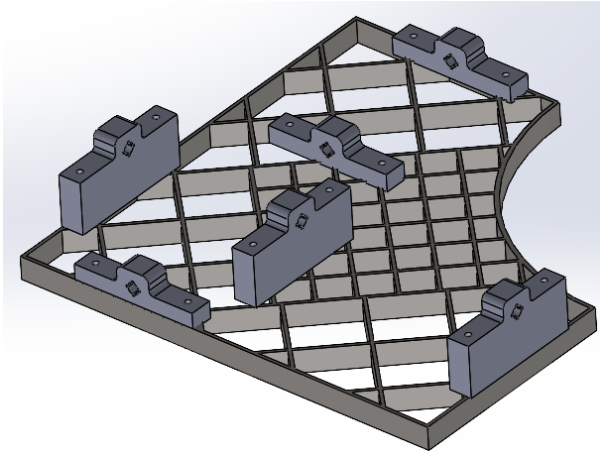
Il est à noter que lors de ces modélisations, les berceaux sont monobloc.

Il reste cependant parfaitement envisageable de réaliser un assemblage de poutres métalliques pour faciliter la fabrication d'un tel système et obtenir une pièce très similaire à celle modélisé. La pièce est ici monobloc par soucis de simplicité de représentation.



10

Les systèmes de glissement ont subi le même traitement car les pièces dans leurs [première version](#) étaient très massives sans que cela représente un grand intérêt. Elles ont donc été réduite en plusieurs morceaux coaxiaux de manière à réduire le poids de ces éléments comme on peut le voir ci-dessous.



Ces éléments seraient tenu à l'aide de boulon.

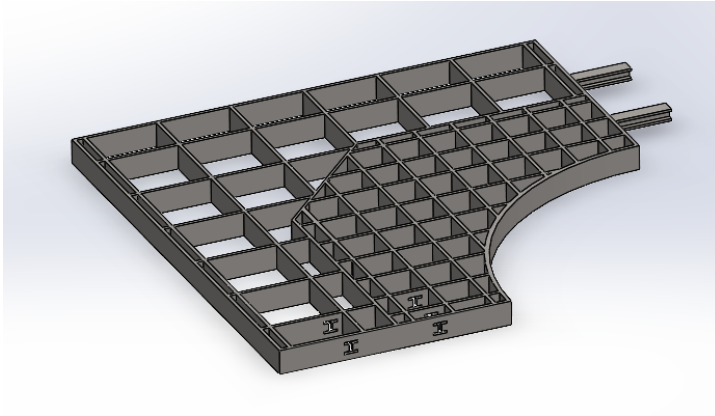
11

Ce développement a permis jusqu'à maintenant de définir le fonctionnement et la géométrie de la pièce, nous avons une pièce relativement légère par rapport à la résistance qu'elle nous offre. Nous avons un système de glissement fonctionnel qui risque très probablement de concentrer trop fortement les contraintes sur les billes, il serait donc intéressant de réaliser des simulations afin de connaître les zones où ces contraintes sont concentrées. Il nous restait aussi à trouver un système permettant de bloquer les berceaux entre eux une fois positionner correctement.

Problématiques restantes :

Blocage des berceaux avant l'approche du lanceur :

Un élément sur lequel nous avons émis un début de réflexion et qui son importance, il s'agit du blocage des berceau entre eux avant l'atterrissage du lanceur. En effet il est important que les berceaux soient solidaire lors de l'atterrissage car autrement, avec les efforts causés par le lanceur, les berceaux pourraient glisser ou fléchir individuellement ce qui ne provoquerait pas une bonne répartition des efforts sur le système. Ainsi les rendre solidaire permettrait de s'assurer qu'ils restent coplanaires et ainsi assurer une meilleure sécurité lors de l'atterrissage en homogénéisant les contraintes.



Une première idée fut alors de placer extrusion et enlèvement de matière de chaque côté de la pièce de manière à permettre à chacun d'entre eux de s'insérer dans l'autre et ainsi bloquer les déplacements :

12

Cette première présente cependant plusieurs problèmes : Le premier est que ce design, s'il permet certes de garder les berceaux coplanaires, il ne permet pas d'assurer un blocage du déplacement des berceaux sur les câbles. Autrement dit, le déplacement selon Z est solidaire, mais pas selon X ou Y.

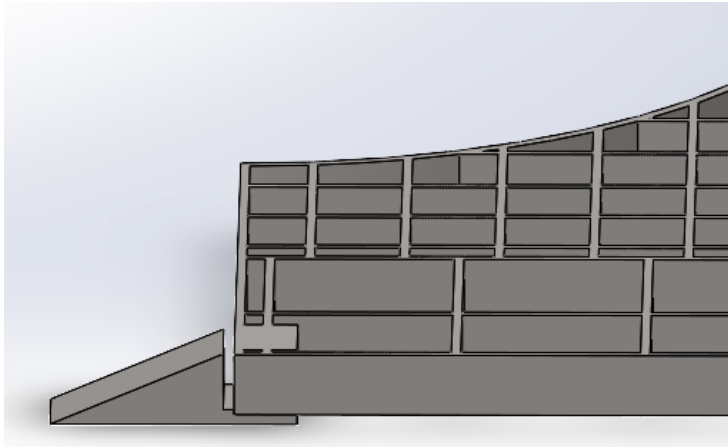
Ensuite, second problème, ce système n'offre pas une grande marge d'erreur or, les plateformes se déplacent pour certaines sur des câbles différents, nous ne pouvons assurer une coplanarité parfaite entre les 4 berceaux. Ainsi il nous faut trouver une solution avec une meilleure marge d'erreur.

Une solution qui a été envisagée a été de remplacer la forme IPN par des formes coniques solutionnant le problème de marge d'erreur. Cependant il reste toujours le problème de blocage selon X et Y.

Une autre idée que nous avons eue a été de s'inspirer du principe d'un stylo à pointe rétractable



13



14

L'idée est ainsi la suivante : Nous avons une pente progressive sur laquelle l'autre berceau va venir glisser jusqu'à se bloquer dans la fente. Une fois les 4 éléments bloqués ensemble, impossible, les déplacements seront aussi solidaires sur les axes X et Y

L'idée semble excellente pour l'accrochage, mais il reste encore à déterminer comment décrocher les pièces les unes des autres après l'atterrissage, car s'il suffit d'appliquer une petite force sur le stylo pour faire se rétracter la pointe, lorsqu'il s'agit de pièces de plusieurs tonnes, l'effort à fournir est tout autre.

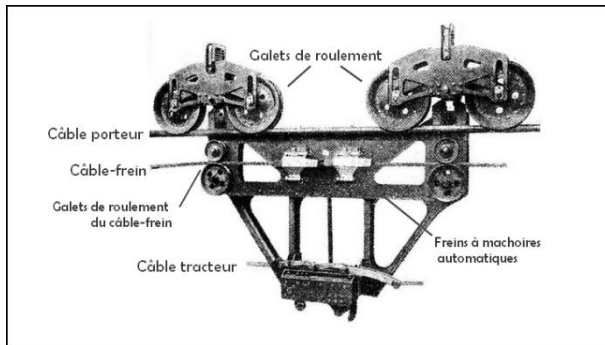
Cette problématique est toujours en cours de réflexion et n'aura pas de réponse définitive pour ce rapport.

Système de glissement :

Le système de glissement représentait une, si ce n'est la partie la plus critique de notre système, car il faut bien comprendre qu'au-delà de guider la plateforme, ce système subit tout l'effort de l'atterrissage car il fait la jonction avec le câble ou l'effort va être absorbé, sans oublier que par sa taille réduite, les contraintes vont être concentrées en des points particuliers ce qui met le système à rude épreuve. Le défi majeur de ce système de glissement était alors de répartir au mieux les efforts afin de limiter les risques de cassure ou un surdimensionnement du système.

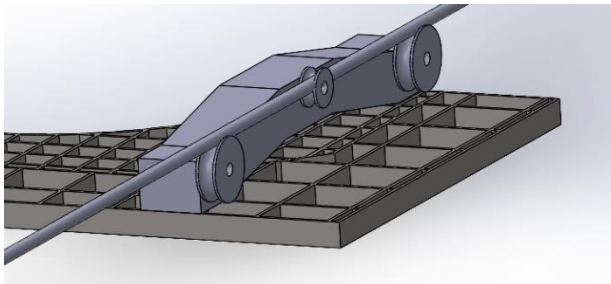
Nous avons bien conscience qu'un système de roulement à billes linéaires était loin d'être idéal car au-delà de sa complexité par le nombre éléments présents dans le système, il faut aussi prendre conscience que tout l'effort allait être réparti seulement sur les billes des roulements. Comme nous le verront plus tard l'effort lors de l'atterrissage est estimé à 652 kN. Des billes d'un diamètre d'environ 2cm même avec un nombre conséquent ne pourrait subir un tel effort.

Une idée nous est cependant venue récemment en s'inspirant des systèmes de déplacement des téléphériques.



Car un tel système permet d'avoir une meilleure surface de contact entre le câble et ledit système de roulement ce qui nous permet d'avoir une meilleure répartition des efforts entre le berceau et le câble.

15



Nous avons alors commencé à développer un nouveau système inspiré de celui ci-dessus, les deux grandes poulies subiraient ainsi l'effort lors de l'atterrissage et la petite au centre permettrait simplement de maintenir le câble dans l'enroulement

16

Il s'agit ici seulement d'une première ébauche car comme précisé plus haut, malheureusement l'idée a été trouvée tardivement ce qui n'a permis d'aller plus loin.

Ainsi dans les simulations qui suivront dans ce rapport, le système utilisé sera bien le système de roulement à bille linéaire. De même, le prototype réalisé ne reprendra pas ce système.

Comme énoncé plus tôt, il serait maintenant intéressant d'effectuer quelque simulation afin de déterminer si nos choix en termes de dimensionnement sont les bons ordres de grandeur, et surtout afin de connaître quelles sont les zones où les contraintes sont les plus élevées.

Simulation

Nous avons pu réaliser quelque simulation d'efforts statiques qui ont permis de donner un aperçu des efforts en jeu sur le système de glissement ainsi que sur le câble à l'atterrissage du lanceur.

