



Projet $2\pi R$

Rapport de vol

ESILV Pôle Léonard de Vinci



Figure 1: Photographie de l'équipe accompagnée du bureau de l'association avant le lancement

Contents

1	Introduction	1
1.1	Équipe	2
1.2	Acteurs du projet	3
2	Partie Mécanique	4
2.1	Architecture générale	4
2.2	Fabrication	5
3	Expérience	9
3.1	Objectif de l'expérience	9
3.2	Déroulé de l'expérience	9
3.3	Résultats attendus de l'expérience	9
3.4	Réalisation du rack de l'empennage mobile	10
4	Déroulement du vol	12
5	Analyse du vol	13
6	Conclusion	14
7	Remerciements	15
8	Annexes	16

1 Introduction

Pour sa cinquième année consécutive, notre association a participé à la campagne de lancement C'Space 2022, un projet de construction et de lancement d'une fusée expérimentale proposé par le CNES (le Centre National d'Etudes Spatiales) et Planète Sciences. Ce projet consiste à construire intégralement une fusée (de type Fusex) respectant un cahier des charges préalablement défini. A son bord, la fusée doit abriter une expérience. Cette année, nous avons décidé de travailler sur le contrôle de roulis via des empennages contrôlés mécaniquement.

1.1 Équipe

Considérant la multitude de disciplines concernées par le projet, nous nous devons de réunir une équipe de choc : Pierre et Pierre.



Figure 2: L'équipe au grand complet constituée de Pierre (à gauche), et Pierre (à droite), en train de tester pour la première fois le système d'éjection trois jours avant le décollage (tkt on était large)

- Chef de projet : Pierre
- Respo FAO : Pierre
- Respo CAO : Pierre
- Respo Gislaine : Pierre
- Respo Odile : Pierre
- Respo PapiPierrot : Pierre
- Respo gilet jaune : Pierre
- Respo orthographe du rapport : Noémie la best
- Respo chrono : Pierre
- Respo $\text{\LaTeX}$: Pierre
- Respo LiPo : Pierre
- Respo piles : Pierre
- Respo respo : Pierre
- Respo connerie : Pierre
- Equipe méca : Pierre
- Equipe élec : Pierre
- Equipe simu : Pierre
- Equipe intégration : Pierre
- Equipe nominale : Pierre
- Equipe balistique : Pierre
- Equipe à l'heure : Pierre
- Equipe en retard : Pierre
- Equipe LéoFly : Pierre
- Equipe TopAéro : Pierre
- Equipe équipe : Pierre
- Tocard 1 : Pierre
- Tocard 2 : Pierre

1.2 Acteurs du projet

- LéoFly

LéoFly est une jeune association d'aéronautique et d'aérospatiale fondée en novembre 2015. Elle a pour objectif de rassembler les étudiants du Pôle Léonard de Vinci (à Paris La Défense) autour de leur passion commune. Pour ce faire, les membres du bureau proposent de nombreux projets techniques (réalisation d'un cockpit de simulation à taille réelle, d'une aile volante autonome, etc.) dont certains sont en collaboration avec le CNES (Mini Apterros, ROAR et C'Space) ainsi que des conférences et des visites dans le domaine de l'aéronautique ou du spatial.



- Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)

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



- Planète Sciences

Planète Sciences est une association à but non lucratif proposant aux jeunes passionnés des activités scientifiques et techniques expérimentales, grâce à différents projets durant leurs études. Cette année, Planète Sciences nous a encadré grâce à 3 réunions techniques et de contrôle, ce sont les «Rencontre Club Espace» dites «RCE». Les bénévoles sont également présents sur le Camp de Ger (lieu de la campagne C'Space pour l'édition 2022) pour nous apporter des conseils et pour effectuer les vérifications techniques imposées par le cahier des charges avant de procéder au décollage.



