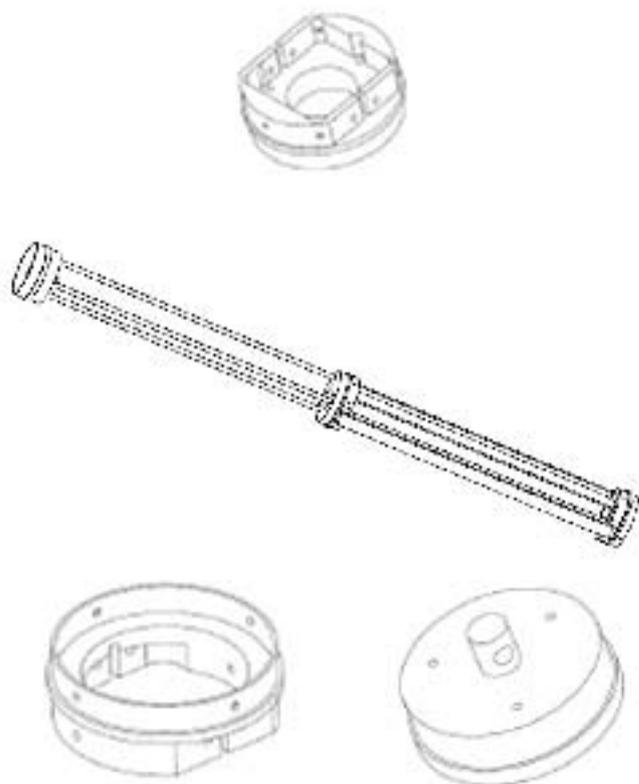


# Dossier de cloture



## ZÉBULON



# Remerciements

Construire une fusée expérimentale est une chose difficile, surtout pour une équipe inexpérimentée comme la notre. Nous n'aurions pu réussir sans le concours d'un nombre impressionnant de personnes que nous tenons toutes à remercier ici.

## **A l'Ecole Centrale de Lyon :**

Merci à **Gérard Thomas**, le tuteur de notre projet, le premier à nous avoir fait confiance. Il a su poser les choses au début lorsqu'on partait dans tous les sens, puis nous laisser suffisamment libre pour qu'on mène les choses par nous même.

Merci aux enseignants de technologie mécanique, en particulier M. **Damien Constant** pour nous avoir permis d'utiliser leurs ordinateurs et nous avoir appris les rudiments de Catia. Immense merci également à M. **Gonin** et ses collègues qui travaillent au bâtiment H9. L'usinage de ses pièces était impeccable, et en plus le travail a été particulièrement rapide. Il a également su nous aider pour le montage et à procéder aux tests sur la structure mécanique. N'oublions pas non plus madame **Michelle Salvia** qui a pu nous fournir la fibre de carbone et ses conseils pour la réalisation de notre coque. Une aide matérielle inespérée. D'une manière générale, merci à tous ceux qui ont fait avancer l'électronique. N'ayant pas touché aux circuits imprimés, je n'ai pas les noms, je compléterai la liste sitôt qu'elle me sera fournie par la partie électronique du club. Aux membres qui nous ont aidé pendant l'année (**Brie, Sec, Julien, Palmito...**)

## **Au CLES-FACIL :**

Que dire sur eux? Tout au long de l'année, ils nous ont dépannés quand nous sentions les problèmes arriver, avec une grande gentillesse. En particulier leur président, **Spas Balinov**, qui a pris le temps de nous aider quand nous le demandions.

Merci!

## **A la Courtine :**

Le départ pour la Courtine annonçait une semaine difficile. Fusée loin (mais alors très loin) d'être prête, manque de matériel, des problèmes qu'on n'arrivait pas à résoudre. Le départ s'est fait de bonne heure et dans la bonne humeur avec le CLES FACIL, pour enchaîner avec 4 jours de travail intense. Il est impressionnant de voir que presque tous les bénévoles de Planète-Sciences présent nous ont donné un coup de main. Parmi eux certains ont été vraiment disponibles pour nous. **Laurent Regnault** tout d'abord. Ancien centralien de Lyon et membre du CLC, il a été présent toute la semaine pour nous aider et nous conseiller. Il est devenu membre de l'équipe, tout le CLC se réjouit de cette rencontre ! **Badr Rmili**, qui a réussi l'exploit de faire fonctionner notre minuterie et d'être resté une nuit jusqu'à 8h pour nous aider à boucler l'intégration des delts et interrupteurs. On te doit également plus que des mercis mais des éloges pour tout le travail que tu as fait avec nous !

Le hasard faisait bien les choses, juste au moment où nous étions en train de travailler (et de galérer) sur le système de transmission des données par le Kiwi Millénum (de l'entreprise Tenum), voilà qu'on nous présente les pères créateurs de ce dispositif: **Gonzagues Bosch** (j'espère ne pas écorcher ton prénom) et **Stéphane Villeneuve**. Ils ont non seulement largement aidé à faire fonctionner le système de transmission de la fusée, mais en plus ils ont pris le temps de tout nous expliquer, avec une bonne humeur qui a redonné le moral à l'équipe. Merci ! Merci aussi à **Mulder (Ouin Ouin ?)**, qui si son plan de masse s'est révélé inutile, a fait preuve d'une telle bonne humeur et énergie que l'équipe s'est remis à y croire alors que tout semblait perdu depuis trop longtemps. Bonne chance pour la Chine, nous ne doutons pas que tu ne mérites amplement ton prix ! Merci aussi aux deux contrôleurs **Jean-Jacques** et **Paul** qui m'ont donné les bons conseils pour améliorer le système d'ouverture de la porte de la case parachute. Merci à **Ludo**, pour le temps passé sur la minuterie (que le moteur a fait cramer ensuite) et le retour en voiture. Merci aussi à nouveau au **CLES-FACIL**. Ils ont plus que contribué à la réussite du projet, d'une part par le prêt et le don de matériel (et pas qu'un peu!) et pour leur soutien. En particulier Spas et Ignasi (merci pour le coup de main et le café!). Nous sommes vraiment contents de la réussite totale de votre projet et du prix que vous avez obtenu ! Bravo ! Il nous faut également penser à tous les clubs qui nous ont gentiment prêté leur matériel : le **STS**, l'**AEROIPSA**, l'**ESO**, le projet **PERSEUS**, et à nouveau le **CLES-FACIL** (on n'en parlera jamais assez!). Merci également aux pyrotechniciens, **Thierry Stillace** en particulier, pour nous avoir fait déstresser sur l'aire de lancement, et **Mathieu**, de l'**EFREI**, pour d'une part avoir passé du temps sur notre minuterie maudite et nous avoir guidé pour le lancement de la fusée. Enfin, pour conclure, merci à toute l'équipe de Planète-Sciences ! Une magnifique organisation, toujours avec le sourire.

Avant de commencer, je n'aurais jamais pensé que la communauté du secteur Espace de Planète-Sciences ait pu être aussi sympa et disponible! En particulier **Nicolas** pour ses encouragements et **Antoine** pour nous avoir montré que même les clubs débutants peuvent donner leur avis. Bien sûr j'en oublie tant il y a de monde à citer, mais de manière générale, merci à tous ceux qui d'une façon ou d'une autre ont posé leur pierre à l'édifice.

Pour conclure, s'il y a bien une chose à retenir, c'est que si vous voulez vous éclater, lancez des fusées! Nous avons fait un nombre colossal de rencontres en l'espace de 4 jours, et pas une qui ne fut désagréable. Une communauté qui s'entraide à chaque instant!

Merci à tous

<b>1</b>	<b><i>Présentation du projet</i></b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b><i>Présentation de la fusée</i></b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Système mécanique</b>	<b>5</b>
2.1.1	Structure interne	5
2.1.1.1	Structure générale	5
2.1.1.2	Barres	6
2.1.1.3	Bagues	7
2.1.1.4	Réalisation	10
2.1.2	Structure externe	11
2.1.3	Stabilité de la fusée	12
<b>2.2</b>	<b>Système de récupération</b>	<b>13</b>
2.2.1	Principe du système	13
2.2.2	Dimensionnement du parachute	15
2.2.2.1	Forme du parachute	16
2.2.2.2	Matériaux	17
2.2.2.3	Renforts aux coins	17
2.2.2.4	Choix de la corde	17
2.2.2.5	Système anti-torche	18
2.2.2.6	Coutures	19
<b>2.3</b>	<b>Electronique</b>	<b>20</b>
2.3.1	Minuterie	20
2.3.2	Carte « expérience »	20
2.3.3	Télémesure	21
<b>3</b>	<b><i>Expérience et résultats</i></b>	<b>23</b>
<b>3.1</b>	<b>Principe de l'expérience</b>	<b>23</b>
<b>3.2</b>	<b>Protocole expérimental</b>	<b>23</b>
<b>3.3</b>	<b>Résultats obtenus</b>	<b>24</b>
<b>4</b>	<b><i>Analyse des sources de dysfonctionnement</i></b>	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>Erreurs d'origine électronique</b>	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>Problèmes de rigidité</b>	<b>26</b>
<b>5</b>	<b><i>Retour d'expérience</i></b>	<b>26</b>

# 1 Présentation du projet

L'équipe du projet Zébulon a réouvert le CLC (club fusée de l'Ecole Centrale de Lyon) après 5 ans sans activité. Le projet Zébulon est une première expérience de fusée expérimentale pour les membres du club. Il a pour but de mesurer, avec une jauge de contrainte, les vibrations de la structure interne de la fusée.

