

ESTACA  
École d'ingénieur



## **Rapport de projet – Fusée Expérimentale PULSE**

---

Rapport de projet  
Septembre 2017

Par  
Corentin LEIBENGUTH, Chef de Projet et Vice-Président 2016-2017

## Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier l'ensemble de mon équipe qui a travaillé sur ce projet tout au long de l'année, malgré les quelques évènements indépendants de ma volonté.

J'aimerais ensuite remercier du fond du Coeur Marie Cancé (Hypérion), Jean Loup-Gaté (Frégate), Tom Bozonnet (Fusée à Eau La Freca) et Nicolas Oudart (Ballon Stratosphérique Barsoom) qui ont tout fait pour faire avancer le projet lors de la campagne 2017 bien que ne faisant pas partie de l'équipe originale.

Il faudra bien évidemment remercier l'association ESTACA SPACE ODYSSEY (ESO) qui a fourni pléthore de connaissances, de matériel et de ressources pour le bon déroulement de ce projet.

Il ne faudra pas oublier l'ESTACA qui nous donne les compétences techniques et managériales pour conduire les projets que nous réalisons chaque année et qui a également rendu possible la fabrication de certaines pièces par l'intermédiaire de messieurs Bertrand Barbedette et Judicaël Aubry

Enfin, je souhaite remercier les bénévoles du Secteur Espace de Planète Sciences ainsi que le CNES pour nous avoir accompagné durant toute l'année, du début du projet jusqu'au C'Space.

## Résumé

Le projet PULSE est né à la suite de la campagne de lancement 2016. L'idée de ce projet était de proposer une fusée expérimentale sur le site de Laval. Au départ, l'expérience qui allait être embarquée n'était pas encore clairement définie (CF Genèse du projet) même si les dimensions générales de la fusées étaient déjà statuées.

Il s'agissait entre autre de la première fusée pour moi en tant que chef de projet (anciennement sur Lyrae, minifusée ayant fait un nominal au C'Space 2016).

L'expérience retenue fut finalement la détermination du coefficient de portance ( $C_z$  et de trainée  $C_x$ ) généré par l'ogive. Ces grandeurs sont facilement calculables en connaissant le champ de pression autour de l'objet, c'est pourquoi plusieurs capteurs de pression ont été disposés le long de l'ogive. Ce projet permettait d'appliquer les connaissances en aérodynamique acquises en cours ainsi que de se former à l'utilisation de logiciels de conception assistée par ordinateurs (CATIA) et de Modélisation CFD (ANSYS Fluent).

La fusée ne volera cependant pas durant la campagne 2017, l'expérience n'étant pas assez avancée.



## Sommaire

---

<b>1. Généralités</b>	<b>3</b>
1.1 Présentation de l'association ESTACA Space Odyssey	3
1.2 Présentation de l'école d'ingénieurs ESTACA	3
<b>2. Génèse du projet</b>	<b>4</b>
<b>3. Budget &amp; Planning annuel</b>	<b>5</b>
3.1 Budget	5
3.2 Planning	6
<b>4. Mécanique et structure</b>	<b>8</b>
4.1 Partie basse-propulseur	8
4.2 Case parachute	9
4.3 Case élec	10
4.4 Ogive	11
<b>5. Electronique et expérience</b>	<b>12</b>
5.1 Expérience	12
5.2 Minuterie	14
<b>6. Annexes</b>	<b>15</b>

## Liste des illustrations

---

Figure 2.1 : Exemple de strioscopie sur une balle	4
Figure 3.1 : Planning annuel	7
Figure 4.1 : Partie basse (sans aileron, avec propulseur)	8
Figure 4.2 : Exemple de case parachute (Boccoz)	9
Figure 4.3 : Exemple de case élec (Boccoz)	10
Figure 4.4 : Ensemble tête et cou de l'ogive	11
Figure 4.5 : Ensemble ogive imprimé (de g. à d. Tête, support haut, support bas, cou)	11
Figure 5.1 : Montage des capteurs (Oudart)	12
Figure 5.2 : Contour du nombre de Mach	13
Figure 5.3 : Contour de la pression	13
Figure 5.4 : Schéma de la minuterie	14
Figure 6.1 : Code Arduino d'enregistrement des données.	15
Figure 6.2 : Parti haute du support capteur	16

## Liste des tableaux

---

Tableau 1 : Récapitulatif des dépenses	5
--	---

# 1. Généralités

---

## 1.1 Présentation de l'association ESTACA Space Odyssey

Association d'étudiants de l'école d'ingénieurs ESTACA., l'**ESTACA Space Odyssey (ESO)** a été créée en 1992. Simple association d'étudiants à ses débuts, l'ESO est depuis quelques années un club référent dans le domaine aérospatial en France. C'est de fait une des associations majeures de l'école et une de celles qui regroupe le plus d'étudiants.

Notre but est de promouvoir le domaine spatial au sein de notre école et auprès du grand public. Pour ce faire, nous concevons et réalisons chaque année différents types d'expériences liées à l'espace, notamment des fusées expérimentales, des mini-fusées, des ballons stratosphériques et des projets en microgravité. Ces projets sont réalisés pendant l'année scolaire au cours de campagnes de lancement comme le *C'Space*, organisé par le CNES ou au cours d'autres campagnes de lancement à l'international.