2 Partie Mécanique

2.1 Architecture générale

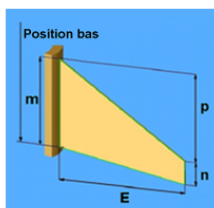
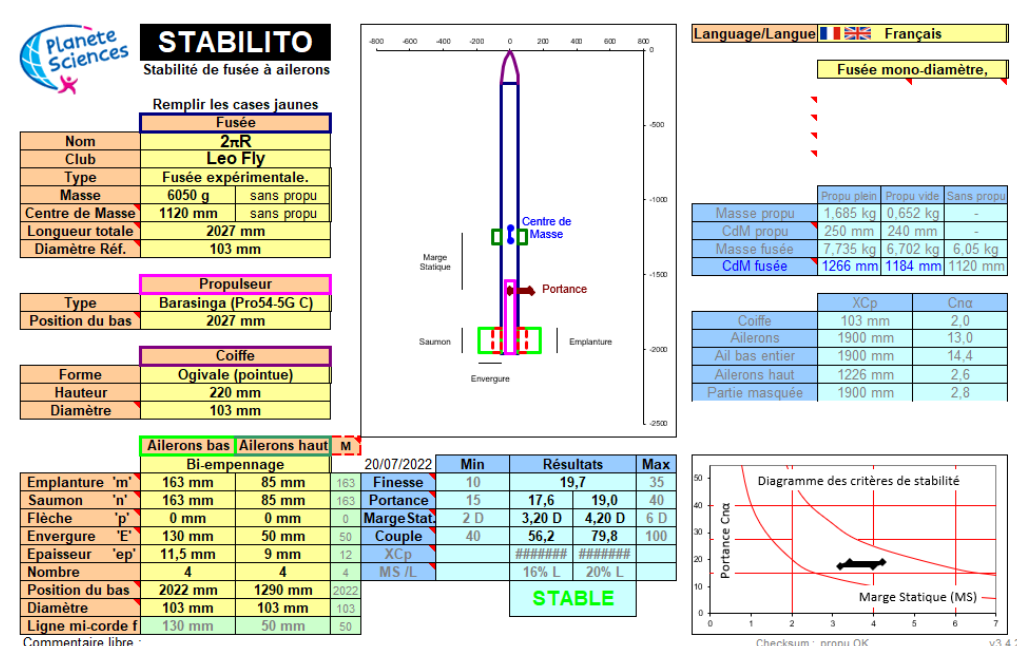
La structure de $2\pi R$ est dite en peau porteuse, c'est-à-dire que tous les éléments sont fixés sur le corps principal. Le corps principal de la fusée est constitué d'un tube en fibre de carbone de longueur de 2000 mm, d'un diamètre intérieur de 100 mm et extérieur de 103 mm. Le tube a été sous traité par l'entreprise Mateduc Composites.

A la base de la fusée, nous retrouvons la bague de reprise de poussée qui, couplée avec une languette de fixation en aluminium, empêche tout mouvement vertical du propulseur, un Pro54 fourni par le CNES. Pour contrer tout mouvement sur son axe horizontal, nous avons usiné deux bagues de centrage en aluminium, fixées par des vis pression au niveau de la partie basse du corps inférieur. Nous trouvons ensuite le rack principal de la fusée. Ce rack, comprend le bloc parachute, l'ensemble de l'électronique et la partie de fixation de l'empennage amovible. De notre point de vue, le fait d'avoir réalisé un rack unique facilite l'intégration et de la désintégration de la fusée.

Enfin, au-dessus du corps supérieur, se trouve l'ogive (d'une hauteur de 270 mm et d'un diamètre extérieur de 103 mm) sous laquelle se trouve le parachute.

Notre fusée est dotée de quatre ailerons pour l'empennage inférieur et deux autre pour l'empennage supérieur, qui ont d'abord été imprimés en 3D, puis drapés de fibre de carbone et enfin poncés et fixés au corps à l'aide de supports en aluminium.

Planète Sciences a développé une feuille de calculs permettant de vérifier si le dimensionnement des ailerons de notre fusée respectait bien les critères de stabilité instaurés par le cahier des charges. Ce fichier prédit par la même occasion la trajectoire de la fusée.



Maintenant que votre fusée est stable, vérifiez sa trajectoire via la feuille [Trajecto](#)