L'équipe est constituée d'élèves en première année de l'Ecole Centrale de Lyon : Aurélie FEDELE, Cyrille CERUTTI, Thomas CHEREAU, Sébastien MASCLLET, Alexandre PHI

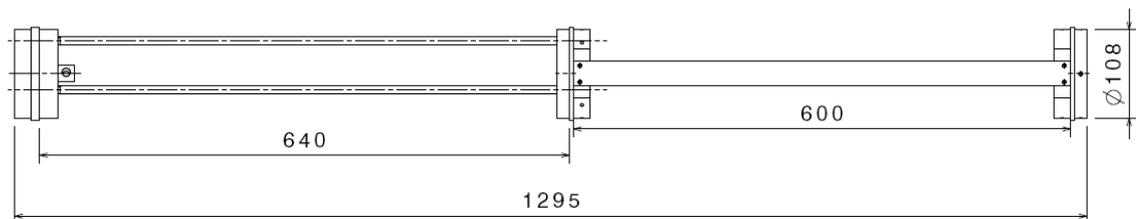
## 2 Présentation de la fusée

### 2.1 Système mécanique

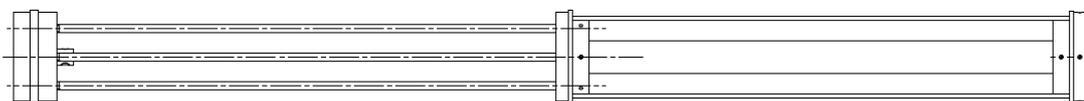
#### 2.1.1 Structure interne

##### 2.1.1.1 Structure générale

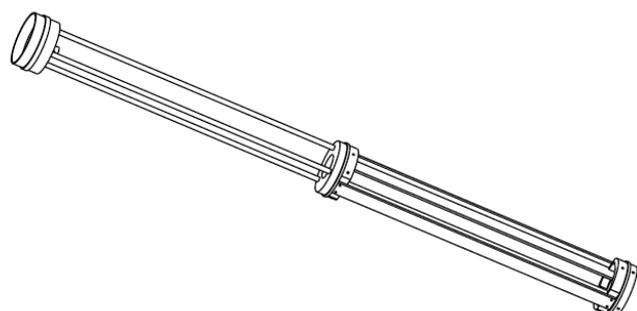
Nous avons conçu et dimensionné cette structure dans le respect du cahier des charges afin de lui assurer une rigidité suffisante aux contraintes de flèche à l'aide du logiciel de CAO Catia :



Vue de face  
Echelle : 1:5



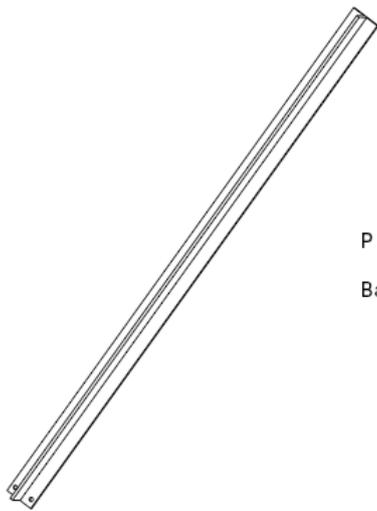
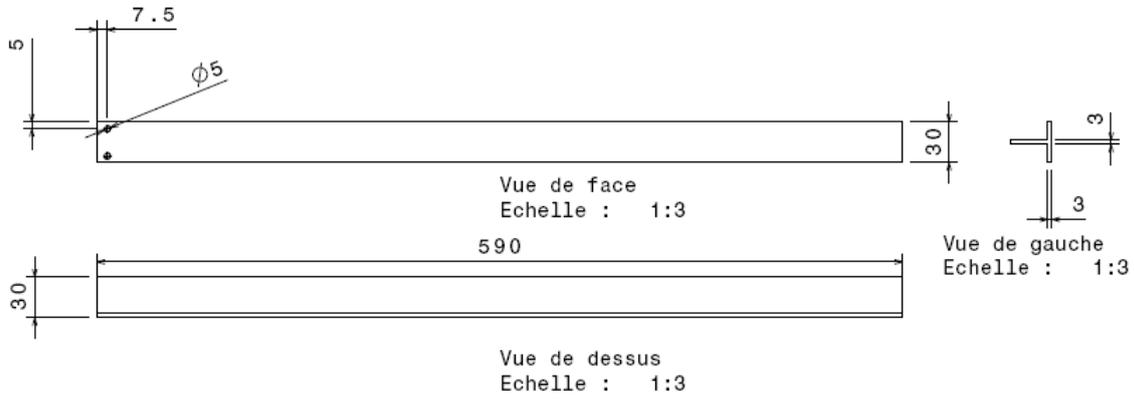
Vue de dessus  
Echelle : 1:5



Vue isométrique  
Echelle : 1:8

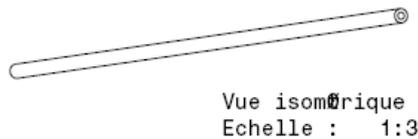
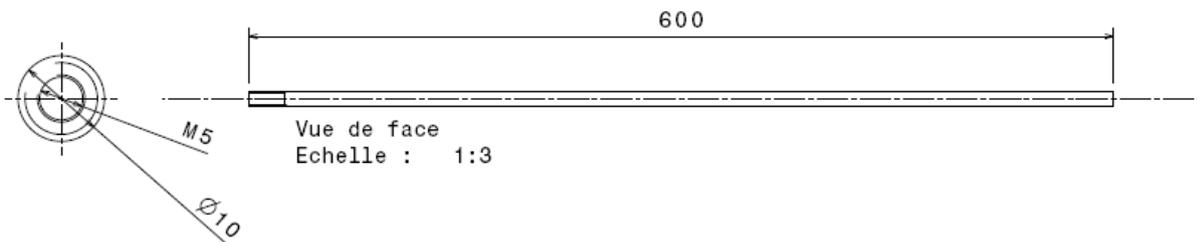
### 2.1.1.2 Barres

Pour la case parachute, nous avons préféré l'emploi de tiges cylindriques auquel le parachute ne peut s'accrocher au moment où il se déplie. Pour les barres de la case expérience, nous avons choisi un profil en T afin que la case puisse accueillir l'électronique nécessaire à l'expérience et recueillir les vibrations en vol.