Nous avons procédé par itérations en réalisant des approximations assez grossières mais qui permettent de donner des ordres de grandeur. Encore une fois, l'idée ici n'est pas d'avoir des simulations parfaitement fidèles à la réalité, mais des ordres de grandeurs qui nous permettent de dimensionner le système pour une première itération.

Nous allons ici simuler un effort de traction sur le câble

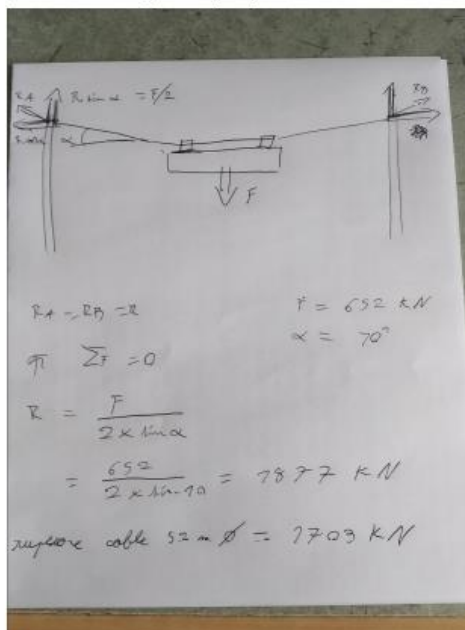
Cette simulation s'appuie sur les calculs effectués ci-contre :

calcul effort max câbles :

$$P = M \times G = 42\,080 \times 9.81 = 412,804 \text{ kN}$$

$$F = 240 \text{ kN}$$

$$\text{effort agissant perpendiculairement au sol} = P + F = 412.804 + 240 = 652.804 \text{ KN}$$



source : <https://www.ecam.fr/materiaux-structures/03-cable-suspendu/#nogo>

<http://www.pms-ind.com/img/pdf/pms-levage-cable.pdf>

Équation 1

On définit la simulation :

On cherche donc dans un premier temps à isoler une seule partie du câble, on imagine qu'on sectionne le câble en deux, le câble originel faisant 16 mètres, il nous en reste 8. On applique la moitié de la force trouvée précédemment à une extrémité du câble, puis on encastre l'autre extrémité. Le câble est ici modélisé sous forme de cylindre par souci de simplicité.

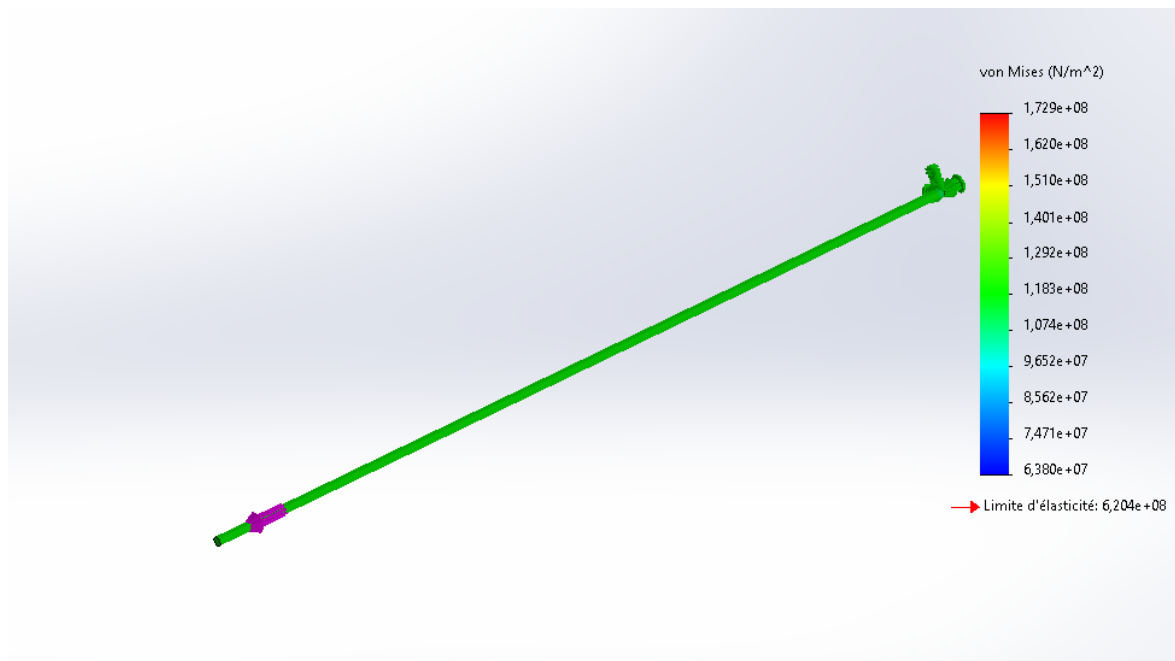
Diamètre du câble : 100mm

Longueur du câble : 8m

Effort sur le câble : 958.5 kN

Méthode des élément finis, on applique un maillage relativement grossier de par la taille de la pièce

Résultat :



Result 1

On constate donc une contrainte max de 1.729×10^8 N/m², notamment présentes aux extrémités. On ne dépasse pas la limite d'élasticité du matériaux (acier). Un premier résultat encourageant.

Nouvelle approche

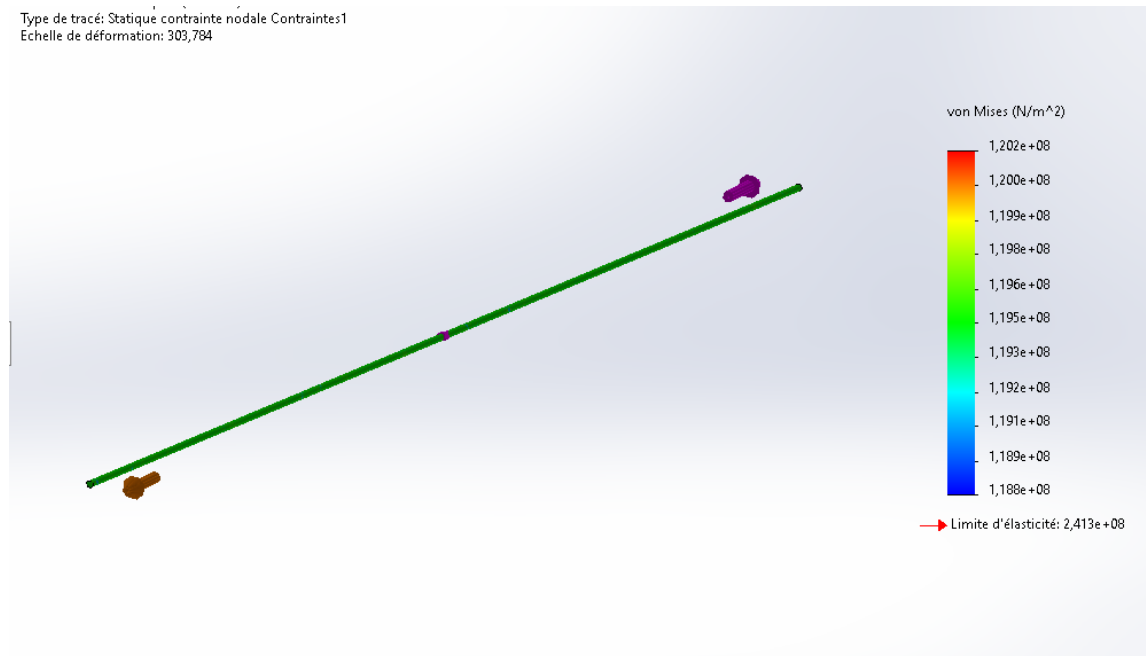
Cette fois ci on garde toute la longueur du câble (16 mètres) et on va appliquer une force de 958.5 kN de chaque côté.

Diamètre du câble : 100mm

Longueur du câble : 16m

Effort sur le câble : 958.5 kN de chaque côté soit un total de 1877 kN

Résultat :



Result 2

On constate un effort max de 1.202×10^8 N/m² encore une fois localisé dans les extrémités. On ne dépasse pas la limite d'élasticité du matériau même si on s'en rapproche dangereusement.

Conclusion :

Cette première approche somme toute simpliste nous permet d'avoir un premier aperçu de la résistance que nous offrent ces câbles. Durant toute cette démarche, nous avons imaginé que tous les efforts reposaient sur un seul et même câble, cependant dans la réalité il y a 4 câbles. Sachant que d'après cette première approche un seul câble suffirait à soutenir l'ensemble du système, on peut estimer que nous avons un coefficient de sécurité de 4, voire plus.

il est important de noter que cette simulation simplifiée fait beaucoup de raccourcis qui peuvent créer des différences significatives par rapport à la réalité. Il est donc bon de rappeler qu'il s'agit ici d'avoir ici un ordre d'idée des forces en jeu plutôt que d'obtenir un résultat précis.

Ces premiers résultats sont encourageant quant aux dimensions qui ont été choisit dès le départ, mais nous allons essayer de nous rapprocher du système réel progressivement et comparer les résultats.

Avec le berceau

On définit la simulation :

On utilise un assemblage afin de regrouper câble, berceau et système de glissement en une seule simulation. Le support et les glissements sont placé de façon approximative au centre du câble, les extrémités du câble sont encastées, on applique des appuis plans sur les côtés du support de façon à limiter ses déplacements latéraux. Le système de glissement et le support sont solidaires. Les câbles et les systèmes de glissements ne peuvent pas se pénétrer.