Figure 3: Dimensions des ailerons de la fusée

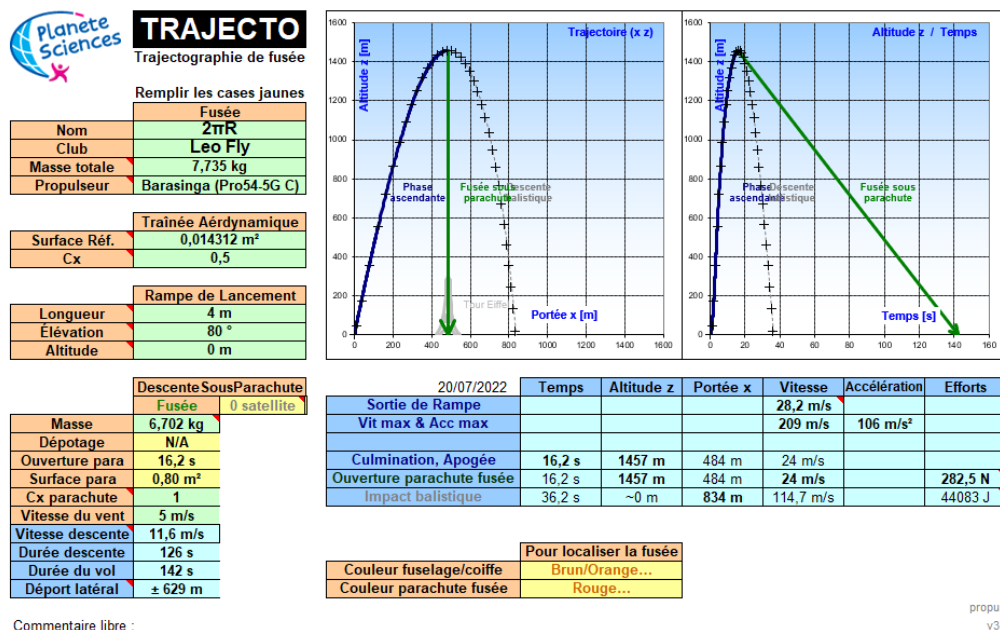


Figure 4: Trajectoire théorique de la fusée

2.2 Fabrication

- Processus de Fabrication

Nous avons réalisé l'ensemble de nos pièces grâce au centre d'usinage de notre école. A partir d'un brut cylindrique en aluminium de 130 mm de diamètre et d'un pavé d'aluminium, nous avons usiné les différentes bagues de la fusée ainsi que les supports des ailerons. Nous avons à disposition une scie à ruban pour sectionner, un tour manuel pour différentes opérations : surfaçages, alésages, contournages, gorges (etc..) ainsi qu'une fraiseuse 3-axes manuelle, une machine-outil 3-axes à commande numérique par ordinateur. Cette dernière permet d'usiner des formes complexes sans démontage de la pièce à partir d'un G-Code généré par les opérations d'usinage que nous définissons dans la FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) des pièces sur CATIA V5.



Figure 5: Centre d'usinage du Pôle Léonard de Vinci



Figure 6: Usinage d'une fixation d'aileron

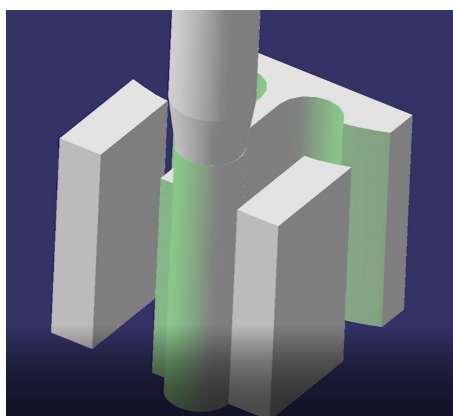


Figure 7: FAO d'une fixation d'aileron

- Tube en carbone

Du fait des fortes contraintes mécaniques que va subir le corps de la fusée durant le vol et des dimensions importantes du tube, nous avons décidé de sous traiter la réalisation de ce dernier à l'entreprise Mateduc Composites. Le tube est réalisé à partir de fibre T700 avec une couche en orientation transversale et deux allers-retours à $\pm 20^\circ$ sur un diamètre intérieur de 100 mm et une épaisseur de 1.5 mm, la longueur du tube est de 2000 mm.

Note pour LéoFly : Mateduc nous a facturé dans leur premier devis un forfait de programmation de trajectoire fibre, forfait non facturé sur Skyception, Atomic et Pulsar. Envoyez nos anciennes factures pour essayer d'avoir une réduction. De même pour la facturation d'usinage si jamais vous voulez un tube en deux parties, nous n'avons pas payé de frais supplémentaires sur les trois premières Fusées.

Note : Mateduc est capable de réaliser uniquement des tubes à diamètre interne multiple de 5 mm.

- Ailerons

Les ailerons jouent un rôle clef au cours du vol, car ce sont eux qui garantissent la bonne stabilité de la fusée durant son ascension. Après plusieurs simulations sur StabTraj, nous avons choisi de donner à nos ailerons une forme rectangulaire avec un profil de type NACA 0.010.

La première étape consiste à imprimer en 3D les ailerons (impressions en PLA).



Figure 8: ailerons

Ensuite nous superposons deux couches de carbone sur le moule en plastique à l'aide de résine époxy pour consolider la structure.

Vient ensuite le séchage qui est réalisé sous vide : nous laissons pendant 24h l'aileron drapé dans une poche en plastique hermétiquement fermée avec du mastic et nous faisons le vide en aspirant l'air présent dans la poche à l'aide d'une pompe à vide.



Figure 9: Séchage sous vide

Enfin, nous éliminons le surplus de carbone sur les bords à l'aide d'une Dremel et nous finissons par les poncer pour qu'ils soient les plus lisses et donc les plus aérodynamiques possible. Pour finir, nous y collons de magnifiques autocollants ananas.



Figure 10: Ailerons finaux intégrés

- Supports ailerons

Pour fixer les ailerons au corps, nous avons conçu et usiné des supports en aluminium que nous avons introduits dans les fentes des ailerons. Ces supports en « T » épousent la forme intérieure du corps de la fusée et viennent se fixer à l'intérieur des ailerons. Ainsi, lorsque les ailerons sont fixés au corps, les supports ne gênent pas l'écoulement de l'air comme pourraient le faire des équerres.