P.E. 102: Réalisation d'une fusée expérimentale  
Barre en T en aluminium

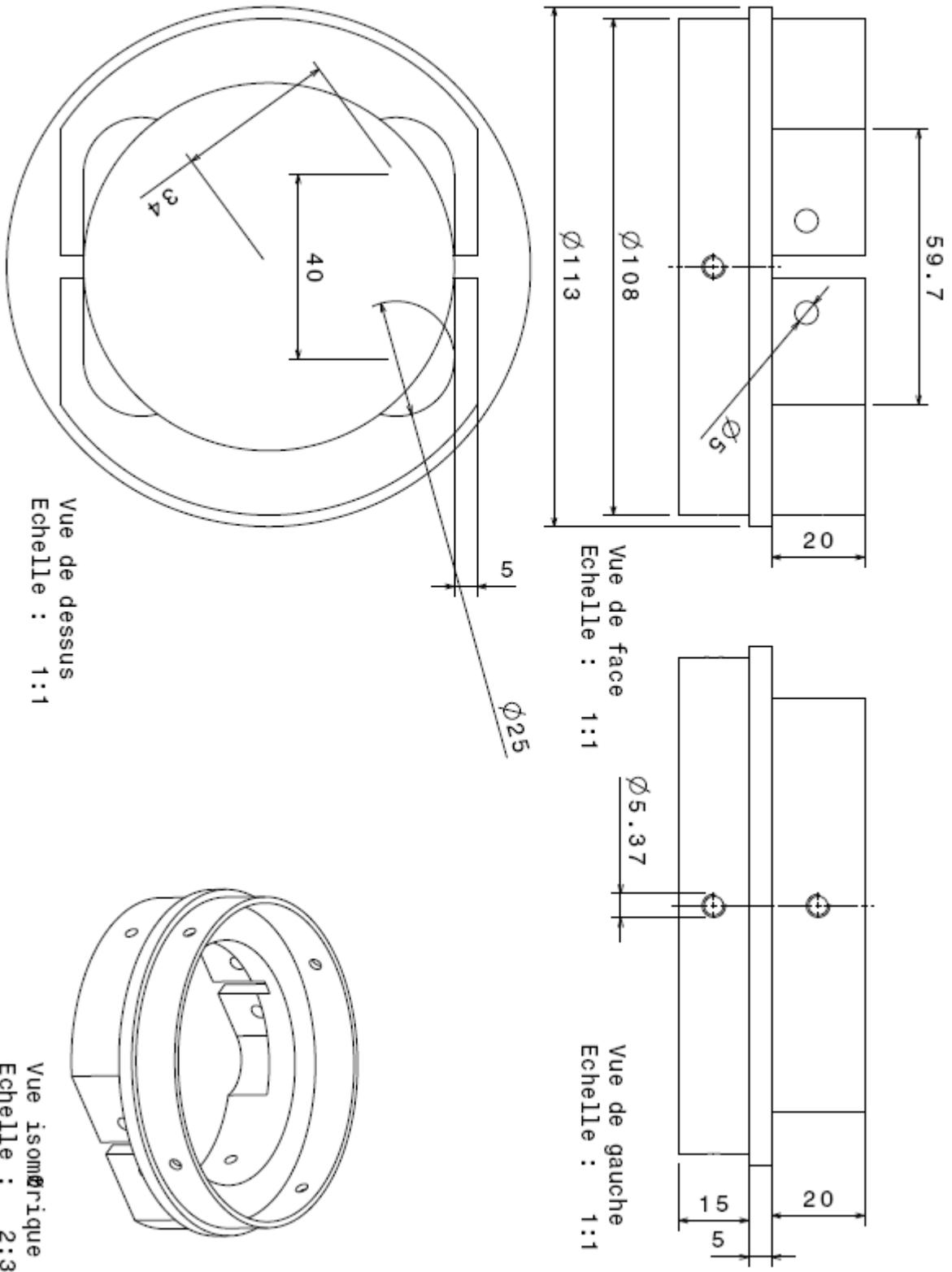
Vue isométrique  
Echelle : 1:4



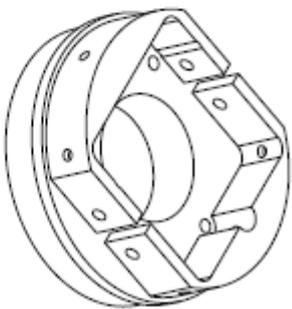
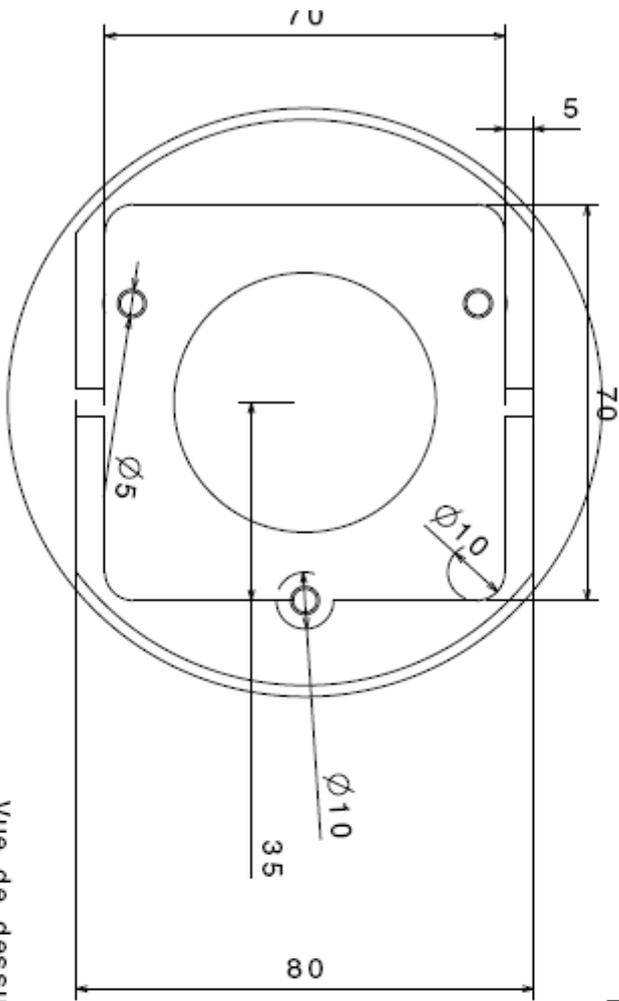
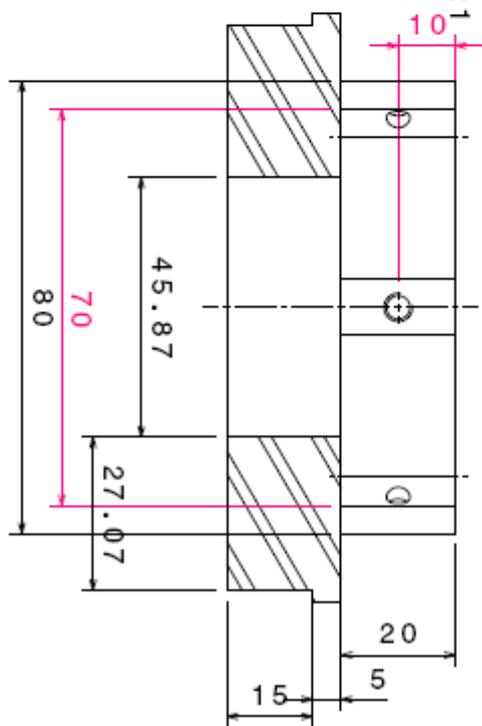
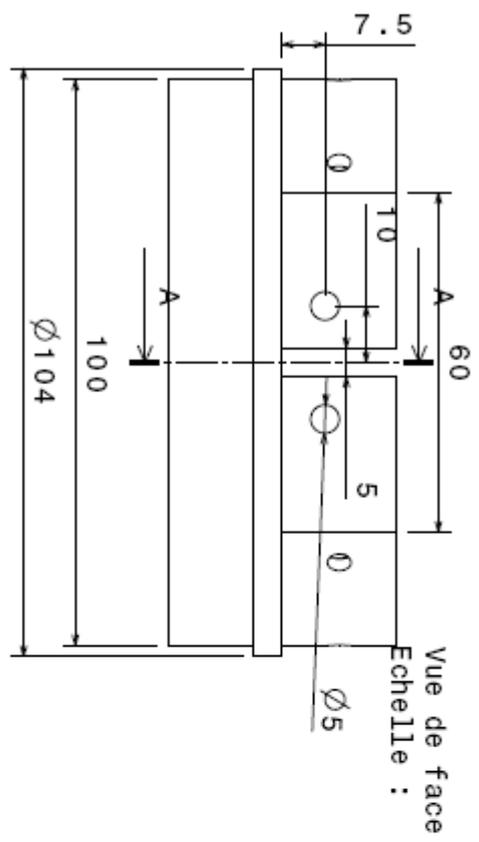
P.E. 102: Réalisation d'une fusée expérimentale

Barres (cylindriques et en T)

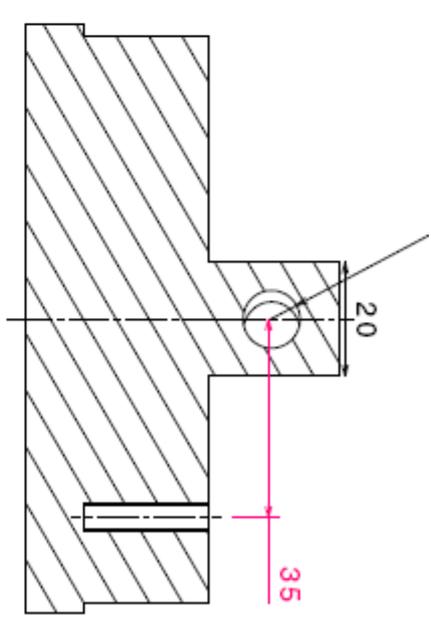
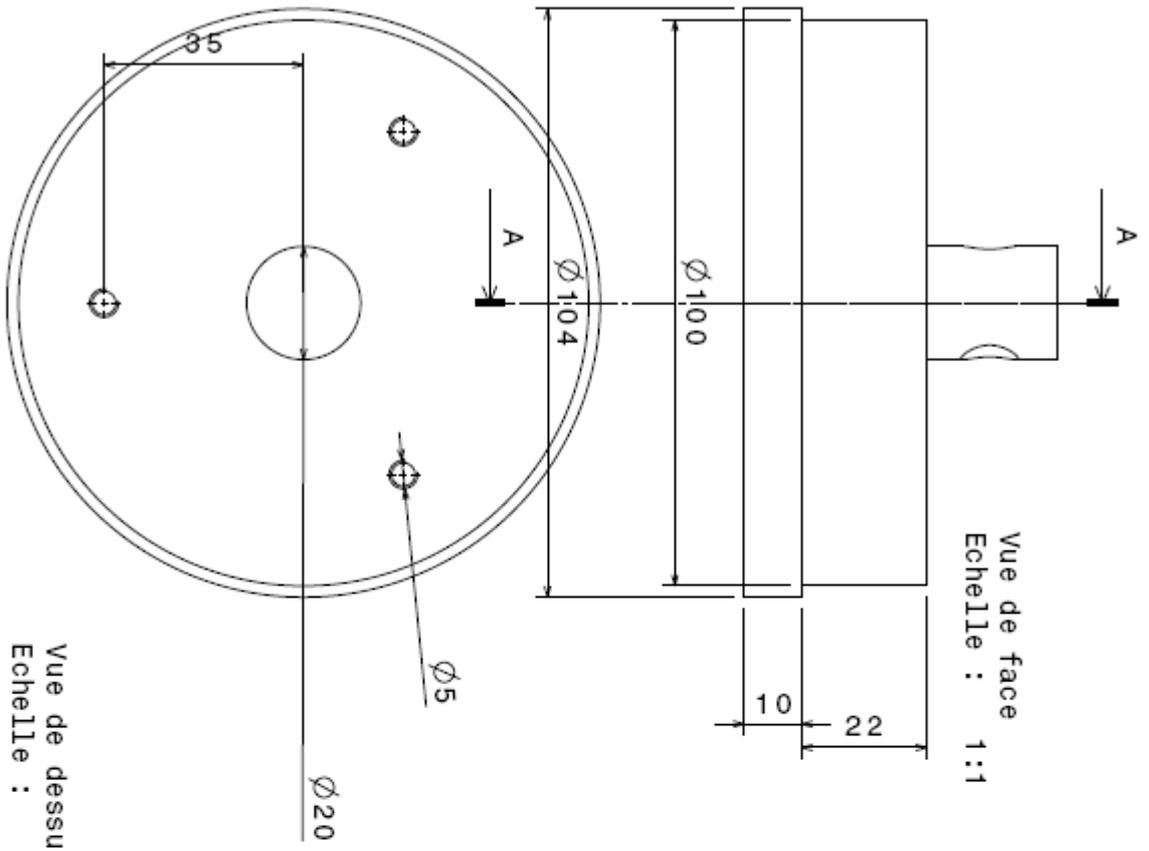
### 2.1.1.3 Bagues



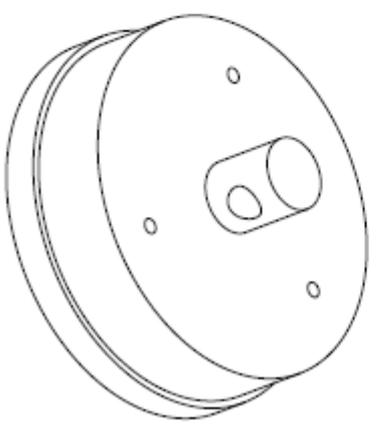
Bague cône



Bague parachute



Vue de dessus  
Echelle : 1:1



Bague propulseur

#### 2.1.1.4 Réalisation

Pour la réalisation des barres cylindriques et en T, nous sommes partis de bruts de duralumin, coupés et percés sur machines à commande manuelle.

Pour la réalisation de bagues, nous avons fait l'acquisition de bruts cylindriques de diamètre 120x50mm de haut. Ces bagues ont ensuite été percées, fraisées, tournées, et taraudées sur machine outils à commande manuelle.



## 2.1.2 Structure externe

La coque de la fusée n'est pas porteuse. Cette fonction étant assurée par la structure interne (bagues et barres). Cependant la coque permet d'améliorer certains paramètres imposés par le cahier des charges. Par exemple la flèche doit être inférieure à 1% et chaque élément de la fusée doit pouvoir supporter une compression équivalente à  $F = 2 * \text{accélération} * \text{masse de la partie supérieure}$ .