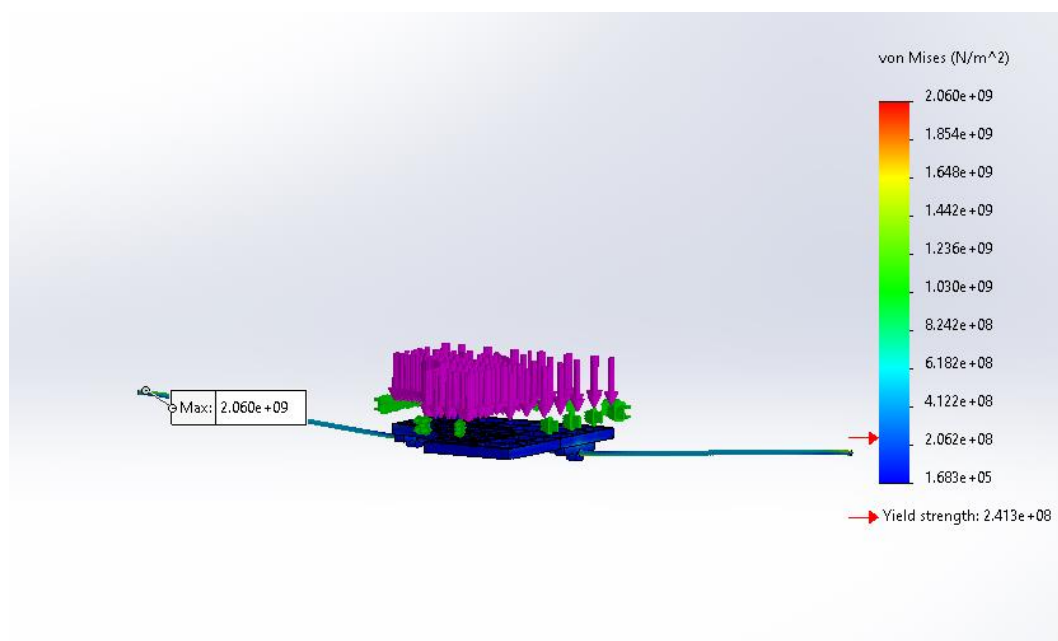
Diamètre du câble : 100mm

Longueur du câble : 16m

Effort sur le câble : 652 kN

Méthode des élément finis, on applique un maillage relativement grossier de par la taille de la pièce

Résultat :



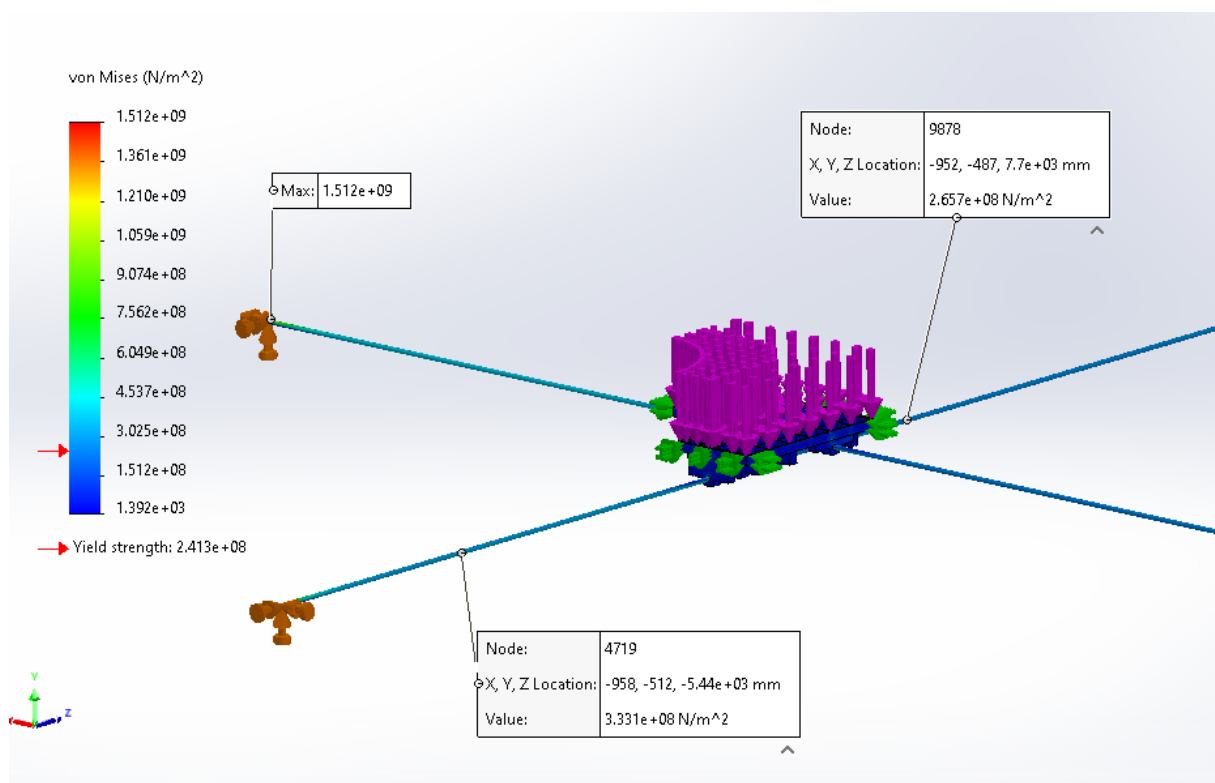
Result 3

On constate donc une contrainte max de $2,6 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, notamment présentes aux extrémités du câble et du support. On dépasse la limite d'élasticité du matériaux (acier).

il est à noter qu'ici, l'entièreté du poids du lanceur repose fictivement sur un seul et même câble, or nous en avons 4 dans la réalité. De plus, cette simulation rudimentaire ne peut être parfaitement représentative de la réalité. Il est aussi important de noter qu'ici le câble est représenté par un cylindre plein en acier

Avec deux câbles et un berceau

Toutes les caractéristiques de la simulation sont identiques à la précédente si ce n'est que nous avons un câble supplémentaire et le glissement qui va avec.



Result 4

Effort max moins conséquent mais toujours supérieur à la limite d'élasticité. Cependant l'effort max n'est pas ici le plus important. Il est plus intéressant de regarder le gradient de couleur des câbles qui se situe toujours légèrement au-dessus de la limite d'élasticité du matériau. Nous sommes donc toujours certes, au-dessus de cette limite, mais ici, tout l'effort du lanceur repose sur une seule plateforme et deux câbles, or, notre système complet comporte 4 berceaux et donc autant de point de contact pour répartir l'effort, ainsi que deux câbles supplémentaires qui viendront faire leurs parts du travail. D'autres simulations seront nécessaires pour confirmer les choix au niveau du dimensionnement, mais les résultats que nous obtenons semblent aller donc la bonne direction.

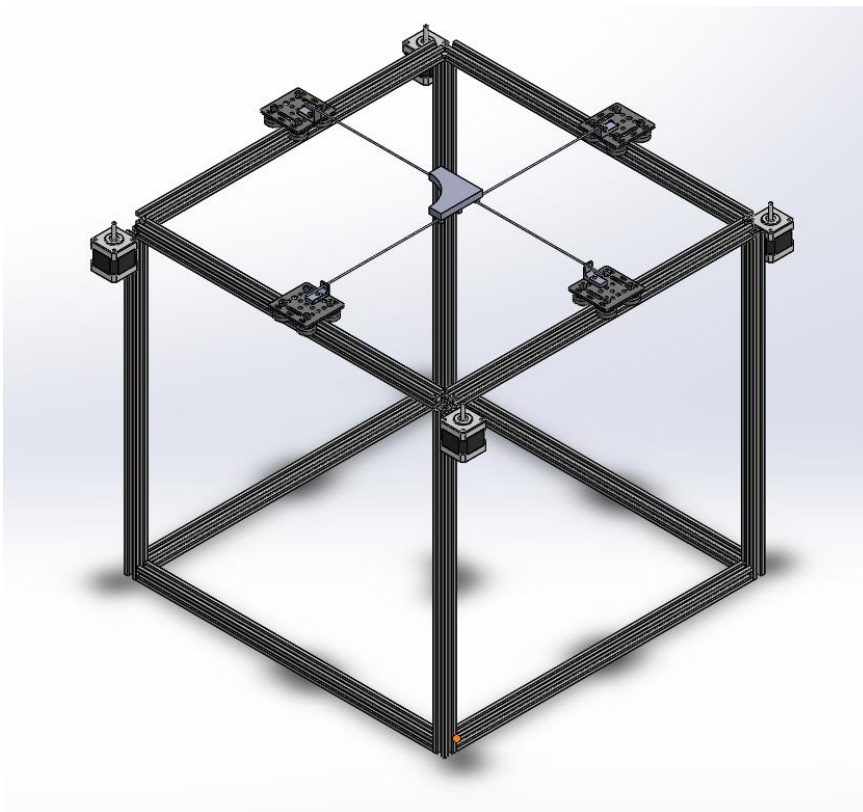
Prototypage :

Conception :

Une fois les modélisations et simulations terminées, nous avons pu envisager la construction d'un prototype d'une échelle d'environ 1/50^e.

Il a alors fallu adapter certaines pièces modélisées à l'échelle 1/1 afin qu'elles reste fonctionnelles pour une taille moins élevée.

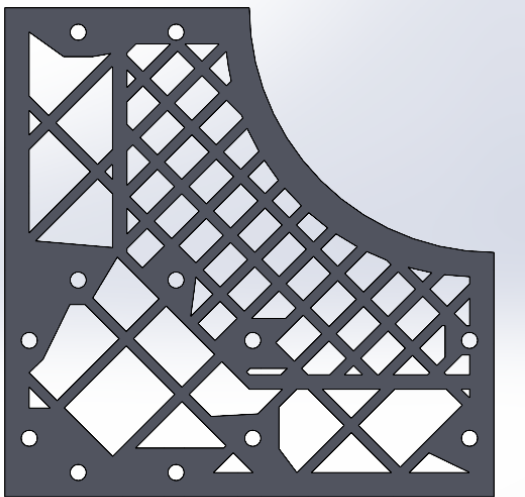
Ce prototype va permettre de tester à une échelle réduite le comportement de la plateforme sur les câbles. Flexion, oscillation...



17

Le prototype sera constitué d'une structure cubique en profilé aluminium.