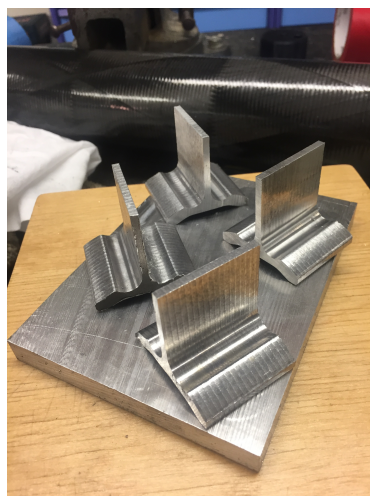


Figure 11: Supports ailerons

3 Expérience

3.1 Objectif de l'expérience

Pour la troisième année consécutive, LéoFly a eu pour objectif de contrôler le roulis d'une fusée grâce à un système de contrôle actif. Après deux ans de systèmes pneumatiques, nous avons décidé d'expérimenter un contrôle de roulis à l'aide de canards. Pour des raisons de sécurité, les canards sont couplés mécaniquement afin de ne générer que du roulis.

3.2 Déroulé de l'expérience

Notre fusée est propulsée par un Pro54, avec un temps de combustion de 3.6 s. L'expérience se mettra donc en marche en phase balistique, 4.5 s après le décollage. Si un roulis est observé par la centrale inertielle, celui-ci sera corrigé par une inclinaison des canards de 5 ou -5 degrés par rapport à l'axe vertical de la fusée. Afin d'être certain d'avoir la possibilité de tester le système, à tout moment du vol, si aucun roulis n'est mesuré pendant plus d'une seconde, les canards seront utilisés pour viser une certaine vitesse de rotation (1 tour/s). L'expérience tentera ensuite de corriger ce roulis pour prouver l'efficacité des canards.

En phase de propulsion, les servo-moteurs qui contrôlent les canards recevront en continu comme instruction de rester dans l'axe de la fusée. Ces servos sont cotés pour 20 kg de couple (calculé sur ce site), ils ne bougeront donc pas de manière incontrôlée pendant la phase de vol. Afin de contrôler l'expérience, nous utilisons un MPU6050 (centrale inertielle). Celui-ci est réglé pour mesurer une vitesse angulaire de ± 500 deg/s. Si on sort de la capacité de mesure du MPU6050, celui-ci envoie sa valeur maximale avec le bon signe, qui est la seule donnée qui nous intéresse pour actionner les canards. Le capteur a été calibré en utilisant une 3-axes à différentes vitesses de rotation de broche.

3.3 Résultats attendus de l'expérience

Afin d'estimer l'évolution de la vitesse de roulis durant la phase balistique, nous avons réalisé une simulation python modélisant l'impact des canards sur la vitesse de rotation. Nous avons donc étudié l'évolution de l'accélération angulaire en fonction du temps en sachant que la somme des couples exercés sur la fusée est égale à l'accélération angulaire multipliée par le moment d'inertie de la fusée. Nous considérons le couple des canards et le couple résistant des ailerons. Nous avons lancé plusieurs scénarios avec des vitesses initiales différentes.

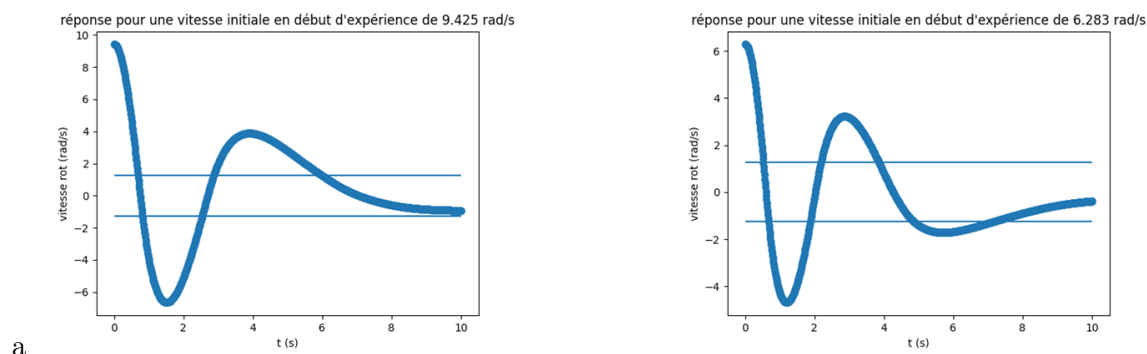


Figure 12: Résultats de simulations

3.4 Réalisation du rack de l'empennage mobile

Nous avons choisi de fixer chaque canard de l'empennage directement en sortie de rotor d'un servo-moteur. Les servo-moteurs utilisés sont les Amewi Standard servo 6221MG ayant un couple de 20 kg.cm. Chaque servo-moteur est alimenté par une LiPo 7.4 V 1000 mAh Conrad energy 1344143 25 C. Les supports des canards sont couplés mécaniquement par une pièce fixée sur le bas du rack. Lors de l'intégration du rack, les supports des canards sont enlevés dans le but de pouvoir faire coulisser le rack dans la fusée. Une fois le rack fixé, nous pouvons placer les supports des canards. La tête des servos a un trou fileté qui permet de tenir en compression le support de canard. Une fois les supports fixés, nous pouvons placer les canards.