Depuis sa création il y'a 25 ans, l'association a lancé un peu plus de 90 projets, allant de la mini-fusée au ballon sonde en passant par les fusées expérimentales et bi-étage, ainsi que trois fusées supersoniques, trois fusées bi-étage (une inerte, deux propulsées), deux projets en microgravité et une multitude de fusées expérimentales et mini-fusées.

L'ESO est présente lors de deux événements majeurs du domaine aérospatial international. Présente à chaque Salon du Bourget tous les deux ans, au mois de juin, sur un stand ESTACA, elle était aussi présente au Congrès International d'Astronautique à Pékin en septembre 2013 et à Toronto en 2014.

## 1.2 Présentation de l'école d'ingénieurs ESTACA

L'ESTACA, Ecole supérieure des techniques aéronautiques et de construction automobile, forme des ingénieurs passionnés par les technologies, qui répondent aux besoins de nouvelles mobilités. À la pointe des technologies, elle offre un cadre privilégié pour une vie étudiante de qualité. Sa mission est de former des ingénieurs et de conduire une recherche appliquée au service de tous les acteurs des transports : aéronautique, automobile, spatial et transports urbains et ferroviaires. La formation répond aux nouveaux défis pour les transports de demain: respect de l'environnement, maîtrise énergétique, urbanisation croissante. Pour répondre à ces enjeux, l'ESTACA forme des ingénieurs multidisciplinaires, multiculturels qui sauront trouver des solutions technologiques innovantes pour répondre à la transformation profonde des modes de transport.

L'ESTACA, c'est :

- une formation ingénieur en 5 ans après le BAC,
- une école spécialisée en aéronautique, automobile, spatial et en transports ferroviaires,
- deux établissements : ESTACA-Paris et ESTACA Campus-Ouest à Laval en Mayenne,
- un projet de relocalisation du campus de Levallois vers Saint-Quentin-en-Yvelines en 2015,
- un enseignement personnalisé et de haut niveau qui répond aux besoins des entreprises,
- des équipes de recherche qui disposent d'équipements de haute technologie,
- une expérience internationale obligatoire,
- un diplôme habilité par la Commission des Titres d'Ingénieurs,
- une association de parents d'élèves associée à la vie de l'école.

## 2. Génèse du projet

---

La campagne 2016 s'achevant sur une bonne note pour l'ESO, il fallait continuer sur cette lancée en 2017. La plupart des membres de l'ESO en 2016 sont partis sur le campus de Saint Quentin en Yvelines pour poursuivre la spécialité Spatial, ne restait à Laval que des membres avec 1 an d'expérience maximum.

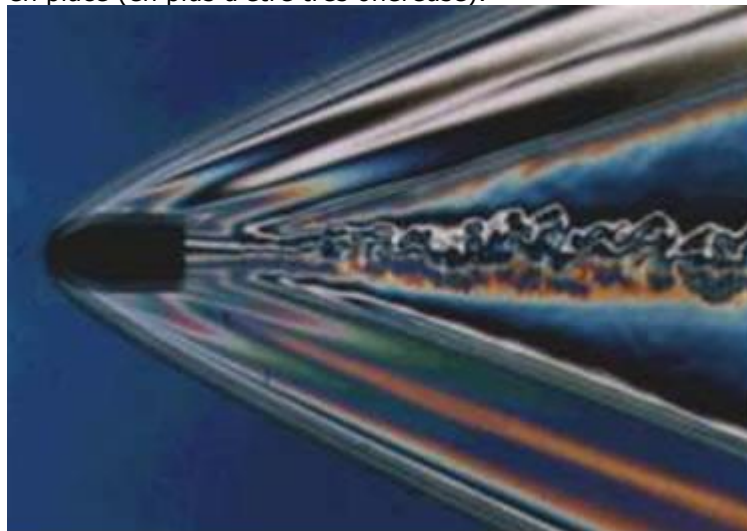
Lors de la proposition des projets en début d'année, le nombre d'inscrits sur le campus de Laval était encore incertain. Des estimations basées sur les années N-1 et N-2 donnèrent environ une 20aine de membre sur le campus Mayennais. Il a donc été décidé de faire une minifusée (Hypérion) ainsi qu'une fusée expérimentale (Pulse).

Les dimensions générales de la fusées étaient alors déjà définies : diamètre 100mm , environ 2m de haut, entre 5 et 8 kilos (sans propu), propulsion Pro-54 ; il ne restait plus qu'à définir l'expérience.

L'objectif alors était de proposer une expérience sortant de l'ordinaire et qui apporterait des résultats utiles pour les projets futurs. Etant très attaché à l'aérodynamique et à la mécanique des fluides, j'ai tout d'abord songé à visualiser les turbulences et le développement de la couche limite au niveau de l'ogive. Le vol se déroulant majoritairement en régime transonique ( $> \text{Mach } 0.6$ ), ces données auraient permis un meilleur dimensionnement des ogives dont l'aérodynamisme et souvent délaissé au profit de l'esthétisme.

Une première idée pour observer ces phénomènes était la diffusion d'un nuage de fumée au niveau de la pointe de l'ogive qui serait filmé avec une caméra rapide pour visualiser son évolution le long de la surface. Cette solution a été abandonnée car l'éjection de gaz est soumise à un cahier des charges très strict et incompatible avec le peu d'expérience disponible au sein de l'équipe.