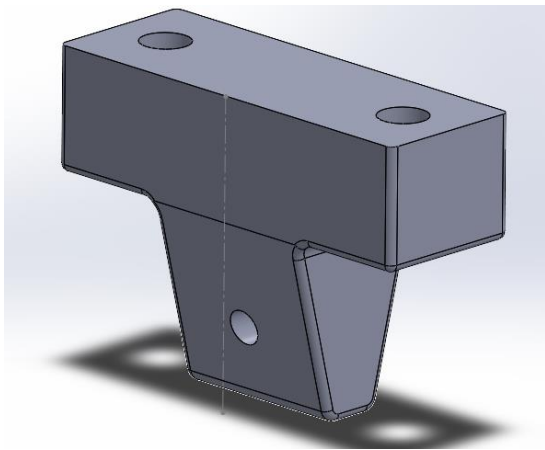
Le berceau représente l'élément central du prototype :



Certaines zones ont été remplie grossièrement car la pièce sera soit fabriquée à l'aide d'une imprimante 3D résine ou bien en MDF à la découpeuse laser. Il s'agit donc de deux matériaux relativement fragiles et on ne souhaite pas que la pièce casse au niveau des fixations. Les trous de taille M3 serviront à fixer les systèmes de glissement.

18

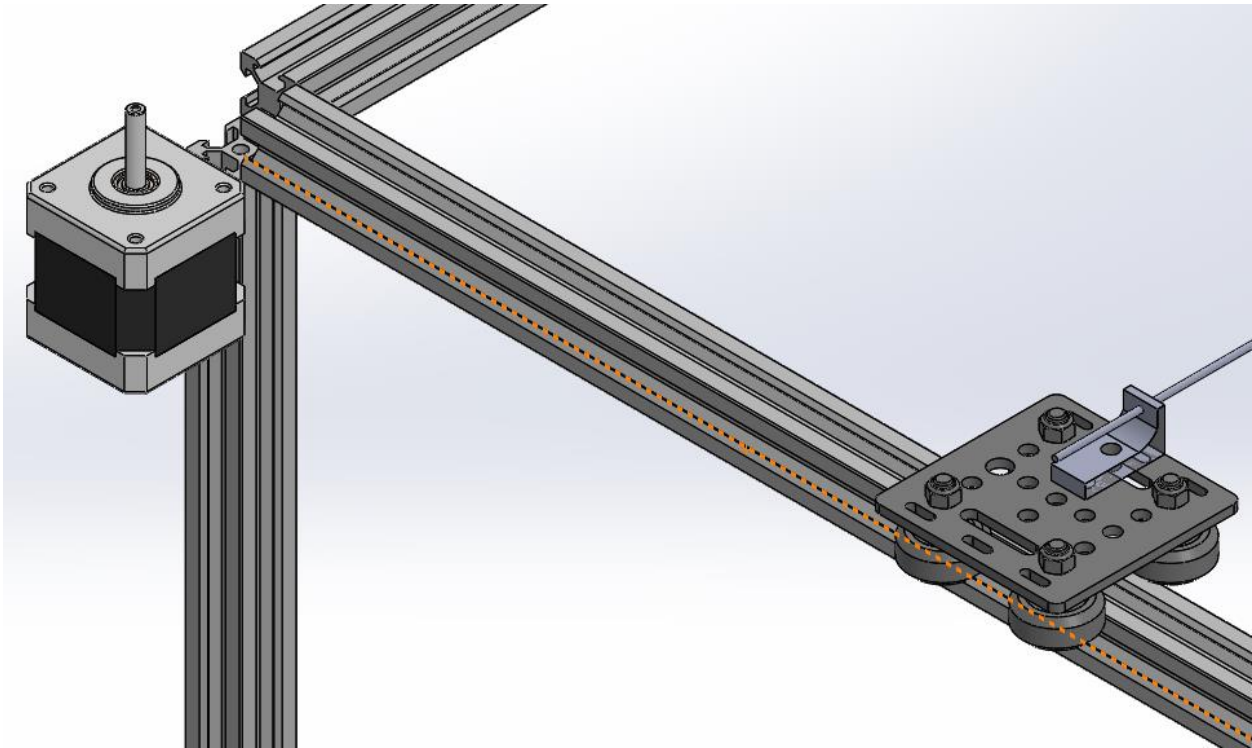
Les systèmes de glissement ont volontairement été simplifié car à l'échelle où nous sommes il était difficile de représenter correctement un roulement à bille linéaire. De plus, comme nous avons pu le dire plus tôt, un nouveau système de roulement a été imaginé et il paraissait donc peu pertinent de réaliser le premier. Le câble passera donc simplement dans un trou sans lubrification, ce qui sera suffisant dans un premier temps pour les tests que nous souhaitons réaliser.



Les câbles qui passeront dans ces trous seront 2 câbles en acier de 2mm croisés perpendiculairement pour faire glisser le berceau sur les deux axes.

Ces câbles seront eux-mêmes retenus de chaque côté par des chariots glissants sur les profilés. Ces chariots seront composés de roue et de plateau qui seront fixés sur les profilés et glisseront dessus selon un seul axe.

Ces chariots seront ensuite pilotés électroniquement par des servos moteurs, le tout relié à l'aide d'une courroie le long du profilé (fonctionnement similaire au déplacement des axes X et Y d'une imprimante 3d). (Courroie non représentée)

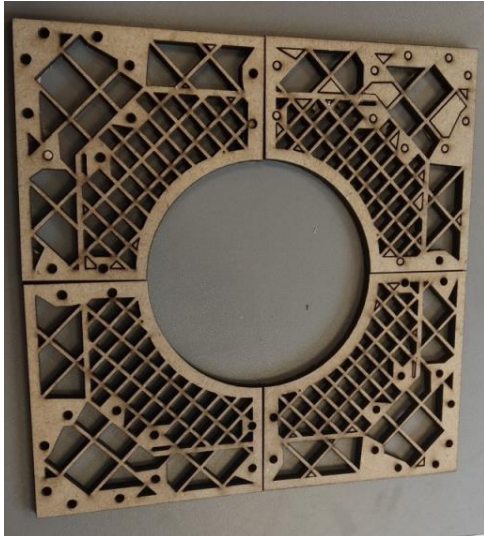


19

Chaque câble aura besoin d'un chariot et d'un moteur de chaque cotés pour un contrôle optimal, par conséquent, 2 moteurs et 2 chariots par câbles.

Machinerie et Fabrication

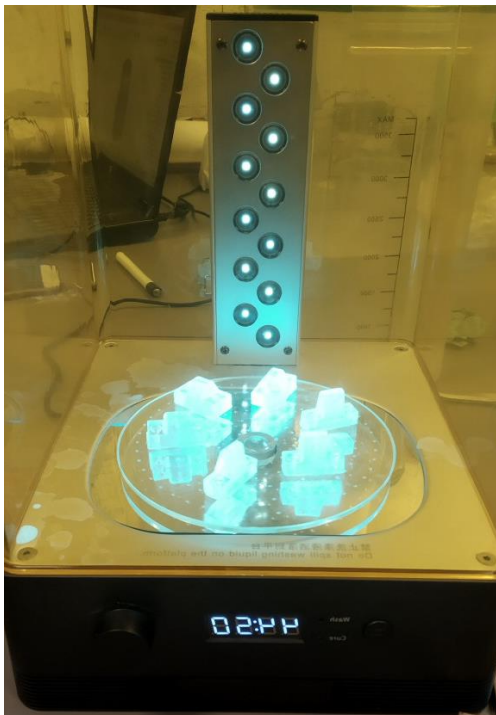
Ce stage a aussi été l'occasion d'utiliser plusieurs machines pour la réalisation de différentes pièces du prototype.



20

Nous avons pu réaliser des berceaux à l'aide d'une découpeuse laser en utilisant des planches de MDF. Cela a permis de valider le modèle 3D.

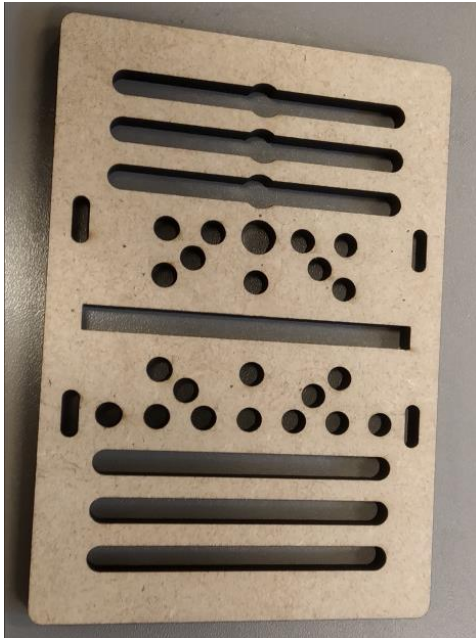
Afin de tester d'autre méthode de fabrication nous en avons fabriqué une aussi à l'aide d'une imprimante 3D résine. C'est cette dernière qui sera utilisé pour le prototypage.



21

L'imprimante 3D résine nous a d'ailleurs permis de réaliser les systèmes de glissement simplifiés qui permettront de faire la jonction entre le berceau et le câble

On peut voir ci-contre les systèmes de glissement en cours de « curage », car l'imprimante 3d résine fonctionnement par phénomène de polymérisation de la résine à l'aide de rayons UV. Cependant, lorsque la pièce est imprimée, il reste de la résine qui n'a pas été polymérisé. Ainsi, ce curage a pour but d'exposer massivement les pièces imprimées à des rayons UV pour finir de durcir les pièces. Un salon de bronzage miniature en somme.



La découpeuse laser nous a aussi permis de réaliser en MDF les plateaux des chariots glissants sur les profilés.

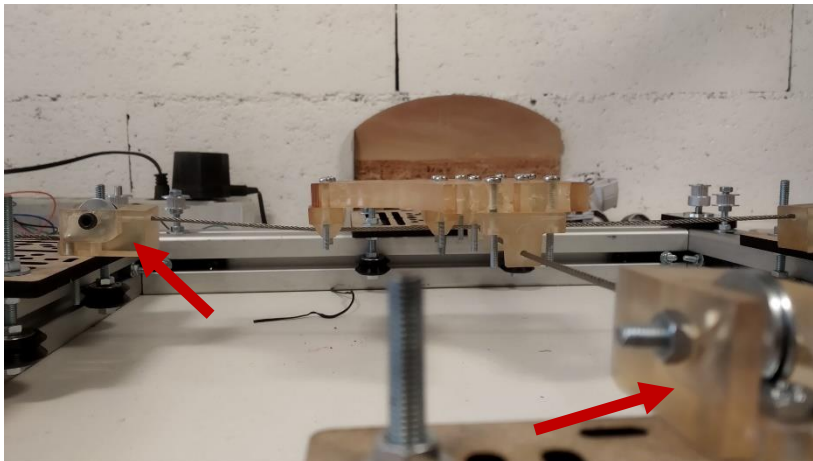
Les roues ont été achetées séparément et seront assemblées comme sur l'image ci-dessous.