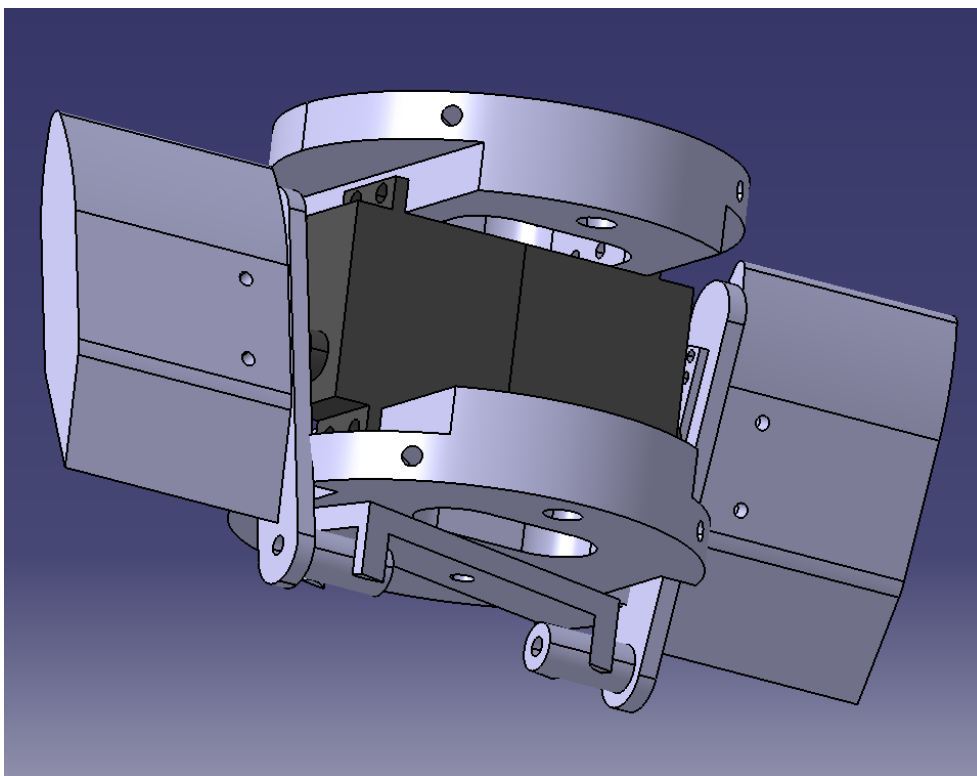


Figure 13: CAO du rack vue du bas avec les empennages inclinés à 15 degrés

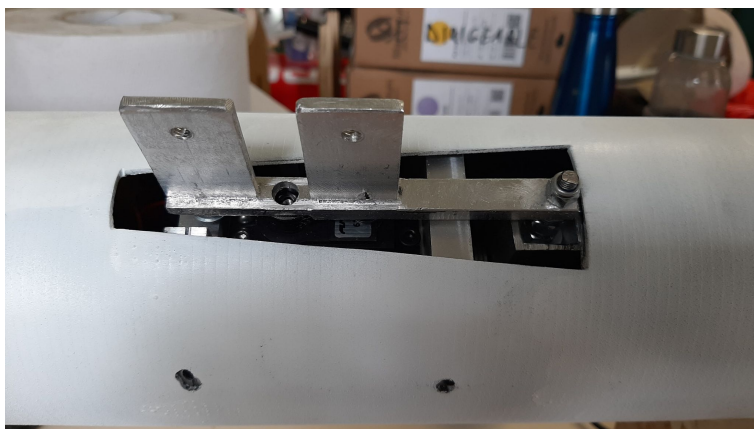


Figure 14: Intégration du support de l'empennage dans le rack

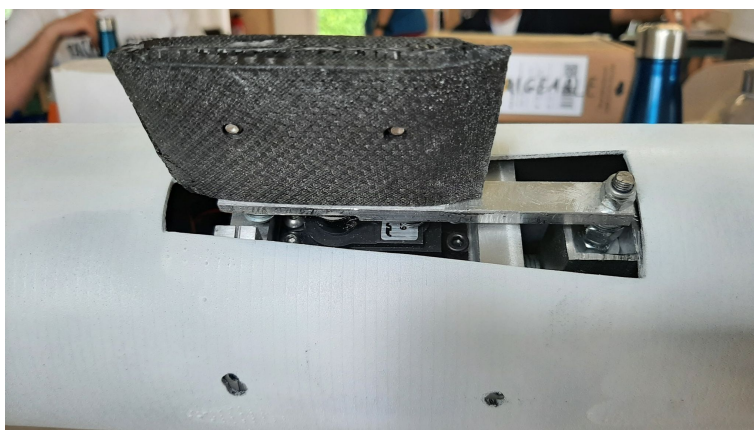


Figure 15: Intégration finale du rack



Figure 16: L'empennage mobile sur les épaules d'un Pierre qui n'a pas assez dormi

4 Déroulement du vol

La fusée a décollé le 20 juillet 2022 à 16:05, le ciel était parfaitement dégagé. La fusée a emprunté la trajectoire parabolique attendue avec une très bonne stabilité. Le parachute a été déployé à l'apogée. La fusée a atterri dans le champs de tir avec quelques dégâts sur l'un des ailerons.