Enfin le propulseur dont on dispose limite la masse totale de la fusée à 8kg. Il faut donc que la coque n'augmente pas trop la masse de la fusée.

Nous avons envisagé deux solutions pour la coque de la fusée :

- Tube en PVC consistant en un simple tube de tuyauterie
- Matériau composite comme la fibre de verre ou de carbone

	PVC	Composite
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Peu cher</li> <li>➤ Pas de problème de moulage. En effet le tube est déjà tout prêt à être assemblé.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Léger</li> <li>➤ Résistant</li> <li>➤ Possibilité de donner de nombreuses propriétés suivant les besoins</li> </ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Pas de tenue importante à la chaleur. Cela est un problème non négligeable pour la partie de coque située en bas de la fusée où la montée en température sera importante lors de la phase de propulsion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Difficulté de mise en œuvre liée à la nécessité de moulage</li> <li>➤ Matériau cher</li> </ul>

Nous avons trouvé une personne qui a bien voulu nous fournir de la fibre de carbone. Nous avons donc fabriqué la peau de la fusée en fibre de carbone préimprégnée bidirectionnelle.

La fibre doit être portée à 120°C afin de polymériser. Il faut donc trouver une matrice qui résiste à 120°C.

Dans un souci d'économie et de simplicité nous avons tout d'abord opté pour un tuyau en PVC vendu dans les magasins de bricolage. Les premiers tests sur de courts tronçons de tuyau semblaient montrer que le PVC résiste à une température de 120°C pendant plus d'une heure. Nous avons donc décidé de faire un premier essai de moulage. Il est nécessaire de mettre un intermédiaire entre la matrice et la fibre de carbone.

Dans le cas contraire lors du passage en étuve la résine va coller à la matrice et on ne pourra pas démouler. Pour faciliter encore le démoulage on utilise du démoulant.

Lors du premier essai le tube de PVC s'est déformé sous son propre poids. Le PVC s'avère donc ne pas être assez résistant à 120°C pour l'utilisation voulue. Par conséquent nous avons changé de matrice pour un tube en dural de diamètre 100 mm.

Nous avons finalement choisi de fabriquer la coque avec deux couches de fibre de carbone. La première couche aide à améliorer la flèche c'est pourquoi nous avons décidé de placer les fibres à 0°-90°. La deuxième couche limite la torsion de la fusée. Pour cela nous plaçons les fibres à ±45°. Enfin pour améliorer la surface de la coque nous avons fait en sorte de ne pas superposer les joints des deux couches.

### 2.1.3 Stabilité de la fusée

La stabilité de la fusée est assurée par les ailerons. Ceux-ci sont dimensionnés avec Trajec.

```

C:\DOCUME~1\ADMINI~1\MESDOC~1\ec\PEVTRAJEC~1.EXE
F1 : Trajectoire  F2 : Stabilité  F3 : Fichiers  F4 : Moteurs  F5 : Vent
FUSEE: ZEBULON  CLUB: CLC  MOTEUR: isard_U95  PAS: 10 %
biétage : NON
virole: OUI  Xcg: 50  masse: 1.000
prop: 1460  te=200
<←273 → D  Xcg vide: 860 → Xcg: 1205 →  masse: 7.000 kg
100  avec moteur et virole
L=1500  ←m=100 →
coiffe: ogivale  p= 40 → ←n= 90 →
jupe/rétréint : NON  épaisseur ailerons : 2.0
sortir du programme
déplacements: ←↑↓→ valid.: RETURN variations: +- nombre d'ailerons : 4
Produit Ms x Cn : inutilisé
nom de la fusée
Cn=24.9 ||Xcp:1429 ||marge statique: de 2.2 à 2.7  cotes en mm
  
```

Nos ailerons ont été recoupés lors de la campagne de lancement afin que l'on puisse utiliser la rampe de lancement Obélix et désengorger ainsi la rampe Menhir. Cela diminue notre coefficient de portance et notre marge statique rendant ainsi la fusée moins stable.

Cependant nous avons élevé notre centre de gravité ce qui nous a redonné une fusée dont le coefficient de portance et la marge statique correspondent aux valeurs imposées par le cahier des charges.

## 2.2 Système de récupération

### 2.2.1 Principe du système

Parmi les différentes contraintes imposées par le cahier des charges, une des plus importantes concerne le système de récupération. En effet, nous devons concevoir une méthode pour récupérer la fusée une fois qu'elle a été lancée. Selon les propriétés mécaniques de la fusée (taille, poids, ...) Trajec détermine la trajectoire que va prendre la fusée et plus particulièrement le temps qu'il lui faut pour atteindre le point de culmination. C'est à ce moment là que le parachute doit sortir de la fusée et s'ouvrir. A partir de ces données, nous avons concevoir un mécanisme permettant de déclencher l'ouverture du parachute au point de culmination. Pour commander l'ouverture de la case parachute nous avons le choix entre deux méthodes principales : un système complètement mécanique ou un minuteur électronique. Nous avons choisi d'utiliser un minuteur électronique car ce système semble plus fiable et simple à réaliser qu'un détecteur mécanique de culmination.

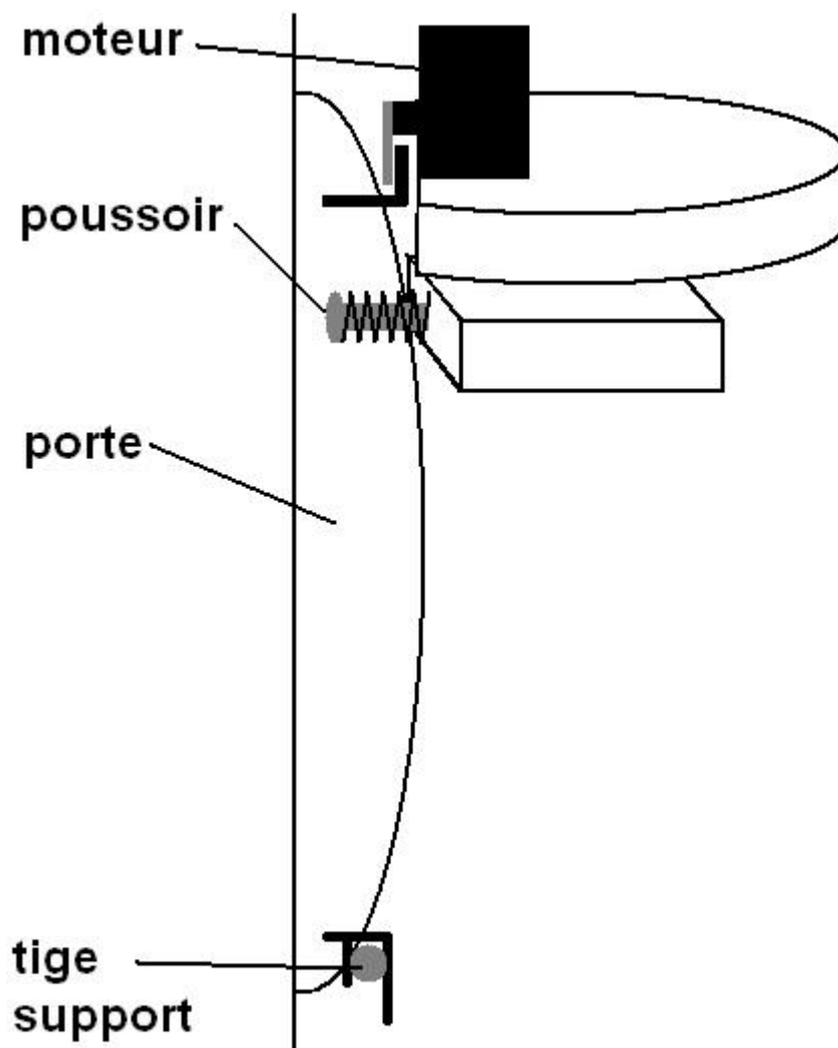
La porte doit respecter deux normes :

- Elle doit rester fermée pendant la phase d'ascension
- Elle doit s'ouvrir à culmination, sans se séparer du reste de la fusée

Pour la fermeture, nous avons opté pour l'utilisation d'un moteur à courant continu qui s'actionne à culmination, pour libérer la porte.

#### 2.2.1.1 Principe général

Voici le schéma du montage final, qui sera commenté en dessous de celui-ci.



Lorsque la porte est fermée, la disposition est la suivante :

- Le taquet lié à la partie supérieure de la porte et en face du disque, pour empêcher son ouverture par le dessus.
- Le poussoir est comprimé par la porte.
- La partie inférieure de la porte est maintenue par la pièce en forme de U qui s'insère dans une tige transversale, fixées dans la coque.

Un disque non complet est fixé sur le moteur. Le disque permet d'avoir les deux modes de fonctionnement :



En position 1, le disque bloque un taquet un forme de L fixé à la porte. Dans cette position, la porte est fermée. Une fois que la minuterie commande l'actionnement du moteur, le disque pivote et passe en position 2. Dans cette position, le taquet est libéré, la porte doit pouvoir s'ouvrir. Le poussoir qui était comprimé décale la porte, de manière à empêcher la configuration fermée de se reproduire de manière périodique. Lorsque la fusée est en phase descendante, de l'air s'engouffre dans l'espace crée par l'action du poussoir, ce qui permet à la porte de s'arracher du reste de la case parachute. Ensuite, comme la partie inférieure n'est maintenue que par une liaison pivot incomplète, lorsque la porte s'ouvre par le haut, le bas de la porte sort de la tige du bas : la porte s'est complètement désolidarisée du reste de la case parachute.

Au milieu de la porte est fixé un câble qui est relié au parachute à l'autre extrémité. Ce câble fait double usage :

- La porte reste fixée à une partie de la fusée (le parachute)
- La force de l'air qui va freiner la porte qui se détache permettra au parachute de sortir de son logement

### **2.2.1.2 Données techniques**

Le choix du moteur devait répondre à plusieurs contraintes. Tout d'abord, la force exercée par le taquet de la partie haute de la porte sur le disque n'est pas quantifiable. Elle peut être relativement faible, comme elle peut être importante si le vent aspire la porte vers l'extérieur. Nous devons donc choisir un moteur qui présentait un couple élevé, de manière à vaincre les forces de frottement qui sont susceptibles de bloquer le disque en rotation, et donc de maintenir la porte en position fermée malgré l'ordre d'ouverture.