Une autre idée, également très vite abandonnée, était l'observation des lignes de champ via le principe de strioscopie utilisée en soufflerie. Cette technique permet, grâce aux propriétés thermiques et visuelles de l'air, d'observer la dérivée seconde de la quantité de mouvement. Cependant cette méthode est quasiment impossible à embarquer dans une fusée et extrêmement délicate à mettre en place (en plus d'être très onéreuse).



**Figure 2.1 : Exemple de strioscopie sur une balle**

### 3. Budget & Planning annuel

---

#### 3.1 Budget

Le budget alloué pour le projet était de 800€, beaucoup de matières premières et composants de base étaient à racheter sur le site de Laval et ont servi pour Pulse. Certaines parties de la fusée (ogive, bagues, carte élec) ont nécessité un usinage spécifique, fort heureusement, l'ESTACA met à disposition des élèves des machines pour usiner, nous permettant ainsi de nous affranchir des coûts d'un prestataire externe.

L'expérience n'étant pas encore tout à fait définie lors de la demande de budget, la somme destinée à cette dernière n'était pas quantifiable et pourra paraître élevée.

La liste qui suit ne fait pas état des dépenses réelles mais permet de fixer un ordre de grandeur pour les diverses parties constituantes de la fusée.

Mécanique	
• Tiges filetées	10€
• Visserie	40€
• Quincaillerie diverse	20€
• Aileron	20€
• Treillis aluminium	20€
Electronique	
• Composants de base (C,R, ALI...)	50€
• Plaques de cuivre (gravure)	30€ (usinage ESTACA)
Expérience	
• Carte Arduino UNO (x2)	50€
• Amplificateur ADS1115 (x4)	30€
• Capteurs de pression 2SMPP-02 (x16)	30€
Autre	
• Plastique PLA pour l'ogive	10€ (impression 3D à l'ESTACA)
• Fibre de carbone + résine	100€
• Bague Aluminium*	50€ (usinage ESTACA)

**Tableau 1 : Récapitulatif des dépenses**

\*L'ESO possédait déjà le brut d'aluminium, le coût du brut (barre de 1m de long / diamètre 110mm) est basé sur le prix de l'aluminium en Juillet 2017

Le budget restant a été utilisé pour financer les divers trajets des membres et du matériel pour les événements associatifs (RCE, C'Space etc...)

### **3.2 Planning**

Le planning du projet est un peu particulier. En effet, un incident sur le site de Laval a causé la perte de plus de 80 ordinateurs, rendant le parc informatique inutilisable pendant la période de Octobre à Décembre. Cette période fût critique pour la suite du projet : la plupart des membres étant en 1<sup>ère</sup> année, n'avaient pas les compétences requises en Conception Assistée par Ordinateur (CAO) pour travailler seul. Il n'y avait donc pas de travail à leur donner en début d'année. Ce manque d'occupation fait partie des causes qui ont conduit à un désintéressement général du groupe au 2<sup>nd</sup> semestre.

Le second semestre fut nettement moins productif que le premier, la plupart des membres aillant abandonné le projet. Il ne restait plus que quelques membres qui, pris par leur projets scolaires n'avaient pas beaucoup de temps à accorder à l'ESO.



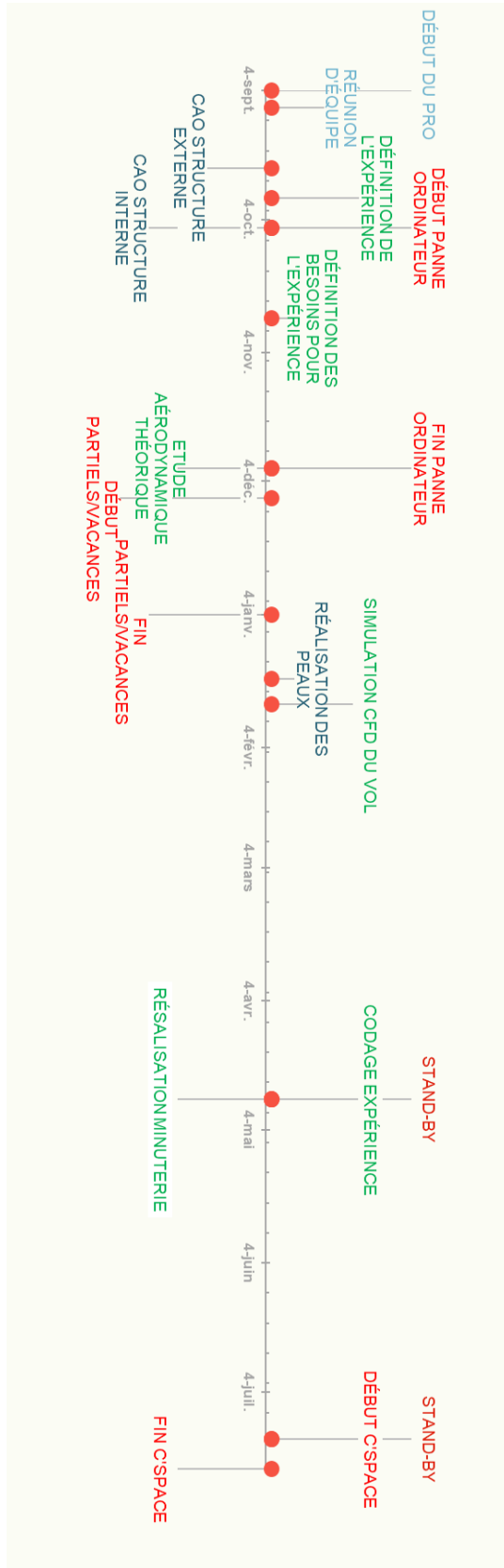


Figure 3.1 : Planning annuel

## 4. Mécanique et structure

---

La fusée se compose de 4 tronçons ayant chacun leur fonction:

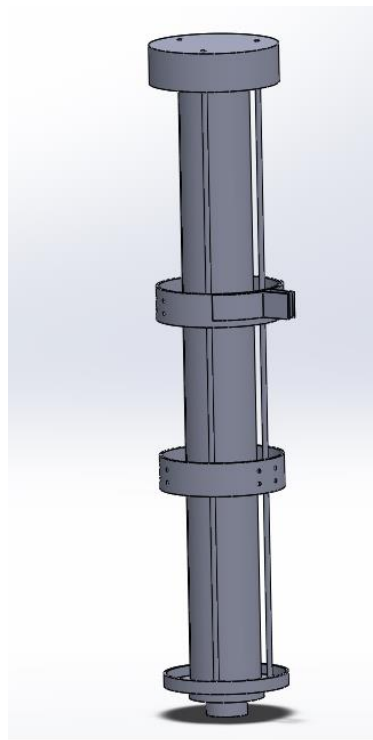
- La partie basse est chargée d'assurer le maintien du propulseur, son centrage ainsi que la reprise de la poussée générée par ce dernier
- La partie parachute est, comme son nom l'indique, la coque dans laquelle sera logée le parachute ainsi que le mécanisme d'éjection.
- La partie élec est le tronçon le plus important du projet, c'est là que l'ensemble des composants électroniques sont situés. C'est une partie critique qui doit être arrangée méticuleusement pour éviter tout problèmes lié aux propriétés de l'électricité (court-circuit, surtension etc.)
- L'ogive qui accueille les capteurs et qui, de ce fait, doit être dimensionnée en conséquence.

NOTE : La CAO de ce projet a été malheureusement perdue suite à un changement de PC et des fichiers corrompus, les illustrations sont pour la plupart issues de projets similaires.

### 4.1 Partie basse-propulseur

L'architecture de cette partie reprend en grande majorité celle de la fusex Aircaster. Elle présente l'avantage d'être facilement réalisable et permet un montage et un centrage assez simple. Ce dernier peut cependant être long compte tenu des nombreuses vis qu'il comporte.

Elle se compose de trois tiges filetées à 120° sur lesquelles viendront s'appuyer trois bagues pour le centrage fixées avec écrou/contre-écrou. Ces mêmes bagues serviront de support pour fixer les équerres de maintien des ailerons.



**Figure 4.1 : Partie basse (sans aileron, avec propulseur)**

## 4.2 Case parachute

La case parachute est, comme son nom l'indique, la partie où se trouve le parachute, les suspentes ainsi que le mécanisme permettant son éjection. L'éjection est réglée via une minuterie située dans la cas élec (chapitre 4.3).

Le mécanisme utilisé est assez simple de par son fonctionnement et sa mise en œuvre. Le système utilisé repose sur une combinaison électroaimant + aimant et a fait ses preuves dans de nombreux projets.

L'électroaimant a la propriété de se comporter comme un aimant lorsqu'il n'est pas alimenté et de perdre ce pouvoir magnétique lorsqu'un courant le traverse, c'est l'alimentation de cet aimant qui conditionne l'ouverture.