Figure 17: $2\pi R$ en sortie de rampe

5 Analyse du vol

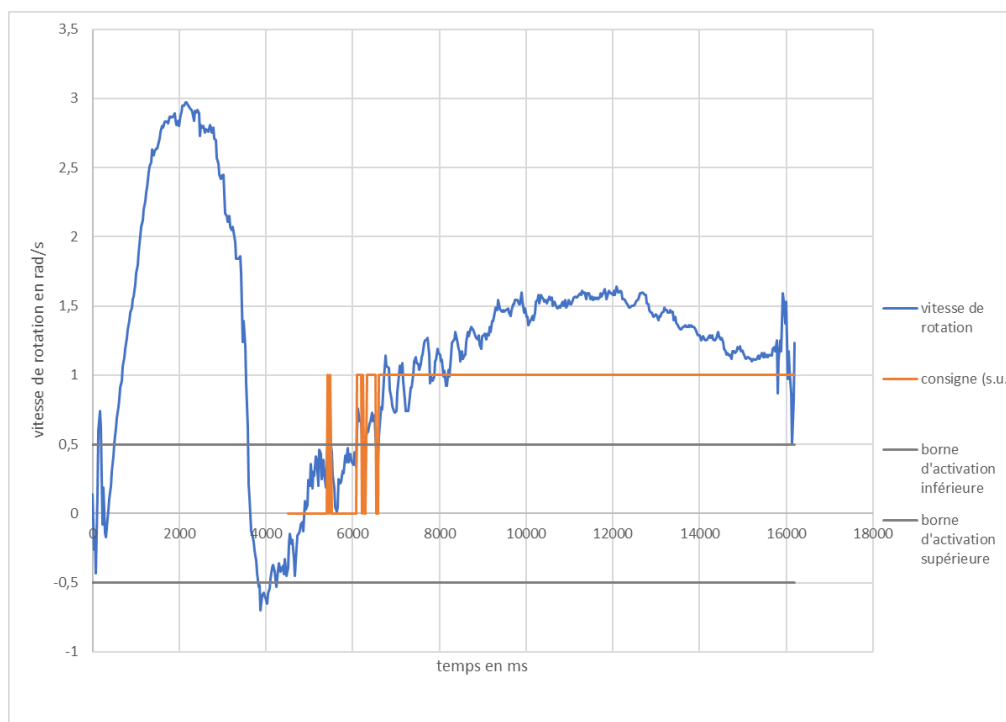


Figure 18: Données de vol

Commençons par analyser les données de vol entre 0 et 4500 ms. Cette période de temps correspond à la propulsion du moteur. Nous n'avons donc pas envoyé de consigne angulaire durant cette période. Nous pouvons observer une augmentation de la vitesse angulaire jusqu'à un tour par seconde vers deux secondes de vol, puis cette même vitesse rechuter. Nous avons observé cette même variation de vitesse angulaire sur notre ancienne fusée Pulsar. A l'époque, nous avons conclu que ce changement de vitesse aurait pu être dû au fait que Pulsar avait trois ailerons. Nous sommes forcés de constater que cette hypothèse n'est plus valable dans notre cas du fait de nos quatre ailerons. Nous supposons donc cette fois-ci que la variation de vitesse angulaire vient des imperfections de poussée du moteur. La seconde partie du vol commence à 4500 ms. A cet instant, la fusée est en chute libre, nous pouvons donc commencer le contrôle de roulis. Nous pouvons constater que la vitesse de rotation est quasiment nulle en début d'expérience. Au bout d'une seconde, la vitesse commence à augmenter suffisamment pour sortir des bornes d'activation du système. Nous n'arrivons cependant pas à constater un impact clair de la rotation de l'empennage sur la vitesse de rotation une fois la consigne angulaire envoyée. Une première hypothèse est que les ailerons n'ont pas réussi à pivoter. Cependant, nous étions capables de faire fonctionner le système une fois de retour au sol, sans changement de performance notable. Une deuxième hypothèse plus probable est que nous avons sous-dimensionné nos ailerons et l'angle d'inclinaison. De plus, nous n'avons pas pris le temps, avant le vol, de vérifier expérimentalement l'inclinaison des ailerons par rapport au tube, seuls de simples tests visuels ont été réalisés durant les qualifications. Un autre axe d'amélioration que nous avons noté est la taille importante des trous de l'empennage. Ces trous n'ont certainement pas aidé à améliorer la performance des ailerons. Une critique que nous pourrions apporter est le fait de ne pas avoir mesuré l'angle des ailerons en fonction du temps. Nous nous sommes contentés d'enregistrer la consigne envoyée aux servo-moteurs. Il aurait été intéressant de placer une caméra pour au moins vérifier la corrélation entre consigne et angle des ailerons.