Ensuite, la rotation du disque devait être assez rapide, au maximum de l'ordre de la seconde. En effet, avec une réduction trop importante, la rotation deviendrait trop lente, ce qui poserait des problèmes pour le calcul du temps d'ouverture de la porte.

Aussi nous avons du faire un compromis entre le couple et la vitesse de rotation du moteur. De plus, l'alimentation de ce moteur est assurée uniquement par des piles, dont le nombre doit être le plus petit possible pour des problèmes de place et de poids. Nous avons donc pris un moteur muni d'un réducteur et alimenté par une pile de 9V pour l'ouverture de la porte.

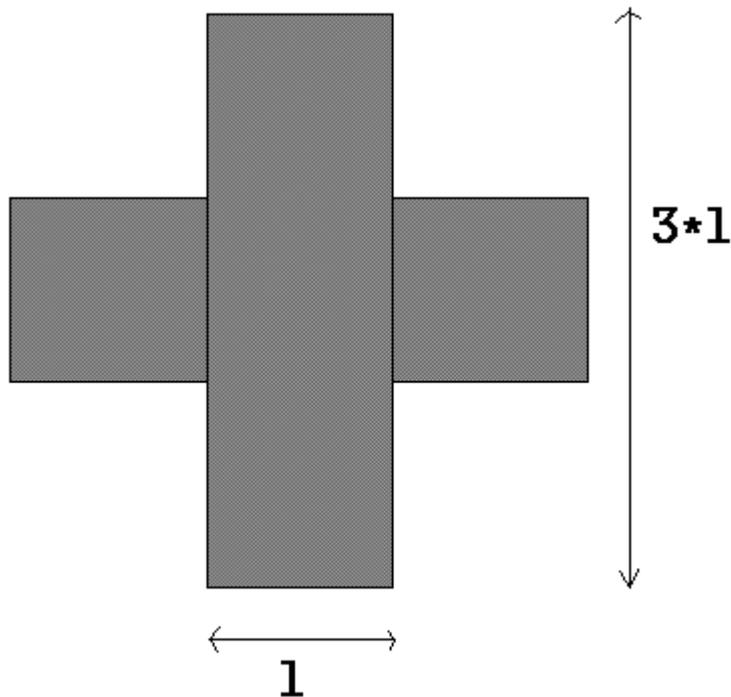
## **2.2.2 Dimensionnement du parachute**

Pour le système de récupération de la fusée, nous avons opté pour le système le plus commun et le plus simple à mettre en place : le parachute. Diverses méthodes existent, et nous avons retenu le parachute car c'est le principe le moins technique et le plus économique à réaliser.

### 2.2.2.1 Forme du parachute

Dans le domaine des parachutes, il est possible d'imaginer de donner à la toile des formes plus ou moins complexes. Devant les solutions proposées, et compte tenu des contraintes de temps et de budget, nous avons choisi une solution classique : **le parachute cruciforme**.

Pour notre parachute, nous avons choisi un modèle avec 2 bandes rectangulaires croisées. Cette solution présente l'avantage d'être la plus simple à concevoir, tout en étant la plus économique.



L'une des premières questions suite au choix de cette forme est le calcul des longueurs. Le plus simple est de faire une bande de largeur  $l$  et de longueur  $3 \cdot l$ . La surface du parachute vaut  $5 \cdot l^2$ . Pour le calcul de  $l$ , nous avons utilisé le cahier des charges.

La surface  $S$  vaut  $S = 2 \cdot G \cdot M / (R \cdot C_x \cdot V_d^2)$  avec

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$M$  : masse de la fusée en Kg

$R$  : densité de l'air (1,3 g/L)

$C_x$  : coefficient aérodynamique du parachute

$V_d$  : vitesse de descente de la fusée

Pour  $C_x$ , nous avons pris  $C_x=1$ , comme dans le cas d'une surface plane.  
Pour  $V_d$ , l'ordre de grandeur préconisé par le cahier des charges est de 10 à 15 m/s.  
Nous avons estimé à 7 kg le poids de la fusée.

On trouve donc  $S=1.48 \text{ m}^2$ .  
Ainsi, nous obtenons  $l=54 \text{ cm}$ .

### 2.2.2.2 Matériaux

Pour la matière qui constitue le parachute, il faut tenir compte de plusieurs contraintes. La toile doit d'une part être bien imperméable à l'air, et d'autre part être suffisamment résistante pour ne pas se déchirer lors du déploiement du parachute. Enfin, comme pour tout le choix de tous les autres matériaux, la toile doit être légère, afin que la fusée reste sous la limite de poids maximal. Nous avons fait faire le parachute par le magasin « le cri du kangourou » en toile de spi, matière utilisée pour les toiles de cerf-volant et les parachutes.

### 2.2.2.3 Renforts aux coins

Pour assurer une meilleure résistance lors de l'ouverture, il est nécessaire de renforcer chacun des coins du parachute pour éviter un déchirement. Pour cela, c'est avec les conseils du spécialiste en cerf-volant du Cri du Kangourou que nous avons fait notre choix.

D'une part, un triangle est cousu sur chaque coin, découpé dans un matériau en plastique souple. Ainsi, on augmente la résistance au niveau de la fixation des sangles sans pour autant trop rigidifier le parachute, ce qui lui permet de se déployer facilement.

### 2.2.2.4 Choix de la corde

Le choix de la corde nécessite une connaissance des forces à l'ouverture du parachute. Pour cela, d'après le cahier des charges, nous avons utilisé la formule.

$$F = R.S.C_x.V_0^2 / 2$$

Les notations sont les mêmes que précédemment, et  $V_0$  désigne la vitesse du parachute à l'ouverture. Nous avons pris une vitesse de 50 m/s, qui correspond à une ouverture assez proche du point culminant (on considère que l'ouverture ne se fera pas beaucoup trop tard ni beaucoup trop tôt).

Après calculs,  $F=2250\text{N}$  environ, que nous arrondirons à 2500N.

- Pour les suspentes

Cela se répartit sur 8 suspente, donc chaque suspente doit pouvoir supporter une force qui vaut  $F/8=312N$ . Une corde doit donc pouvoir tracteur une masse de 35 kg environ.

Nous avons gardé une marge de sécurité, en ne prenant en compte que la moitié des suspentes dans ce calcul. De la sorte, on garde un coefficient de sécurité de 2 qui permet de gommer les approximations faites lors des estimations des données inconnues. Chaque corde doit donc pouvoir tracter 70 kg. En raison d'accès fournisseurs, nous avons pris de la corde d'alpinisme qui tient jusqu'à 500 kg en traction.

- Pour la corde reliée à la case parachute

La corde qui est liée d'une part à la bague du propulseur et de l'autre aux 8 suspentes doit pouvoir supporter seule une traction de 250 kg, d'après les calculs, que l'on peut passer à 500 kg en prenant un coefficient de sécurité de 2. La corde qui a été retenue pouvait tenir 1T en traction.

#### 2.2.2.5 Système anti-torche

Dans la réalisation des parachutes, l'un des aspects important est celui de son bon déploiement.

L'ouverture se fait lors de l'arrachement de la porte. En revanche, il est possible que les câbles s'emmêlent, ou que le parachute « parte en torche », et ne reste pas bien ouvert lors de la descente.

Le phénomène de torche se produit lorsque le parachute s'ouvre alors que la fusée tourne en dessous. Il y a risque d'une ouverture en vrille, et dans ce cas, la surface utile au freinage chute considérablement. Pour éviter la torche, nous avons placé un émerillon au niveau des câbles. Il s'agit de deux anneaux qui sont en liaison pivot l'un par rapport à l'autre.



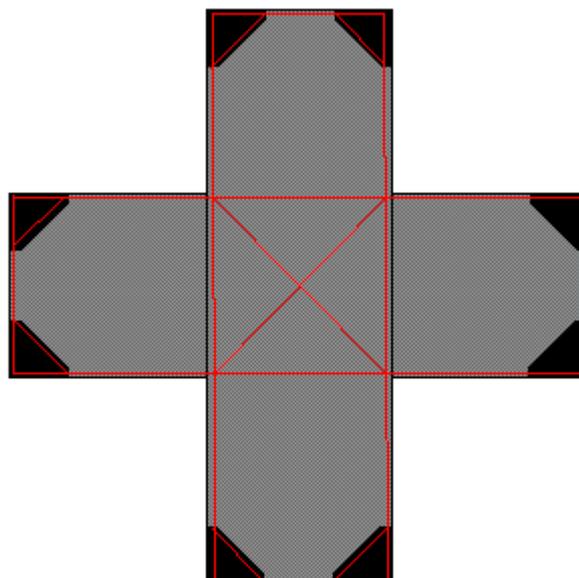
Emerillon

D'une part les 8 suspentes du parachute sont fixées à l'un des anneaux, tandis qu'une corde qui peut soutenir trois tonnes est fixé d'un bout à l'autre anneau, de l'autre bout à un mousqueton arrimé à la fusée. Si le parachute se met à tourner, la liaison pivot permet la rotation et évite au parachute de se replier sur lui même. Nous avons pris un modèle tout à fait standard et peu onéreux, que l'on peut acheter dans des magasins de bricolage.

### 2.2.2.6 Coutures

Les coutures sont l'un des éléments qui assurent la solidité du parachute. Nous formons un ourlet sur tous les bords et à l'intérieur de l'ourlet nous plaçons une fine corde. De la sorte, on limite les risques de déchirement, et si cela devait avoir lieu, on conserve une certaine unité du parachute (on évite que le fait qu'une qui suspente lâche entraîne une réaction en chaîne et conduise à l'arrachage du parachute).

Voici le schéma des coutures et des renforts du parachute :



## 2.3 Electronique

### 2.3.1 Minuterie

Quand le jack est enlevé, le condensateur se charge. Au bout d'un temps  $t$ , réglé grâce au potentiomètre, l'AOP monté en comparateur bascule. Le moteur est alors alimenté.