Ces « chariots » comme nous les appelons vont nous permettre de tenir et tendre les câbles sur deux axes différents et ainsi de déplacer le berceau dans un carré.



22

L'imprimante 3D résine nous a permis de fabriquer d'autres pièces nécessaires au fonctionnement de prototype tel qu'un tendeur de câble



23

Différentes autres machines et outils auront été utilisés pour fabriquer ou retravailler les pièces dont vous pourrez retrouver le listing sur le [site de l'Electrolab](#)

Assemblage

Le prototype devait normalement être un cube en profilé aluminium de 1m x 1m x 1m, malheureusement suite à des délais de livraison trop longs, les profilés en question n'ont pas pu être acheminés jusqu'à nous à temps. Nous avons donc dû improviser avec les éléments à disposition, en l'occurrence, un profilé de 160cm qui nous a permis de faire un carré de 40cm de côté. Cela n'est pas parfait, mais a permis de réaliser les tests que nous souhaitons :

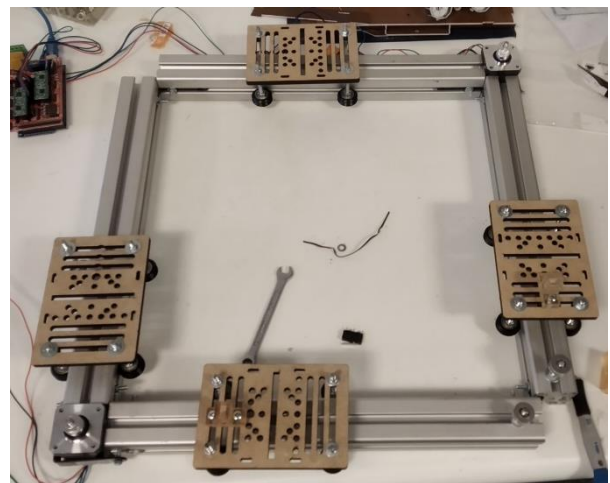


24

Il a fallu ensuite assembler les chariots qui allaient glisser sur les profilés. Pour cela, rien de plus qu'un ensemble de vis et d'écrous afin de régler les chariots à la bonne hauteur :

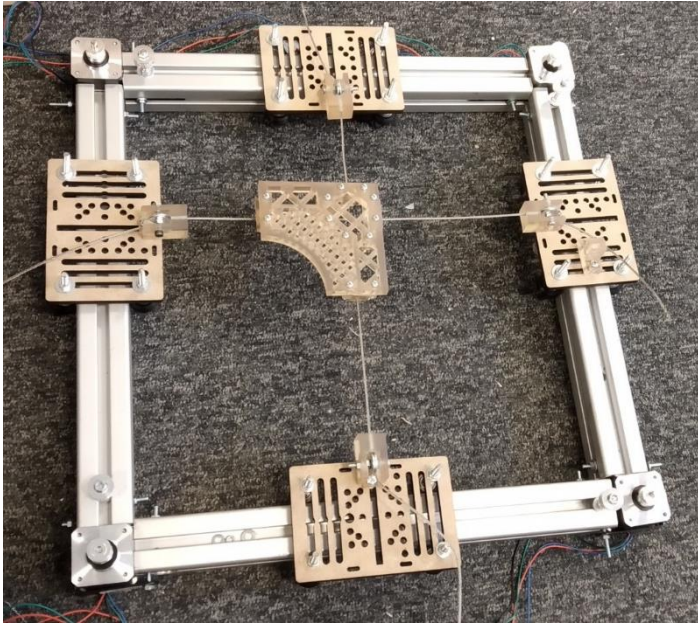


26



25

Et enfin il a fallu joindre les systèmes de glissement et le berceau en un seul bloc solidaire à l'aide nombreux écrous et vis M3. Ensuite nous avons passé les câbles dans les glissements avant de les tendre car ici les systèmes de glissement n'étaient pas en deux parties comme à l'échelle 1/1 par soucis de simplicité et donc les câbles doivent passer dans les glissements avant d'être tendus. Puis nous avons pu fixer les câbles sur les plateaux des chariots afin de les tendre pour finalement obtenir un prototype fonctionnel :



27

Une vidéo test du prototype est disponible [ici](#)

Le prototype aurait dû être motorisé, mais le manque de temps nous a forcé à oublier cette partie non essentielle. Un prototype plus complet et élaboré sera réalisé par la suite mais hors cadre de ce stage.

Conclusion des tests

Comportement des chariots :

Nous avons remarqué que les chariots avaient tendance à plier sous l'effet de la tension du câble, générant un couple au niveau des roues sur les profilés, ce phénomène, propre à notre prototype et à notre façon de tenir les câbles, faussent leurs tensions et rendent les déplacements du berceau moins précis.

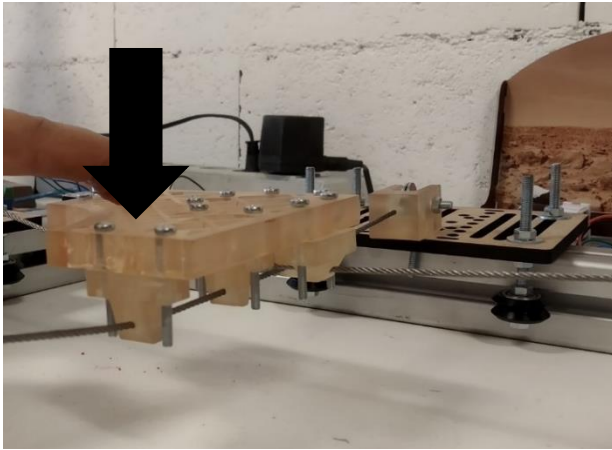
Solution pour l'évolution du prototype : placer un chariot sur le haut et le bas du profilé afin d'optimiser la résistance au couple, positionné le tendeur de câble le plus à l'extérieur du système (à l'opposé de là où ils se trouvent sur les photos) pour la même raison précédente.

Comportement du berceau :

L'objectif principal de ce prototype était de tester le comportement du berceau lors de ses déplacements et lorsque des efforts sont appliqués.

Effort sur la pièce :

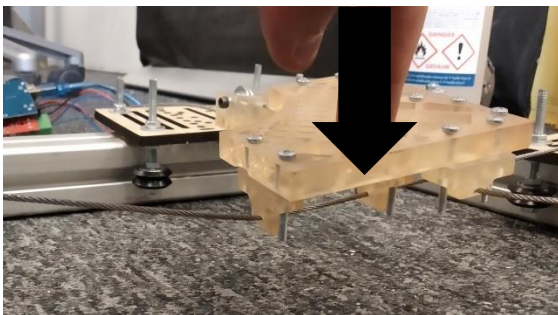
Nous avons pu constater que lorsqu'un effort est appliqué là où l'aileron est sensé se poser, le berceau restait plus ou moins coplanaire avec le reste de la structure comme on peut le voir ci-contre :



28

Chose qui était souhaitée en plaçant le centre de gravité du berceau au niveau de l'application de la force. Autrement, si nous avions un changement de plan du berceau trop important, il pourrait causer une concentration des contraintes sur une partie de l'aileron, ou même provoquer un effet bras de levier sur le fuselage du lanceur avec des conditions comparables à un atterrissage avec un tangage (voir annexe « [cas d'atterrissage](#) » cas « tangage »), il est difficile de dire à l'heure actuelle si cela serait dangereux pour le démonstrateur, mais cela est quelque chose qui n'est pas souhaitable dans tous les cas car cela provoque une concentration d'efforts.

A contrario, lorsque l'on applique un effort sur une zone qui n'a pas été prévu pour, le comportement est tout autre avec un changement de plan beaucoup plus important :



29

Cela ne devrait poser aucun problème mais permet de mettre en évidence la différence de comportement selon la position des efforts sur le berceau.

Déplacement sur les câbles :

La simplification des systèmes de glissement sous la pièce pour des raisons de simplicité comme énoncé plus tôt, ont permis de mettre involontairement en évidence un comportement. En effet, l'échelle qui est ici d'environ 1/50^e permettait difficilement de représenter correctement le roulement à billes linéaire. Par conséquent les câbles passaient directement dans des trous dans la résine sans même une lubrification.

[La vidéo](#) de test du déplacement du berceau nous permet de noter deux comportements subtils mais qui ont leur importance :

Dans un premier temps on peut remarquer de légère « saccade » dans le déplacement qui sont sans doute dû à une mauvaise tension des câbles ou au efforts provoqués par le déplacement des câbles ou encore à la présence de frottements. Ce comportement peut paraître anodin à cette échelle, mais lorsqu'il s'agira de pièce pesant plusieurs tonnes chacune, un tel changement de vitesse de déplacement causé par des saccades pourrait s'avérer dangereux pour le système. Ce comportement montre qu'un système de déplacement sur les câbles sans limitation des frottements par lubrification ou roulement est à réaliser avec précaution. Il est aussi à noter qu'il est envisagé de jouer sur la tension des câbles afin de permettre un amortissement des efforts lors de l'atterrissage. Ces comportements permettent de noter que la gestion de la tension sera un élément important à prendre en compte dans le bon déplacement des berceaux.

Oscillation :

Ce point est aussi corrélé au précédent car ces saccades peuvent provoquer des oscillations des câbles et donc des berceaux. Ces oscillations, si elles deviennent suffisamment conséquentes, pourrait rendre le positionnement des berceaux hasardeux ou pire, endommager le lanceur. Cette oscillation est aussi la résultante d'une certaine latence entre le déplacement du câble et celui du berceau. Jouer sur la tension des câbles pourrait être une fois de plus une solution pour limiter ce phénomène.