6 Conclusion

Après deux fusex à contrôle de roulis via circuit pneumatique, ce projet a permis à l'association de commencer à explorer un nouvel axe de gestion du roulis. Bien que les résultats ne permettent pas de conclure sur le bon fonctionnement de l'expérience, la fusée a déjà permis de prouver que nous étions dans la capacité de concevoir et réaliser un empennage mobile. Cette fusée expérimentale va donc laisser à l'association de bonnes bases pour une hypothétique future itération de l'expérience.

7 Remerciements

Dans un premier temps, l'équipe $2\pi R$ aimerait spécialement remercier Planète Sciences, le CNES ainsi que tous les bénévoles pour l'organisation de cette édition 2022 du C'Space.

Un grand merci aux sponsors de LéoFly pour leur soutien.

Mentions spéciales aux différentes associations étudiantes présentes lors de cette édition, plus particulièrement Top Apéro et ApéroIpsa.

Sans oublier plein de bisous à tous les membres du bureau qui nous ont aidé sur le projet < 3 et plus particulièrement à : Alexandre (*t'as vu on a fait un nominal*), Aurelie, Maxime, Noémie.



Figure 19: L'équipe à la remise des diplômes de vol, dans un état dit heureux car le projet est fini

Merci Jean-Loup

8 Annexes

```
1 #include <stdio.h> // standard library for input / output
2 #include <string.h> // functions for string operations
3 #include <ctype.h> // functions that operate on single byte characters
4 #include <Adafruit_MPU6050.h>
5 #include <Adafruit_Sensor.h>
6 #include <Wire.h>
7 #include <SPI.h>
8 #include <SD.h> // Inclure la librairie SD
9 #include <Servo.h>
10 #define SDPIN 10 // Chip Select du lecteur SD
11
12 const int jack = 7;
13 const int led_bleu = 6;
14 int maxB = 102;
15 float theta0_H = 88; //deg
16 float theta0_A = 85; //deg
17 float theta_max = 5; //deg
18
19 float t_start = 4500; //s debut xp (fin propu)
20 float t_end = 16200; //s end
21 float last_out = t_start;
22
23 float seuil_activation = 0.5;
24
25 float target = 0;
26
27 File myFile;
28
29 Adafruit_MPU6050 mpu;
30 sensors_event_t a, g, temp;
31
32 int etat_jack = 0;
33
34 long t0, t1, t_decollage;
35
36 void diode(int periode, int pin) //on fait clignoter la diode
37 {
38     long t = millis();
39     if(digitalRead(pin) == LOW){
40         if(t%(2*periode) < periode){
41             digitalWrite(pin,HIGH);
42         }
43     }
44     else{
45         if(t%(2*periode) >= periode){
46             digitalWrite(pin,LOW);
47         }
48     }
49 }
50
51 void setup() {
52     // put your setup code here, to run once:
53     Serial.begin(9600); // debut de la communication serie
54
55     pinMode(led_bleu, OUTPUT);
56     pinMode(A1, OUTPUT);
57
58     pinMode(SDPIN, OUTPUT);
```

```

59 pinMode(jack, INPUT);
60
61
62 if (!mpu.begin()) {
63     Serial.println("Failed to find MPU6050 chip");
64     while (1) {
65         do{
66             digitalWrite(led_bleu, HIGH);
67             delay(100);
68             digitalWrite(led_bleu, LOW);
69             delay(50);
70             digitalWrite(led_bleu, HIGH);
71             delay(100);
72             digitalWrite(led_bleu, LOW);
73             delay(500);
74         }while(1);
75     }
76 }
77
78 mpu.setAccelerometerRange(MPU6050_RANGE_8_G);
79 mpu.setGyroRange(MPU6050_RANGE_500_DEG);
80
81 Serial.println("Test de la connection du dispositif ...");
82
83 if (!SD.begin(SDPIN)) {
84     Serial.println("lecteur SD : failed!");
85     do{
86         digitalWrite(led_bleu, HIGH);
87         delay(100);
88         digitalWrite(led_bleu, LOW);
89         delay(50);
90         digitalWrite(led_bleu, HIGH);
91         delay(100);
92         digitalWrite(led_bleu, LOW);
93         delay(500);
94     }while(1);
95 }
96 int i = 0;
97
98 while(SD.exists("data" + String(i) + ".txt")){
99     i++;
100 }
101
102 myFile = SD.open("data" + String(i) + ".txt", FILE_WRITE);
103 myFile.print("data" + String(i) + ".txt\n");
104
105 digitalWrite(led_bleu, HIGH);
106 }
107
108 void loop() {
109     float cons_H = theta0_H;
110     float cons_A = theta0_A;
111
112     //allumage fusée
113     Serial.print("ready to volder");
114
115     do{
116         etat_jack = digitalRead(jack);
117         delay(10);
118     }while(etat_jack == LOW);
119