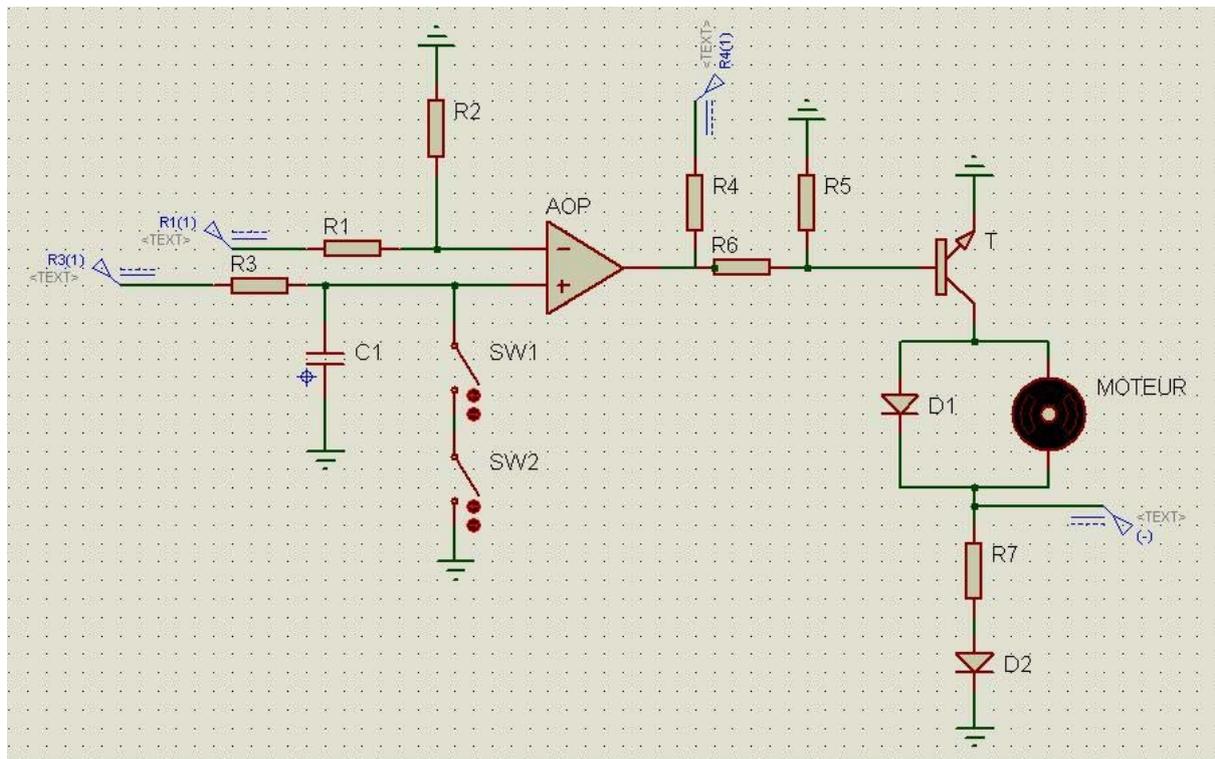
On choisit  $R1=R2$ , on bascule alors à  $t=R3*C1*\ln(2)$

L'interrupteur SW2 correspond à un interrupteur de mise en marche de la minuterie.

L'interrupteur SW1 représente le jack qui est enlevé au décollage de la fusée.

La diode D2 est la diode de contrôle de la mise en marche de la minuterie demandée dans le cahier des charges.

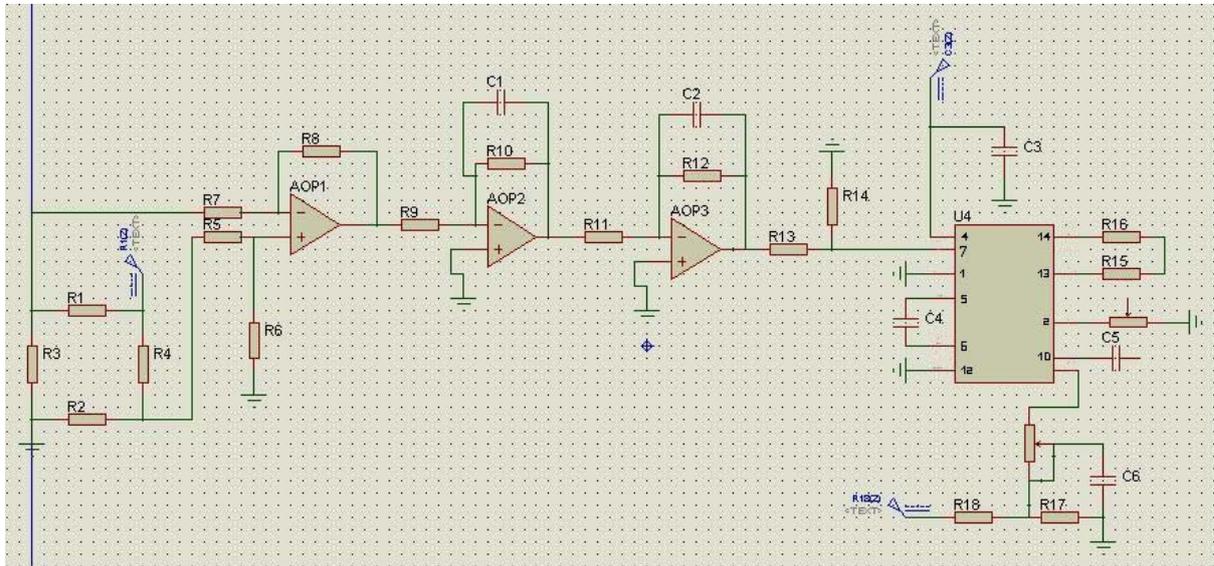
L'AOP et le moteur sont alimentés en 0-9V.



### 2.3.2 Carte « expérience »

La jauge de contrainte est placée dans un pont de Wheatstone. Les variations de résistance de la jauge (induites par les déformations de la structure sur laquelle est placée la jauge) correspondent à une variation de la tension entre les points du pont qui ne servent pas à l'alimentation de celui-ci. C'est cette variation qui servira de signal pour l'émetteur.

La tension mesurée dans le pont de Wheatstone n'est pas mesurée par rapport à la masse, il faut donc placer un amplificateur différentiel en sortie du pont avant d'amplifier le signal.



Il faut alimenter les AOP en -9V +9V et le XR2206 en 0V 12V. Pour obtenir les 12V on utilise un régulateur de tension alimenté avec 18V. L'alimentation est réalisée avec trois piles 9V.

### 2.3.3 Télémessure

En sortie de la carte expérience, nous obtenons un signal analogique qu'on ne peut pas envoyer directement sur les borniers de mesure du Kiwi car les fréquences des vibrations que nous devons mesurer théoriquement étaient trop élevées.

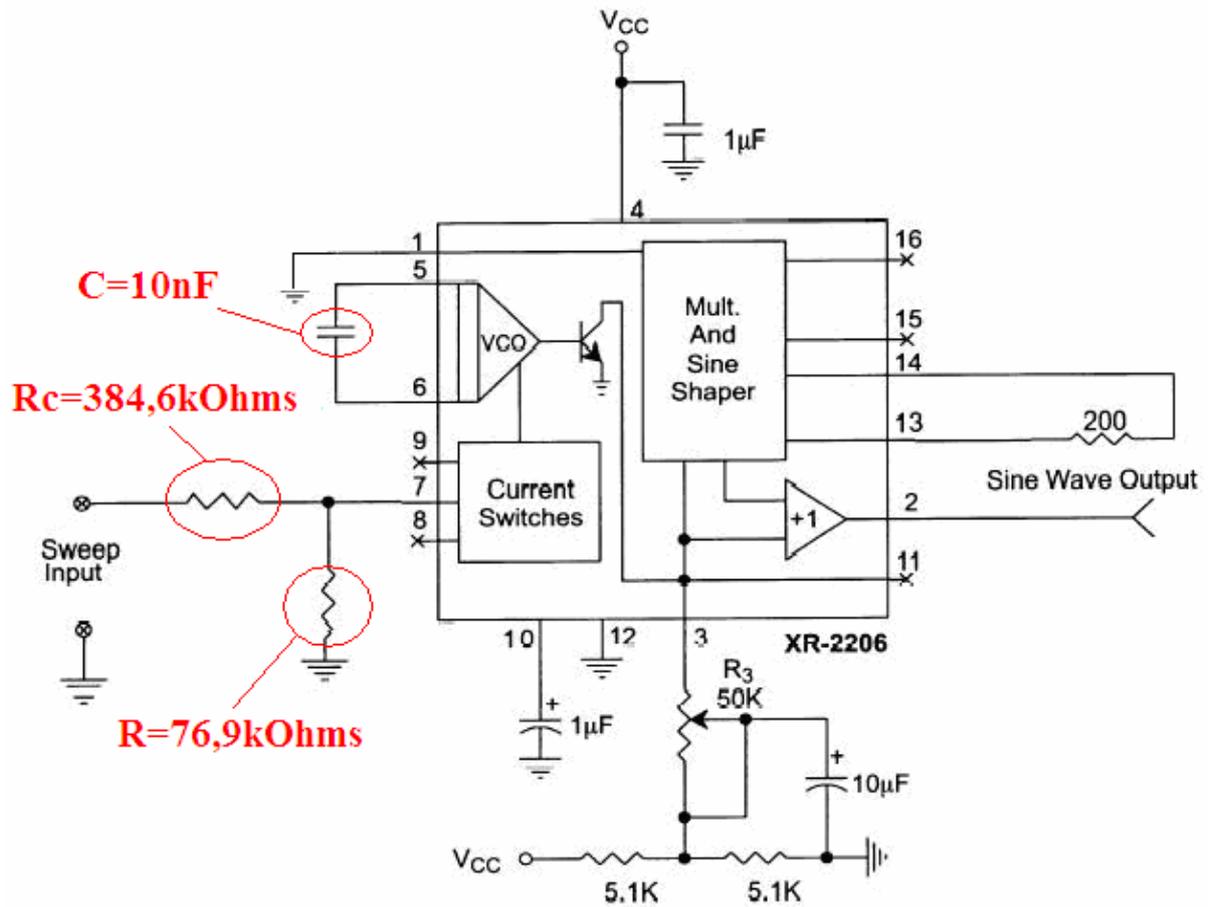
En effet, en mode analogique, le Kiwi ne peut envoyer des mesures que toutes les deux secondes. Cela donne une fréquence bien inférieure aux modes propres mesurés lors de tests sur la structure de la fusée (de l'ordre de la centaine de hertz).