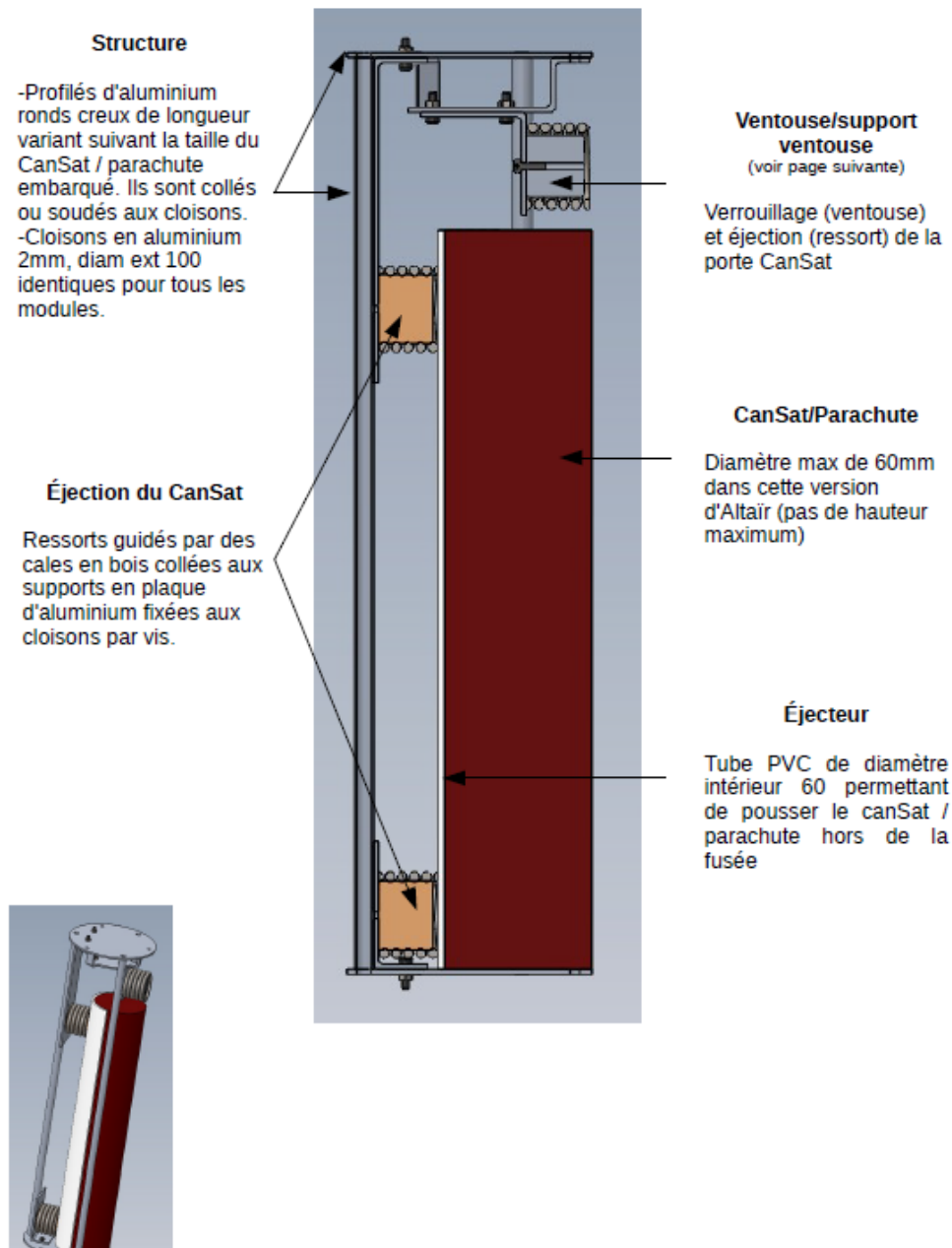


Figure 4.2 : Exemple de case parachute (Boccoz)

### 4.3 Case élec

Le cœur de la fusée réside dans cette partie pourtant très petite (15cm) en comparaison à la taille de la fusée. C'est un bloc qui pose souvent problème et qui doit donc être accessible et modifiable très facilement.

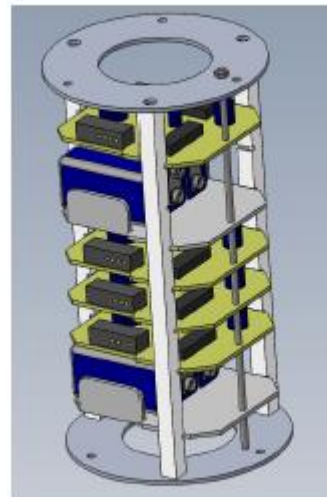
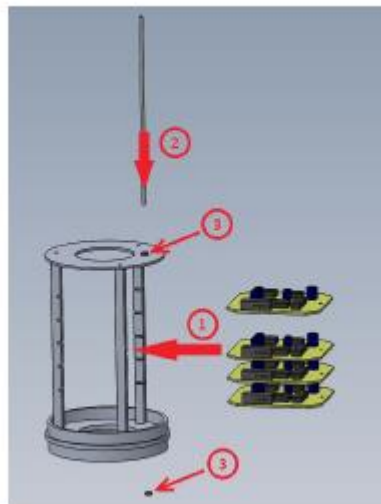
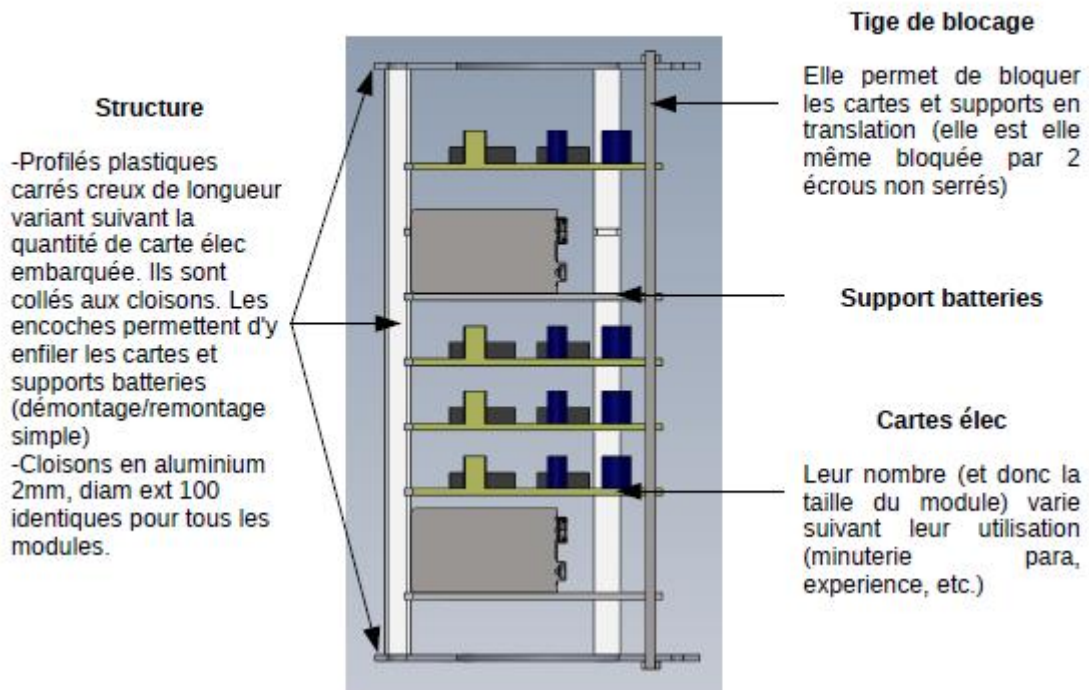


Figure 4.3 : Exemple de case élec (Boccoz)

#### 4.4 Ogive

Dans le cas de Pulse dont l'expérience est la mesure de la pression au niveau de l'ogive, il était nécessaire de créer un ogive qui puisse accueillir les capteurs sans compromettre l'aérodynamique du reste.