```

```

120 t_decollage = millis();
121
122 Servo servo_H;
123 Servo servo_A;
124
125 servo_H.write(theta0_H);
126 servo_A.write(theta0_A);
127
128 servo_H.attach(5);
129 servo_A.attach(3);
130
131
132 Serial.print("decollage");
133
134 do{
135     //ecrire les donnees de vol
136     t0 = t1;
137     t1 = millis();
138     mpu.getEvent(&a, &g, &temp);
139     //angle1 = 0.98 * (angle1 + float(gy1) * 0.01 / 131) + 0.02 * atan2((double)ax1,
140     (double)az1) * 180 / PI;
141     myFile.print(t1 - t_decollage);
142     myFile.print(",");
143     myFile.print(a.acceleration.x);
144     myFile.print(",");
145     myFile.print(a.acceleration.y);
146     myFile.print(",");
147     myFile.print(a.acceleration.z);
148     myFile.print(",");
149     myFile.print(g.gyro.x - 0.01);
150     myFile.print(",");
151     myFile.print(g.gyro.y + 0.1);
152     myFile.print(",");
153     myFile.print(g.gyro.z - 0.01);
154     myFile.print(temp.temperature);
155     myFile.print(",");
156     myFile.print(target);
157     myFile.print(",");
158
159     if(t1 - t_decollage > t_start){
160         //doit donner l'angle des servos
161         if(abs(g.gyro.z - 0.01 - target) > seuil_activation){
162             last_out = t1;
163             if(g.gyro.z - 0.01 - target < 0){
164                 myFile.print("-1");
165                 cons_H = theta0_H + theta_max;
166                 cons_A = theta0_A + theta_max;
167             }
168             else{
169                 myFile.print("1");
170                 cons_H = theta0_H - theta_max;
171                 cons_A = theta0_A - theta_max;
172             }
173         }
174         else{
175             myFile.print("0");
176             cons_H = theta0_H;
177             cons_A = theta0_A;
178
179             if(t1 - t_decollage - last_out > 1000){

```

```

180     target = 3.141562;
181   }
182 }
183 diode(100, led_bleu);
184 }
185 else{
186   //phase propu
187   myFile.print("9999");
188   diode(50, led_bleu);
189 }
190
191 servo_H.write(cons_H);
192 servo_A.write(cons_A);
193
194 myFile.print("\n");
195 t0 = millis();
196 delay(20);
197
198 }while(t0 - t_decollage < t_end);
199
200 myFile.close();
201
202 servo_H.write(theta0_H);
203 servo_A.write(theta0_A);
204
205 digitalWrite(led_bleu, HIGH);
206
207 while(1){
208   delay(3600000);
209 }
210 }

```

Listing 1: Code Arduino de l'expérience

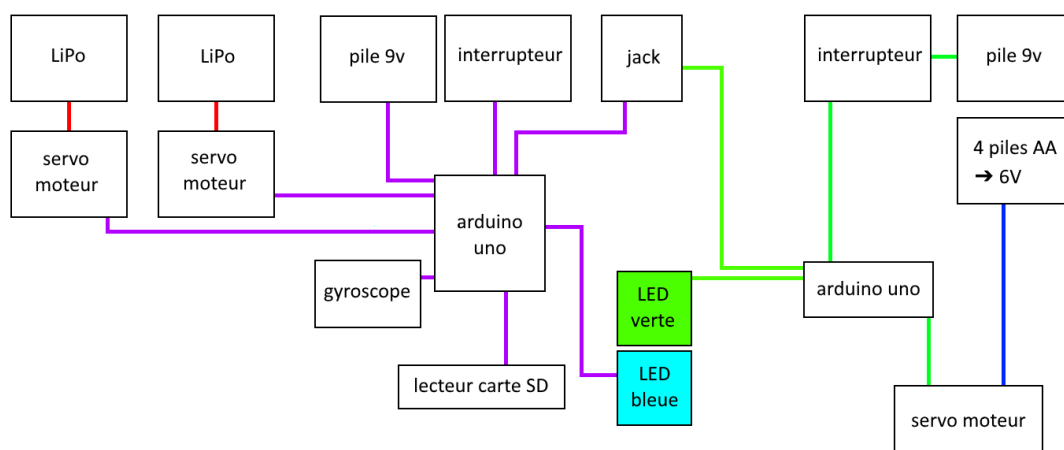


Figure 20: Plan de câble global de la fusée.