Nous avons donc choisi d'utiliser la modulation en fréquence du Kiwi selon la norme IRIG dont la fréquence centrale est de 1300 Hz pour pouvoir émettre des signaux à fréquences élevées. Nous avons opté pour un XR 2206 monté en VCO selon le schéma fourni par Planète-Sciences.

Comme la fréquence centrale est de 1300 Hz, il nous a fallu choisir les valeurs des composants R, Rc et C de manière à obtenir  $F_0 = 1/RC = 1300$  Hz et une excursion en fréquence de 20%.

Les valeurs sont donc :

- $C = 10 \text{ nF}$
- $R = 76,9 \text{ k}\Omega$
- $R_c = 384,6 \text{ k}\Omega$



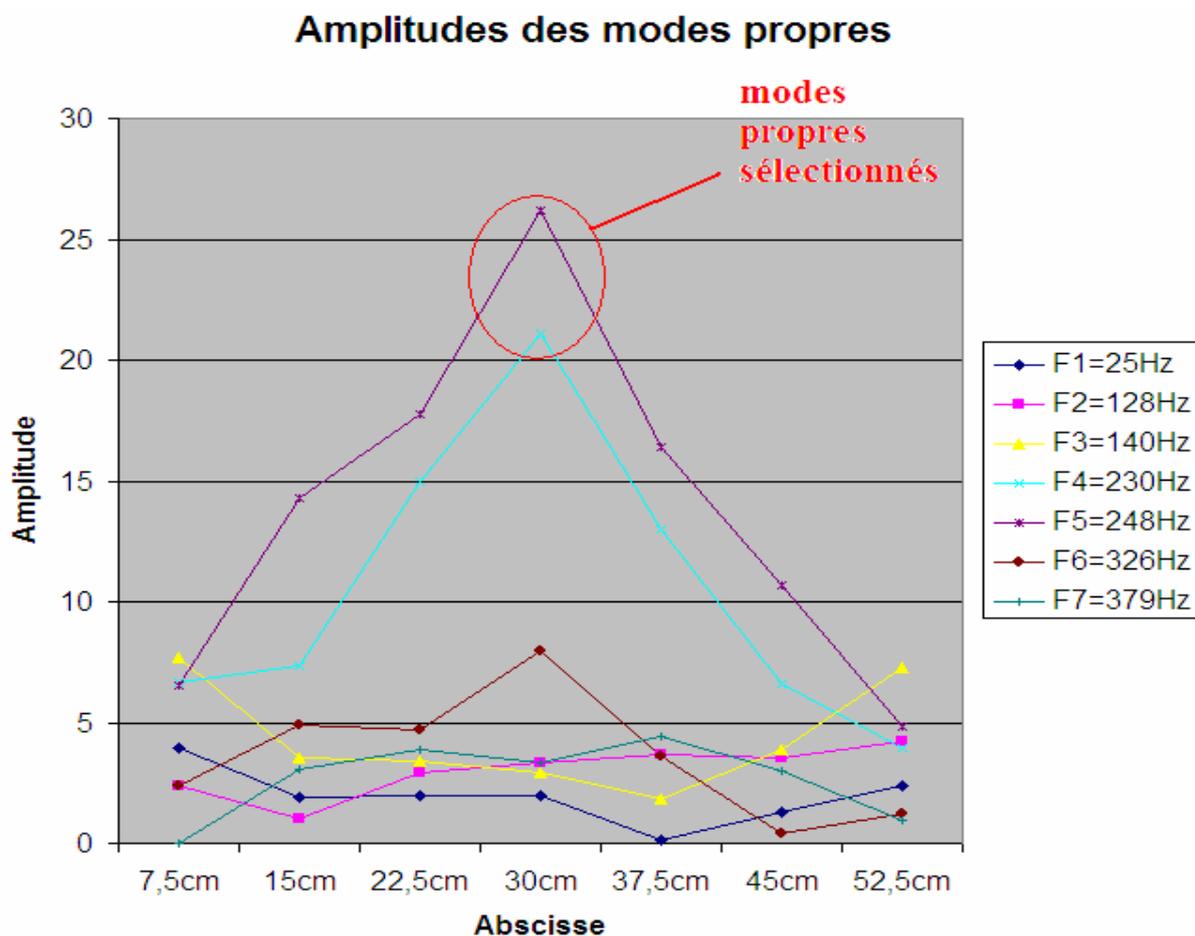
### 3 Expérience et résultats

#### 3.1 Principe de l'expérience

Durant la phase de vol, le propulseur est une source d'excitation mécanique : la structure vibre à cause du propulseur à poudre. Nous avons tenté de mesurer l'amplitude et la fréquence de ces vibrations par deux manières différentes, dans le but de comparer ensuite ces deux méthodes. Le premier capteur utilisé était une jauge de contrainte, le second un accéléromètre.

#### 3.2 Protocole expérimental

Dans le but d'établir le protocole, nous avons fait subir des tests à la fusée pour déterminer les modes propres de la structure ainsi que la position des nœuds et des ventres de ces modes propres.



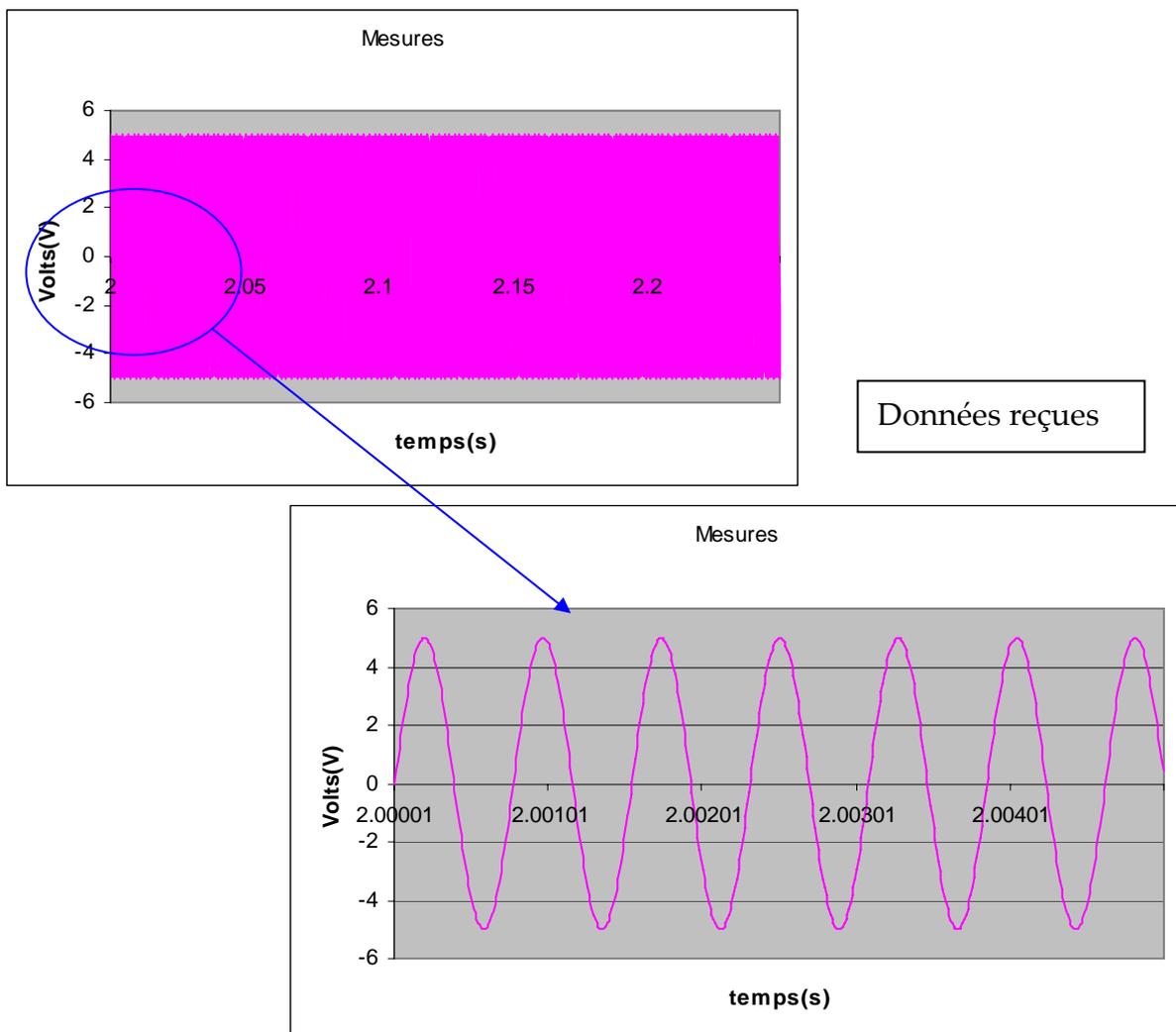
Pour choisir où placer nos capteurs, nous avons sélectionné un ventre du mode qui avait l'amplitude la plus élevée, de manière à avoir un signal de départ le plus important possible. Cela correspondait au centre des barres de la case électronique.

Nous voulions placer une jauge de contrainte sur une des barres en T de la case, et l'accéléromètre sur l'autre, à la même abscisse, pour avoir des résultats les plus comparables possibles.

Malheureusement, par manque de temps, et de savoir-faire, nous n'avons pas pu placer l'accéléromètre dans la fusée.