Pour faciliter le montage/démontage des capteurs en cas de souci, l'ogive a été déconstruite en 4 parties.

- La tête est la partie haute de la fusée, c'est dans cette partie que sont situés les capteurs
- Le cou se situe à la base de l'ogive et permet de faire le lien entre la tête et le corps de la fusée, il assure également un guidage du support de capteur
- La partie basse du support constitue un socle de guidage et de maintien du support capteur
- Le support capteur suit la courbe de l'ogive et évite aux capteurs de bouger pendant le vol tout en permettant une maintenance aisée.

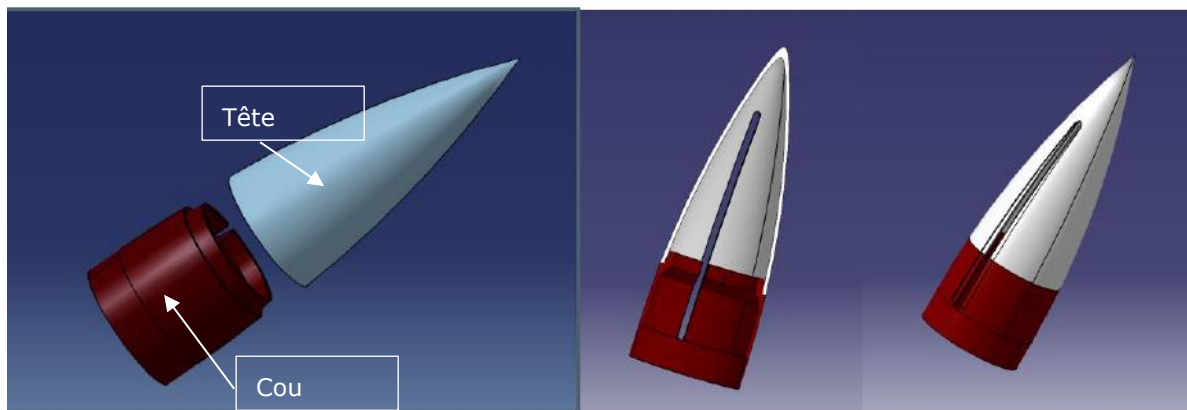


Figure 4.4 : Ensemble tête et cou de l'ogive



Figure 4.5 : Ensemble ogive imprimé (de g. à d. Tête, support haut, support bas, cou)

## 5. Electronique et expérience

L'expérience retenue pour le projet est la mesure de la pression au niveau de l'ogive. Cette mesure permet le calcul d'un coefficient de pression  $C_p$  grâce à la formule suivante

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho \cdot U_\infty^2}$$

Avec  $p_\infty = 1 \text{ atm}$  ( $\sim 101325 \text{ Pa}$ ) et  $U_\infty$  la vitesse de la fusée (calculable grâce à la courbe de poussée).

Une fois ce coefficient calculé, il est possible de déterminer la valeur des coefficients de pression et de traînée en intégrant  $C_p$  le long de la surface.

### 5.1 Expérience

Les capteurs retenus pour mesurer la pression sont des capteurs 2SMPP-02 de la marque Omron (datasheet en annexe). Ces capteurs utilisent la différence de pression pour appliquer une force sur un matériaux piézoélectrique (qui génère un courant proportionnel à sa déformation) afin d'émettre un signal analogique qui pourra être converti en pression.

Un des problème rencontré avec ce capteur est sa taille extrêmement petite (quelques mm de large) et sa fragilité. Si d'aventure un projet similaire devait voir le jour, des capteurs plus résistants seraient à envisager.

Par souci de compétence, il a été décidé d'utiliser l'interface Arduino afin de collecter et traiter les données. Une carte Arduino UNO a donc été nécessaire afin de recevoir les mesures et de les écrire sur une carte SD pour traitement ultérieur, le code est disponible en annexe.

Les capteurs n'émettant pas un signal suffisamment puissant pour l'Arduino, il a fallu utiliser un amplificateur ADS1115 pour amplifier le signal. Chaque amplificateur peut accueillir 2 capteurs et sont très simple d'utilisation .