Conclusion :

Ce stage a été l'occasion de travailler de façon concrète à l'avancée de l'innovation spatiale en collaborant avec des acteurs tel que ArianeWorks. Il a permis d'initier un projet passionnant et permettra peut-être d'apporter une solution plus performante que les pieds dans un avenir relativement proche. L'objectif de cette mission était d'initier un projet qui a pour but d'être continué et amélioré à l'avenir et en ce sens, avec les bases que nous avons posées, nous pensons que la mission est réussie. Ce stage m'a aussi permis de mettre en application mes connaissances et en apprendre de nouvelles, de mettre en pratique mes conceptions en fabriquant les pièces. J'ai aussi eu la chance de travailler avec des personnes brillantes et inspirantes qui me motive une fois de plus à trouver ma voie dans le domaine du spatial. Ce projet va donc continuer d'évoluer en étant dans les mains des bénévoles de l'association où moi-même je continuerais de travailler sur ce projet.

Un prototype plus élaboré est en cours et de nouvelles itérations du système pourront être imaginés, d'autres pourront aussi concevoir des systèmes totalement différents de celui-ci, l'idée est justement de ne privilégier aucune piste et de faire preuve d'imagination pour ce qui pourrait être un système novateur de demain.

Bibliographie :

1. Page officiel du projet Ad-Astra :

<https://www.federation-openspacemakers.com/fr/participer/projets/adastra/>

2. Page officiel du projet de système de récupération alternatif :

<https://www.federation-openspacemakers.com/fr/participer/projets/adastra/themis-open/>

3. Page de description de Open Space Makers :

<https://www.federation-openspacemakers.com/fr/decouvrir/a-propos/>

4. Description de ArianeWorks :

<https://entreprises.cnes.fr/fr/arianeworks>

5. Projet échelle 1/10 SmarCatcher à l'université de Rennes :

<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/lanceur-concept-smartcatcher-sera-t-il-applique-futurs-lanceurs-ariane-86078>

6. Description de SmartCatcher au sein du programme Perseus :

<https://www.perseusproject.com/projets/smartcatcher-2/>

7. Tout le travaux effectué, CAD, documentation, etc, est visible en open sources sur le cloud dédié au sous projet :

<https://cloud.federation-openspacemakers.com/index.php/apps/files/?dir=/P0096-sous-systeme-lasso-de-recuperation-detaq&fileid=54555>

Pour accéder à ce cloud il est cependant nécessaire de créer un compte sur la plateforme, mais une fois cela fait, le contenu est accessible à tous.

8. Vidéo déplacement prototype :

<https://youtu.be/aqsiHTcKc28>

Annexes

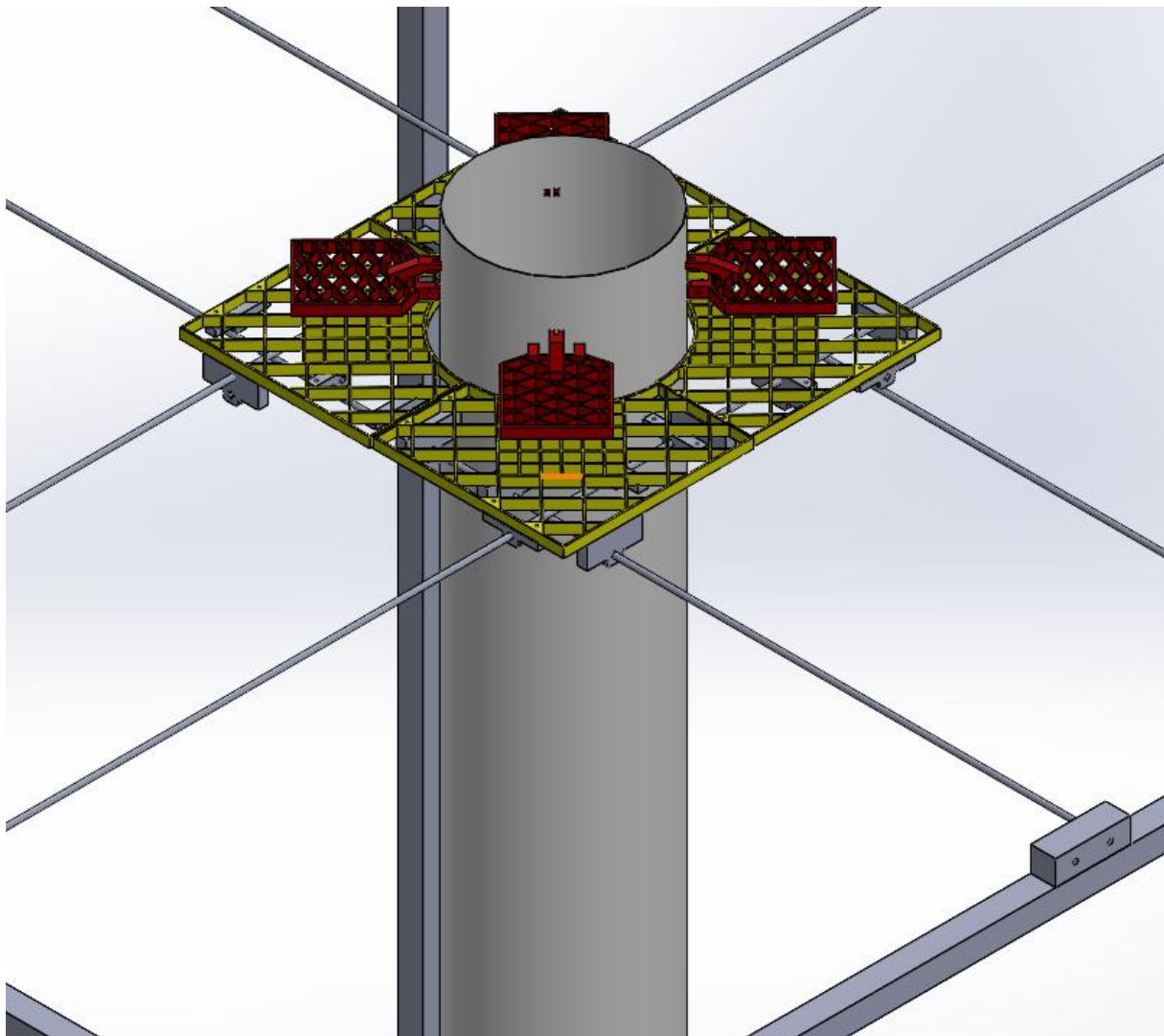
[Cas d'atterrissage](#)

[Plan pièces diverses](#)

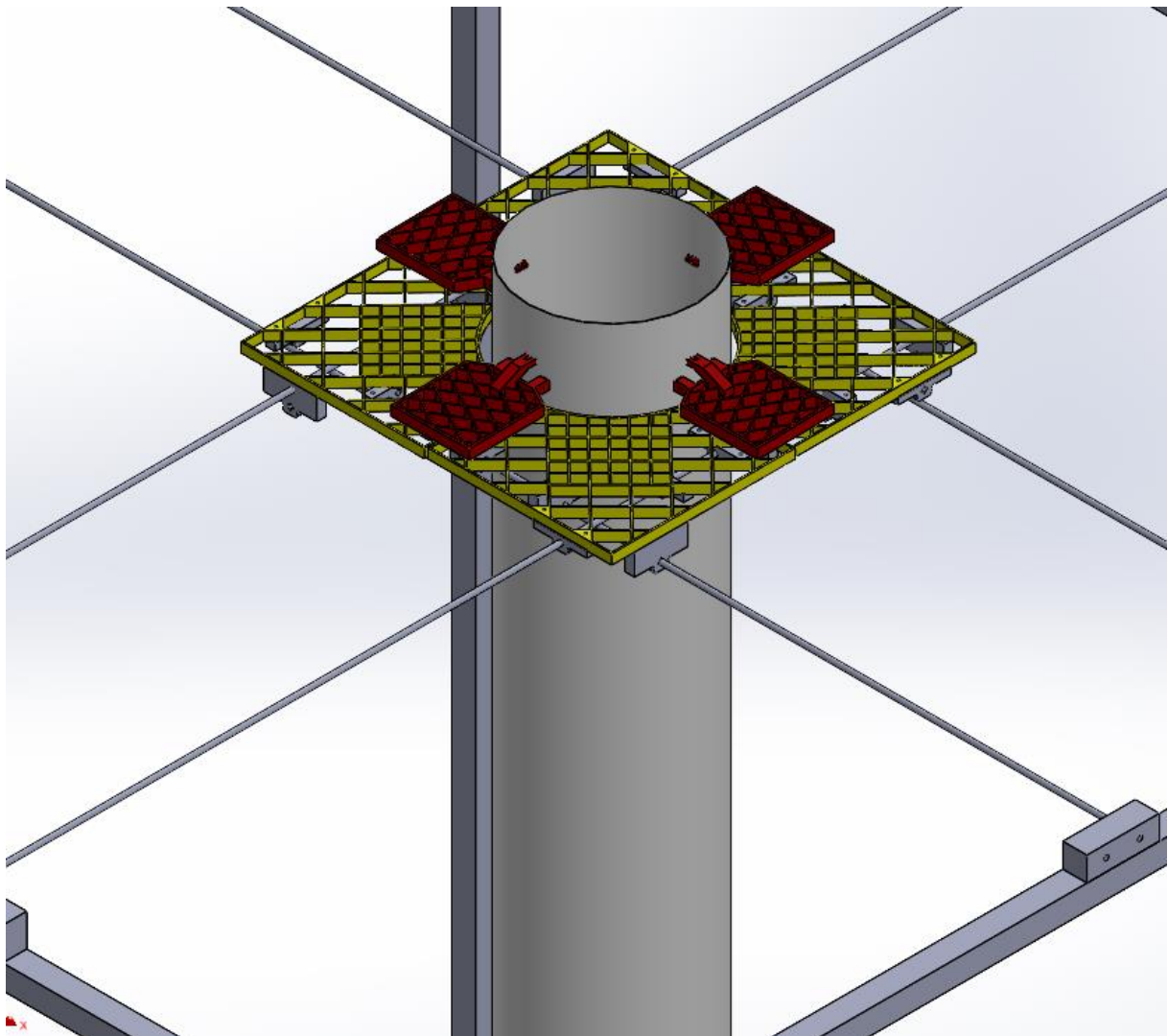
[Calculs](#)

Cas d'atterrissage :