### 3.3 Résultats obtenus

Les données reçues par le camion télémessure au sol devraient se présenter sous la forme d'une sinusoïde avec une fréquence variant autour la fréquence d'émission du kiwi (1300Hz). Nous obtenons un ensemble de plus de 1 million de points sur toute la durée de l'enregistrement qu'il a été difficile d'exploiter avec les logiciels conventionnels :

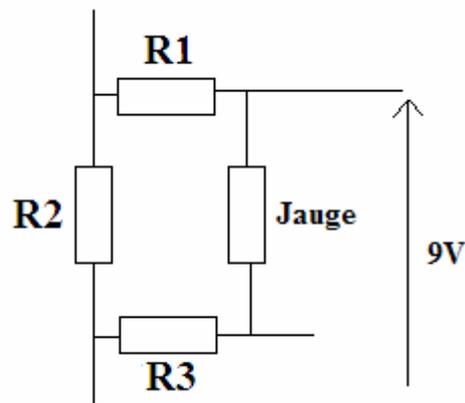


On ne montre ici qu'une partie du signal zoomé pour montrer que l'excursion en fréquence du signal est nulle ou du moins indétectable pendant toute la durée du vol. La modulation en fréquence aurait dû faire apparaître une sinusoïde avec des variations de fréquences, or ici la fréquence du signal reste constante. Tout se passe comme si le capteur ne détectait aucune vibration c'est-à-dire comme si la structure de la fusée ne subissait aucune déformation pendant le vol.

## 4 Analyse des sources de dysfonctionnement

### 4.1 Erreurs d'origine électronique

Première erreur, et de taille : la jauge de contrainte était placée dans un pont de Wheatstone que nous pensions équilibré, mais qui ne l'était pas !



La théorie nous dit la chose suivante : un pont est équilibré si on a au moins  $R1=R_{\text{jauge}}$  et  $R2=R3$ . Nous avons oublié de prendre cela en compte dans la conception de notre circuit, en sélectionnant des résistances d'entrée élevées pour rendre ce courant de sortie de pont très petit. Il apparaît aussi que nous avons inversé deux résistances dans notre montage. La carte ne pouvait évidemment donc pas donner un signal en rapport avec la déformation subie...

De plus, si l'expérience de tous les gens qui nous ont aidés a permis de clarifier un peu nos circuits, ceux-ci restaient quand même encore « fouillis », peu clairs et mal agencés. De là d'énormes difficultés à travailler sur les circuits après montage, pour retrouver des points particuliers sur le montage par exemple.

## 4.2 Problèmes de rigidité

Nous avons émis l'hypothèse que les jauges aient pu être mal dimensionnées. En effet, elles n'étaient probablement pas assez sensibles pour détecter les faibles déformations de la barre. Nous avons utilisé des barres en T pour rigidifier la structure interne. Les flexions de la barre ont donc fortement diminué. Par ailleurs, les tests sur les modes propres de la structure ont été faits sur la barre sans les cartes électroniques fixées. Il est possible que la fusée entièrement finie ait des modes propres différents de ceux qu'on a obtenus durant les tests.

Les cartes électroniques, les piles et le Kiwi ont aussi rigidifié la structure interne en reliant les deux barres en T. Le modèle théorique ne correspondait plus avec la réalité.

Enfin pour être sûr que les jauges correspondait bien à notre expérience, une discussion avec un ingénieur-commercial de Vishay nous a confirmé qu'elles sont sensibles à des variations de l'ordre du micromètre et qu'elles peuvent supporter des fréquences de vibrations allant jusqu'au mégahertz. Le véritable problème semble donc provenir directement de la carte d'acquisition.

## 5 Retour d'expérience

### 5.1 Electronique

Il est impératif que nous mettions à profit tout ce que nous avons appris pendant la campagne pour la future fusée.

C'est-à-dire :

- une des premières solutions à nos problèmes auraient été de monter un pont de Wheatstone correct.
- avoir des schémas clairs et bien annotés de tous les circuits, théoriques ou montés. Aurélie a passé beaucoup de temps (avec courage !) à déchiffrer la carte expérience pour avoir un schéma qui nous permettait de nous y retrouver. Il aurait été beaucoup plus simple de faire ce schéma au moment où nous concevions la carte...
- privilégier les montages par « blocs » : ne pas hésiter à bien séparer les différents étages des cartes, au risque de perdre un peu de place, pour avoir une lecture et un débogage bien plus simple par la suite. Lors du montage des composants sur les cartes, le gain de place a été prioritaire, mais cela s'est avéré inutile et cela n'a fait que renforcer la difficulté à travailler sur elles ensuite.
- bien disposer aux endroits stratégiques des prises de tensions, pour pouvoir aisément mesurer la tension entre les points importants du circuit.

- et bien évidemment prévoir à l'avance du matériel et des composants de rechange en quantité suffisante, ce qui nous évitera de devoir embêter tout le monde en quémandant sans cesse auprès des autres clubs qui un Jack, qui une résistance ou une pince coupante...
- prévoir un moyen de fixer les interrupteurs et diodes de contrôle indépendamment de la coque afin de pouvoir démonter la fusée plus facilement.
- des portes piles auraient donné un aspect plus propre à la fusée et auraient facilité le changement des piles avant de partir en zone de lancement.

## 5.2 Système de récupération

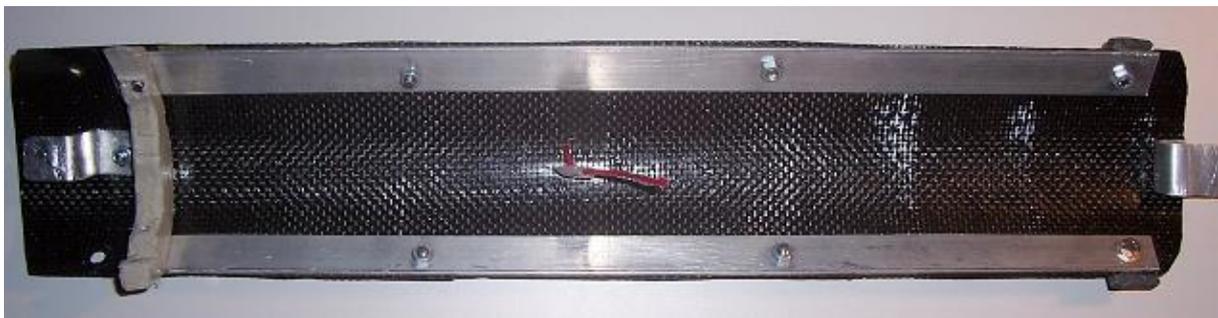
Lors du passage aux contrôles mécaniques, nous avons été confrontés à plusieurs problèmes. Nous en verrons le détail ainsi que les solutions apportées pendant la campagne :

### 5.2.1 Rigidité de la porte

La porte de la case parachute a été découpée dans de la fibre de carbone bi-couche. Elle présentait une résistance correcte en flexion, mais elle était bien trop peu rigide en traction. Il a donc fallu corriger ce défaut avant le lancement.

Pour limiter la torsion, nous avons donc procédé aux améliorations suivantes :

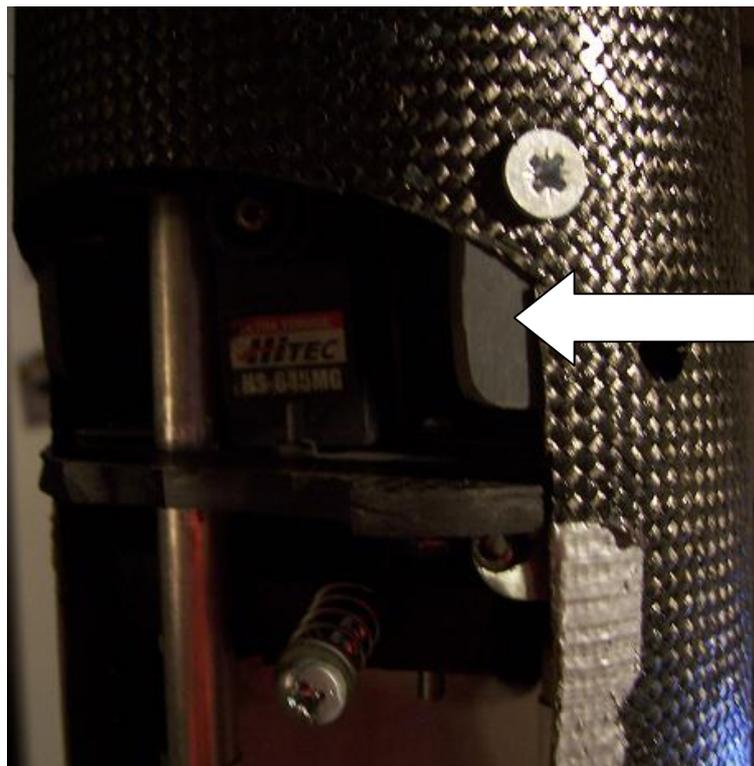
- Ajout d'une baguette métallique sur chaque bord de la porte, pour la rigidifier
- Ajout d'une pièce plastique placée de manière transversale aux baguettes



Voici une image illustrant ces modifications :

## 5.2.2 Fixation de la porte

Nous avons également connu un problème de fixation de la porte en position fermé. En effet, la faible résistance à la torsion de la case parachute faisait que la porte n'était pas fixée correctement et qu'elle pouvait s'ouvrir alors que cela n'était pas souhaité. De plus, un défaut de symétrie faisait que la porte avait tendance à se décoller d'un côté, et au contraire avait tendance à rentrer dans la coque et se coincer de l'autre.



Pour solutionner ces problèmes, nous avons :

- Placé des taquets dans la partie supérieure de l'ouverture de la porte pour empêcher la porte de se coincer sur les côtés
- Ajouté deux pièces plastiques sur la partie inférieure de la porte pour bien centrer la porte sur l'ouverture et l'empêcher de trop s'enfoncer dedans.

### 5.2.3 Ouverture de la porte

Deux problèmes notables ont eut lieu ou niveau de l'ouverture de la porte.

La patte métallique qui venait se coincer derrière le disque du moteur était faite en matière trop ductile, nous avons du la refaire dans le même matériau, mais dans une pièce de plus grande épaisseur.

Nous comptions initialement sur le pliage du parachute pour éjecter la porte. Le parachute devait être plié de telle façon à exercer une force sur la porte, force qui devait permettre de la faire sauter une fois que la minuterie actionnait le moteur. A la campagne, on nous a demandé de modifier le pliage pour éviter un fort risque de déchirement du parachute. De la sorte, nous n'avons plus de système d'éjection de la porte. Nous en avons réalisé un à partir d'un pavé en matière plastique, d'un ressort et d'un boulon.