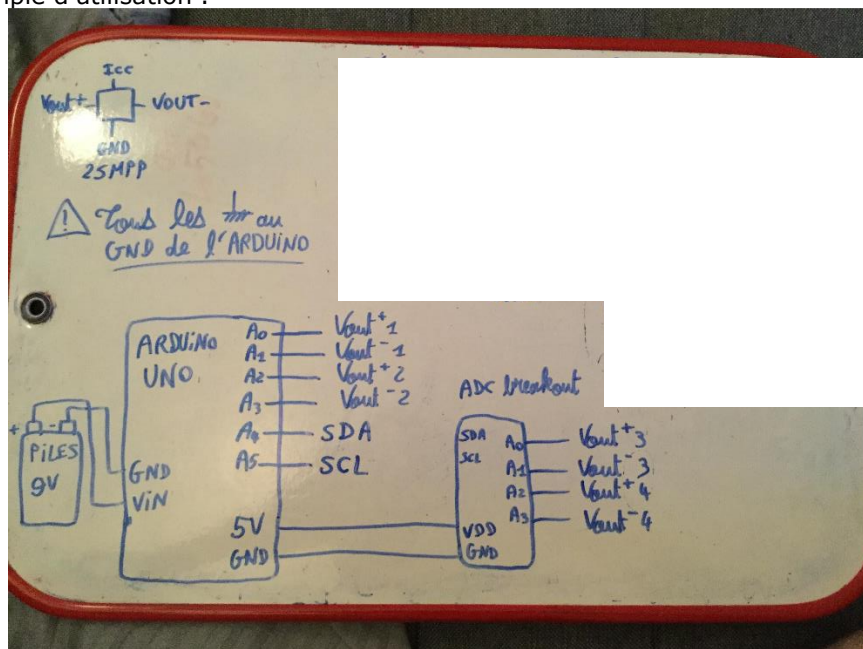
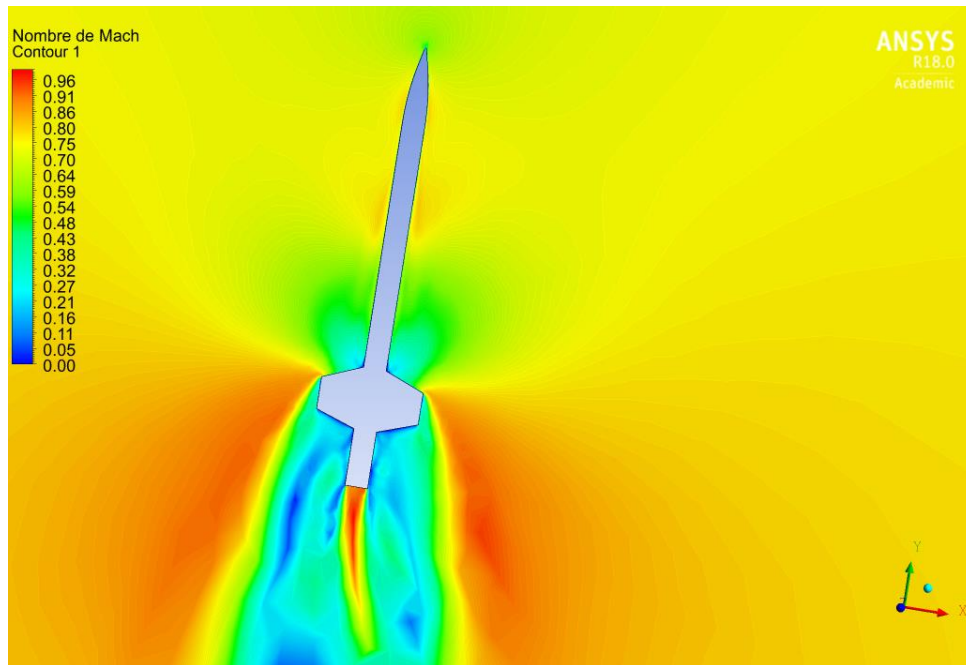
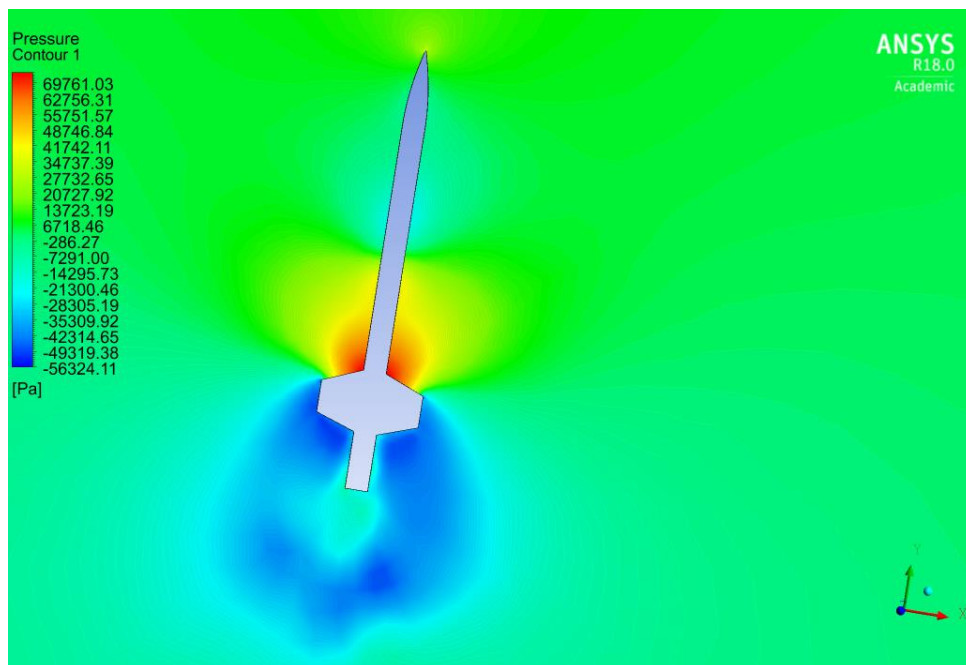


Figure 5.1 : Montage des capteurs (Oudart)

Les mesures obtenues seraient alors comparées avec des simulations numériques réalisées avec les logiciels de mécanique des fluides de Ansys (Fluent, CFX) . Ces simulations, faites bien avant le vol (supposé) de la fusée, ont conduit à des résultats cohérents quant au comportement attendu. Bien évidemment, elles ne reflètent pas totalement la réalité car de nombreuses hypothèses sont émises pour faciliter le calcul (vol rectiligne, masse constante, pas de vent latéral etc.)