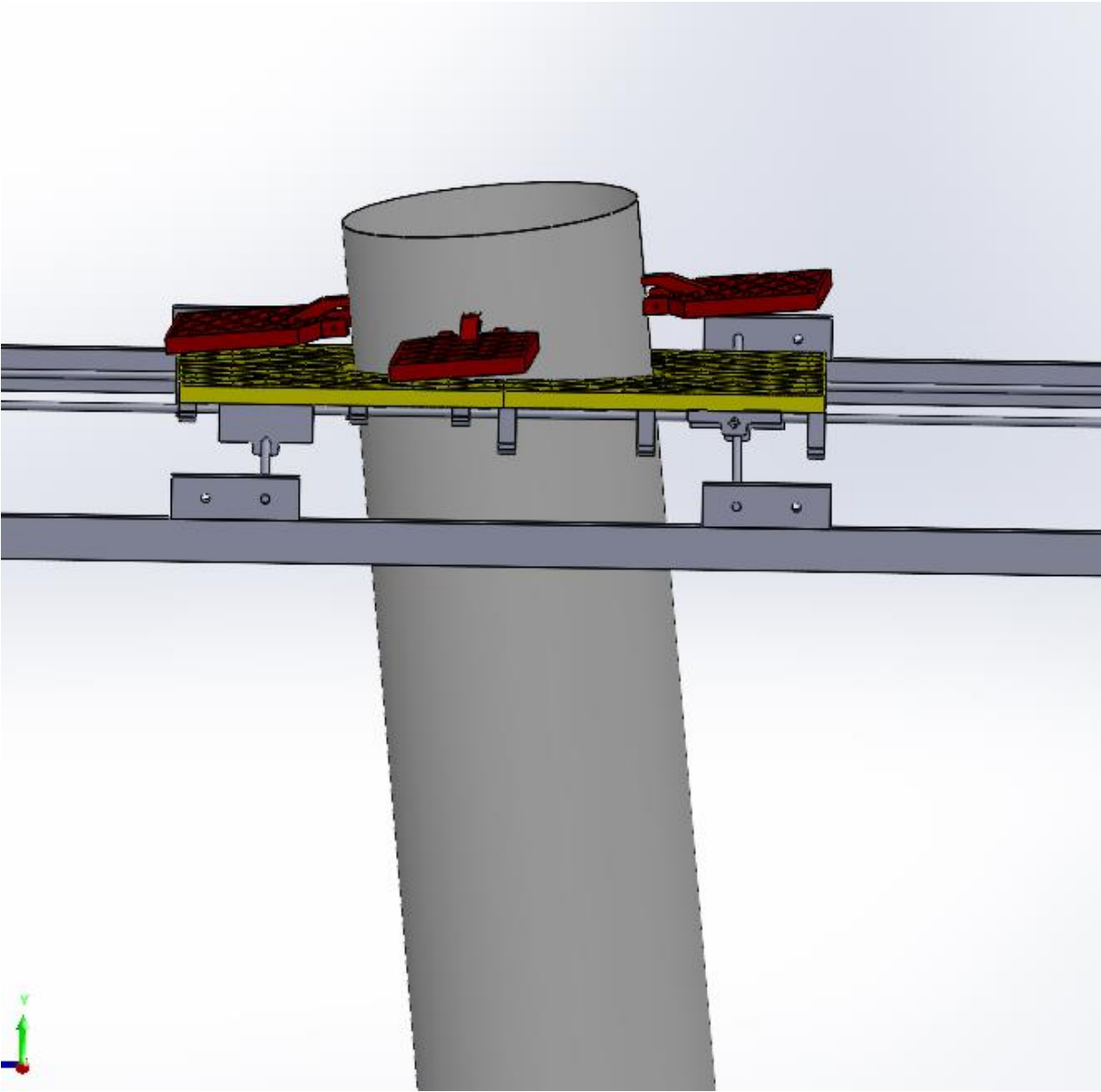
Cas parfait : grid fins alignés (pas de roulis) et aucun tangage



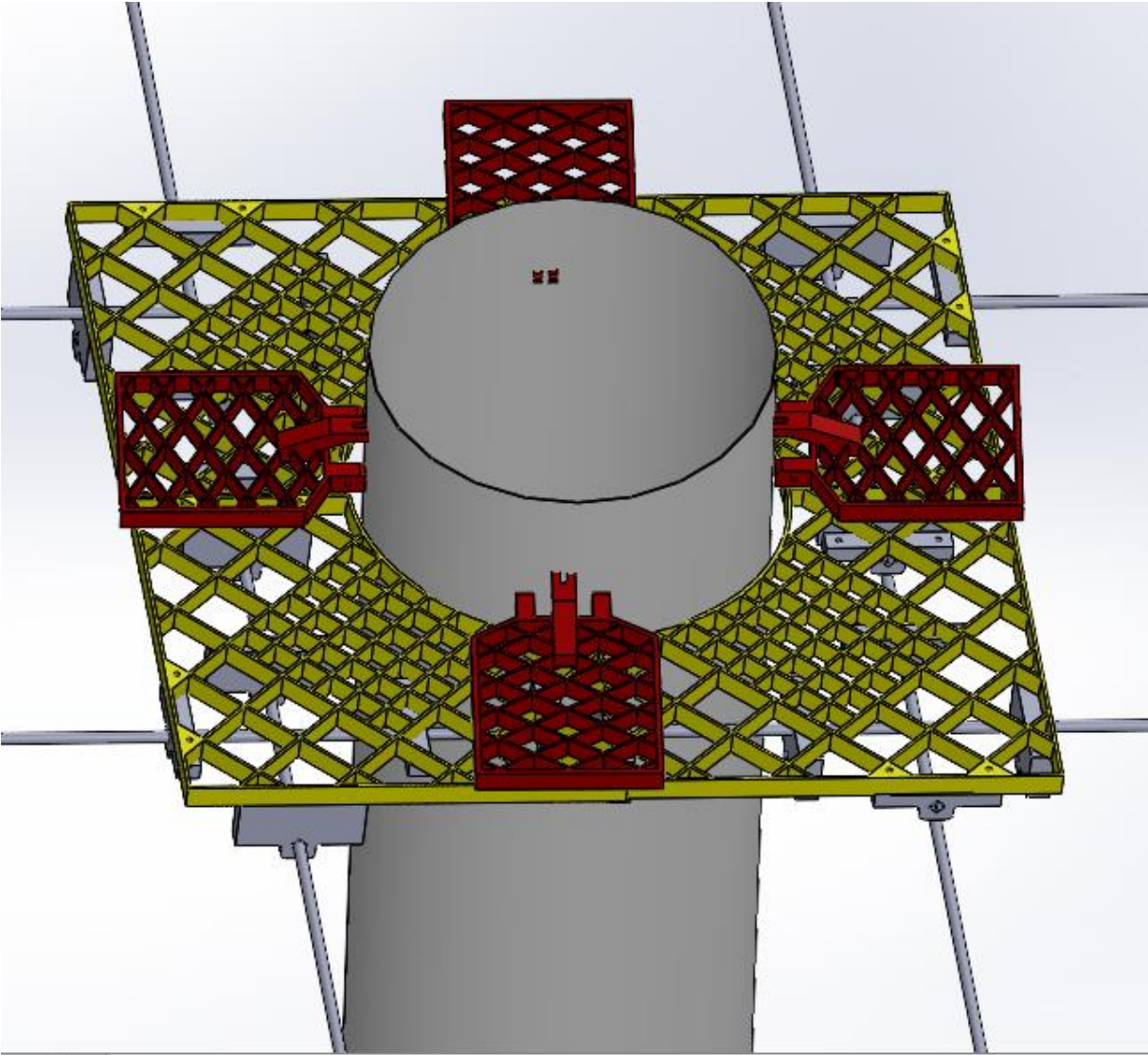
Cas grid fins non alignés : les grid fins ne se pose pas sur la zone à maillage serré (revoir maillage ?)



Cas tangage : le lanceur ne se pose pas de façon perpendiculaire au sol ce qui signifie un effort plus conséquent pendant une courte durée sur une zone particulière de la structure

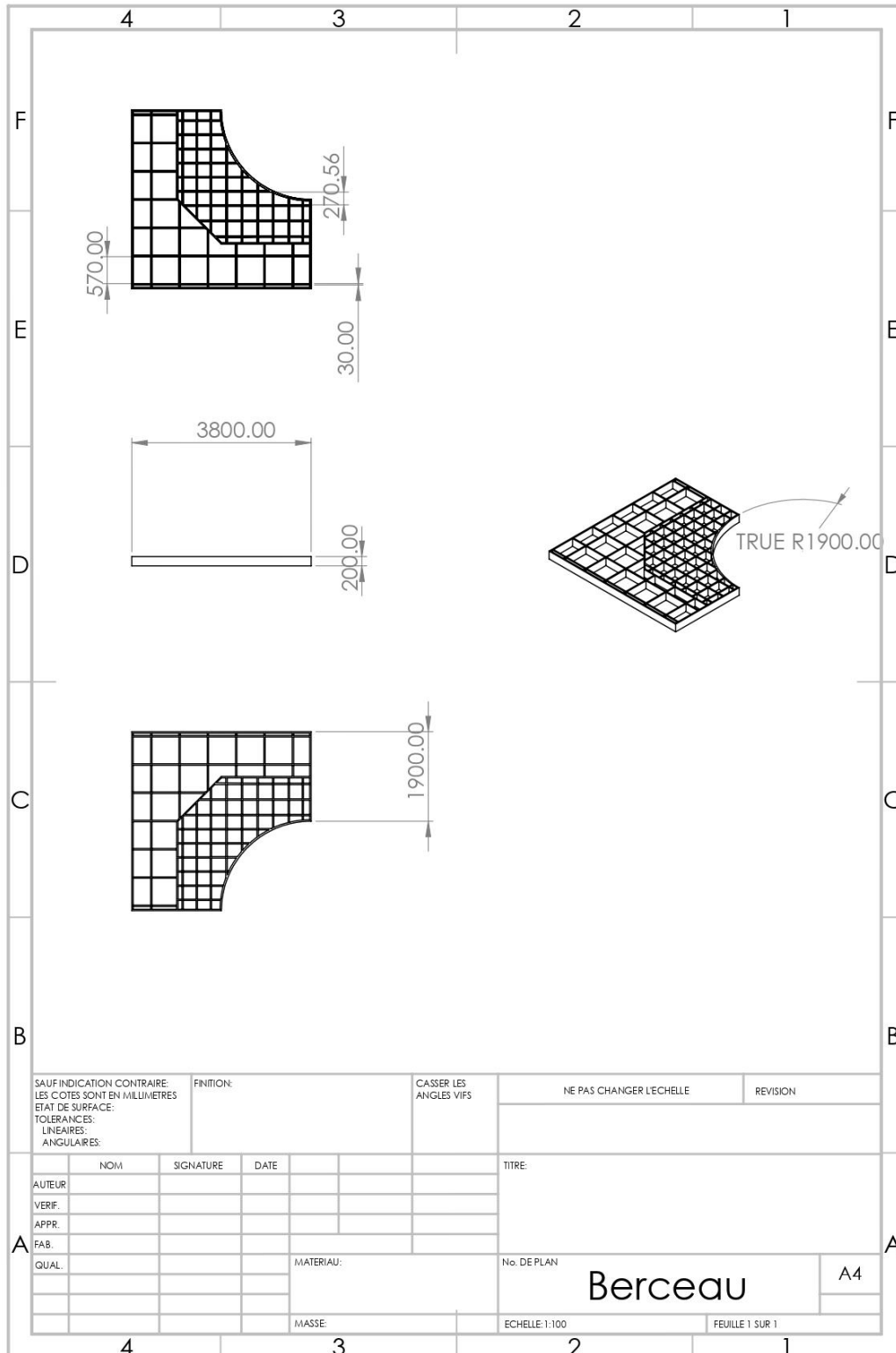


Cas tangage + non aligné : les deux cas précédents se cumule

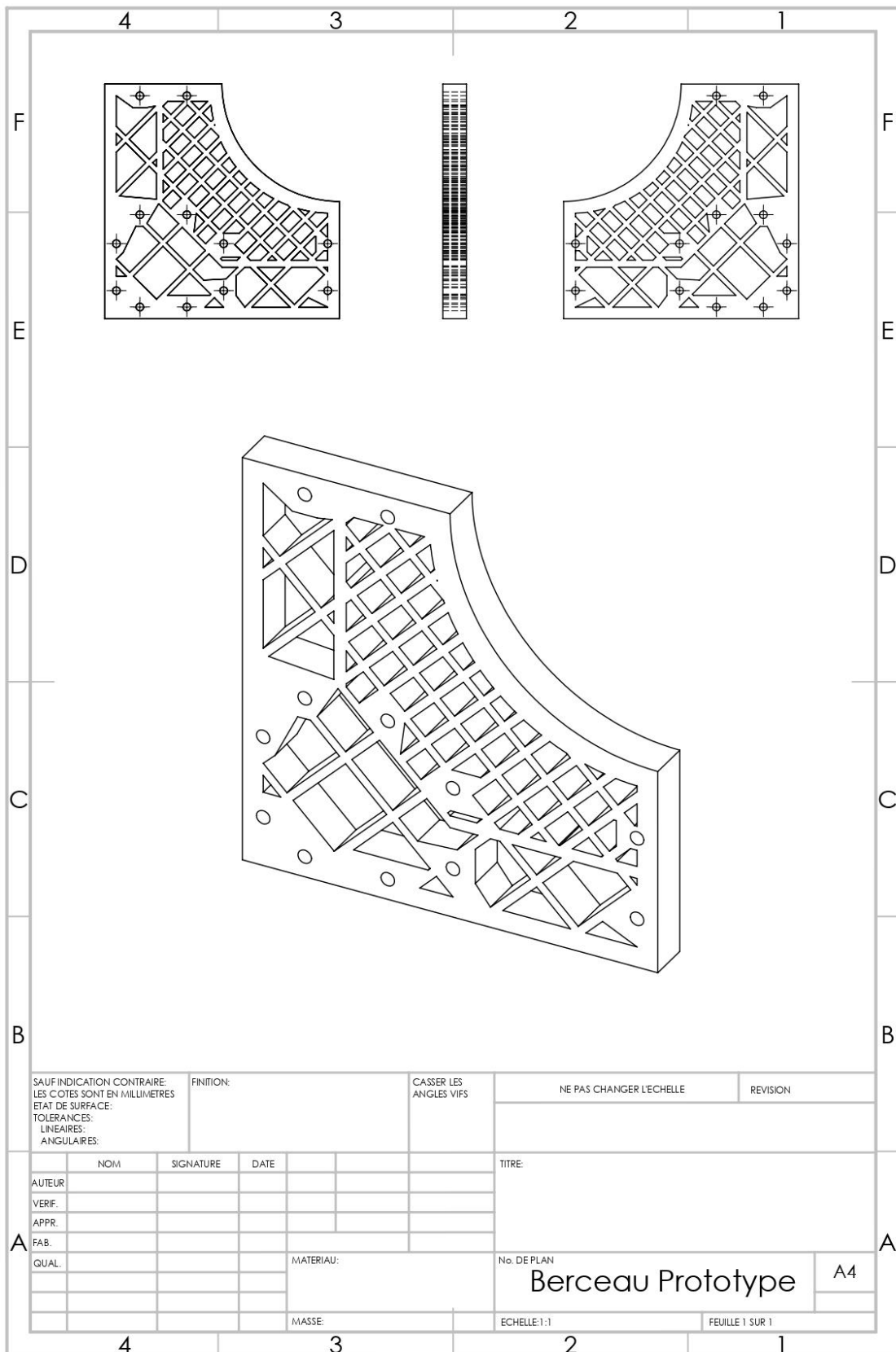


Plan pièces diverses :

Berceau echelle 1/100 :



Plan berceau prototype 1/2 :



Calculs :

Calcul de l'énergie cinétique dans la phase d'atterrissage :

En amont de l'atterrissage :

$$m = 30 \text{ tonnes}$$

$$v = 8 \text{ m/s}$$

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

$$E_c = \frac{1}{2} 30000 \cdot 8^2 = 960 \text{ kJ}$$

En aval de l'atterrissage :

$$m = 30 \text{ tonnes}$$

$$E_{pg} = m \cdot g \cdot h$$

$$E_{pg} = 30000 \cdot 9.81 \cdot 8 = 2.354400 \text{ MJ}$$

$$\text{Donc } F = (E_c - E_{pg}) / (8) = 813 / 8 = 174.300 \text{ kN}$$

Calculer force d'impact :

$$p = mg + f = ma \text{ avec } 30t \text{ et } a = dV/dT = 8_{m/s}/1$$

On part du postulat d'un impact durant 1sec

$$p = 30000 * 9.81 = 294.3 \text{ kN}$$

$$F = 30000 * 8 = 240 \text{ kN}$$

$$240 + 294,3 = \mathbf{534.3 \text{ kN}}$$

Calcul masse totale support + lanceur :

Support en l'état actuel : $\sim 3000 \times 4 = 16\,000 \text{ kg}$

Themis : $\sim 25\,000 \text{ kg}$

Total : $\sim 41 \text{ tonnes}$

poids câble : on sait que un câble de 50mm $\varnothing = \sim 9\text{kg/m}$, on peut, de façon très rudimentaire estimer qu'un câble de 100mm \varnothing a une masse de 18kg/m

on estime la longueur d'un câble à 15m : $18 * 15 = 270\text{kg}$ par câble

on a 4 câble : $270 \times 4 = 1080 \text{ kg}$

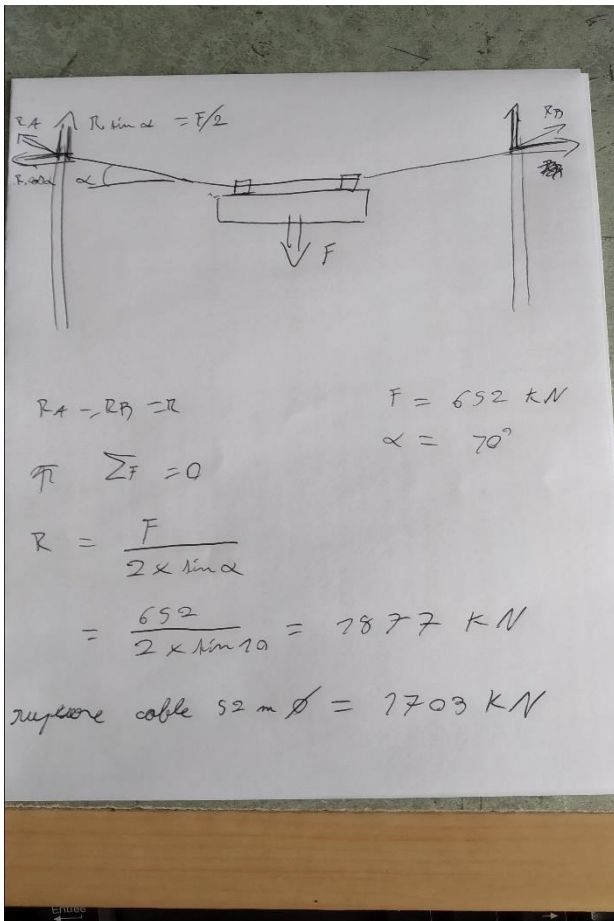
Total avec câble = 42 080 kg

Calcul effort max câbles :

$$P = M \times G = 42\,080 \times 9.81 = 412,804 \text{ kN}$$

$$F = 240 \text{ kN}$$

$$\text{effort agissant perpendiculairement au sol} = P + F = 412.804 + 240 = 652.804 \text{ KN}$$



source : <https://www.ecam.fr/materiaux-structures/03-cable-suspendu/#nogo>

<http://www.pms-ind.com/img/pdf/pms-levage-cable.pdf>

$$R_A = R_B = R$$

$$F = 652 \text{ kN}$$

$$\sum F = 0$$

$$\alpha = 70^\circ$$

$$R = \frac{F}{2 \times \sin \alpha}$$

$$= \frac{652}{2 \times \sin 70} = 7877 \text{ kN}$$

$$\text{rupture cable } 52 \text{ m } \varnothing = 7703 \text{ kN}$$