**Figure 5.2 : Contour du nombre de Mach**



**Figure 5.3 : Contour de la pression**

## 5.2 Minuterie

La minuterie utilisée dans le projet est une minuterie analogique qui repose sur la charge d'un condensateur. La durée de cette charge est réglée par des résistances que l'on peut augmenter ou diminuer pour réduire ou allonger le temps de charge.

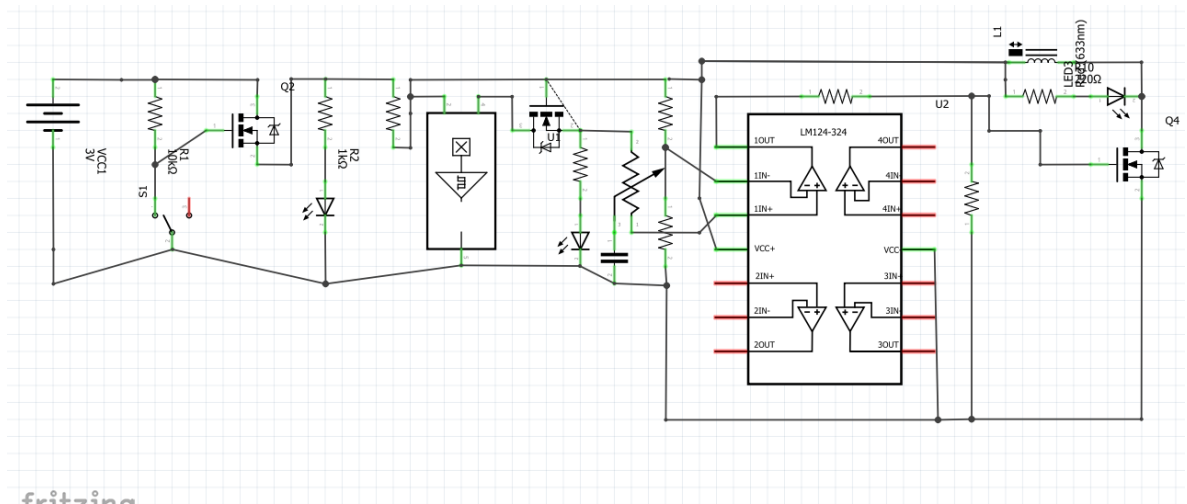
La mise sous tension de l'ensemble du circuit se fait via un interrupteur type bouton-poussoir. Le témoin visuel de cette mise sous tension est la diode verte.

**NOTE IMPORTANTE :** Lors du montage de la minuterie, s'assurer que la position «ON » se trouve dans le sens de vol de la fusée sous peine de couper accidentellement la minuterie au décollage.

La seconde partie du circuit qui lance la charge du condensateur est activée par un capteur à effet Hall. Ce capteur permet d'ouvrir ou fermer un circuit en fonction de la polarité magnétique qu'il subit.

Pour cela, le capteur doit être proche de la peau (voire collé) de l'intérieur tandis que l'aimant est de l'autre côté de la peau, à l'extérieur de la fusée et rattaché à la rampe de lancement par une ficelle. De ce fait, lors du décollage, l'aimant reste attaché à la rampe et le capteur Hall voit la polarité ambiante changer, permettant ainsi d'enclencher le compte à rebours pour l'ouverture du parachute.

Le témoin visuel de lancement de la minuterie est la diode orange. La diode rouge témoigne de l'alimentation de l'électroaimant et donc de la libération du parachute.



**Figure 5.4 : Schéma de la minuterie**

Note : Les résistances utilisées ici permettent d'avoir un temps de déclenchement entre 0 et 16 secondes environ (réglable avec le potentiomètre).



## 6. Annexes

---

```
#include <SD.h>
#include <Adafruit_ADS1015.h>
#include <Wire.h>

Adafruit_ADS1015 ads1015;
File Myfile;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Hello!");
  Serial.println("Getting differential reading from AIN0 (P) and AIN1 (N)");
  Serial.println("ADC Range: +/- 6.144V (1 bit = 3mV)");
  ads1015.begin();
  SD.begin(4);
  Myfile=SD.open("Résultats.txt", FILE_WRITE);      #On spécifie le nom du fichier
}

void loop()
{
  int16_t results;

  results = ads1015.readADC_Differential_0_1();      #Lecture des ports de l'amplificateur ADS
  Serial.print("Differential: "); Serial.print(results); Serial.print(" ");
  Serial.print(results * 3); Serial.println("mV");
  Serial.print((results*3*1.33)+1130); #Formule de conversion pour obtenir la différence de pression
  Serial.println("kPa");
  Myfile.println((results*3*1.33)+1130); #Ecriture sur la carte SD

  delay(1000);
}
```

**Figure 6.1 : Code Arduino d'enregistrement des données.**



**Figure 6.2 : Parti haute du support capteur**

Capteur de pression

<http://fr.rs-online.com/web/p/capteurs-de-pression/7884921/>

Amplificateur

<https://www.adafruit.com/product/1083/>