

SPACIETA

Projet Tonnerre de Brest

Rapport de Projet



Année : 2021-2022

Chef de projet : Louis-Maël MERLET

Membres du projet : Mathieu BEOT, Anna BRYKMAN, Lucas DUCROCQ, Elouan PETEREAU et Marc POGGI

Table des matières

I-Introduction	3
II-Expériences embarquées	4
III-Conception mécanique de notre fusée.....	5
III-1 Vue d'ensemble de notre fusée.....	5
III-2 Partie propulsion.....	6
IV-3 Corps de la fusée	7
III-4 Ejection parachute	8
IV-Conception du système électronique de notre fusée	11
IV-1 Architecture électronique du circuit électrique	11
IV-2 Programme informatique de l'ordinateur de bord.....	13
V-C'space.....	15
VI-1-Ajustement et modification faites au C'space	15
V-2 Vol de la fusée	15
VI-Résultat de l'expérience	17
VII-Conclusion.....	18

I-Introduction

Le club Spacieta participe depuis 2005 à la campagne de lancement du C'space organisée par le CNES chaque été. Le club a déjà lancé 10 fusées par le passé. Il conçoit aussi bien des mini-fusées que des fusex. Cette année, le projet Tonnerre de Brest a été l'occasion pour nous de concevoir une mini-fusée pour réaliser une mesure de pression. La construction de cette mini-fusée a débuté dès septembre 2021. Haute de 1m20 et pesant près de 2kg, elle a été lancée avec succès le 21 juillet 2022 sur le terrain du 1^{er} régiment de parachutistes à Tarbes. Dans la suite de ce rapport, nous allons donc détailler la structure mécanique ainsi que le circuit électronique de notre fusée. Nous évoquerons également le déroulement du vol de notre fusée ainsi que l'expérience embarquée dans celle-ci.

II-Expériences embarquées

L'expérience qui est embarquée dans notre fusée est une mesure de pression. A cet effet, nous avons acheté et implémenté un capteur de pression au sein de notre système électronique. Une deuxième expérience devait initialement être embarquée dans notre fusée. Cette expérience consistait en la réalisation d'une vidéo du vol de notre fusée à partir d'une caméra embarquée dans celle-ci. La vidéo devait nous permettre de comparer les données de vol de celle-ci. Cependant, le temps nous a manqué et nous avons préféré nous consacrer à la finalisation de la fusée et de la première expérience. Nous ne voulions pas prendre le risque de ne pas achever le projet à cause de la deuxième expérience.

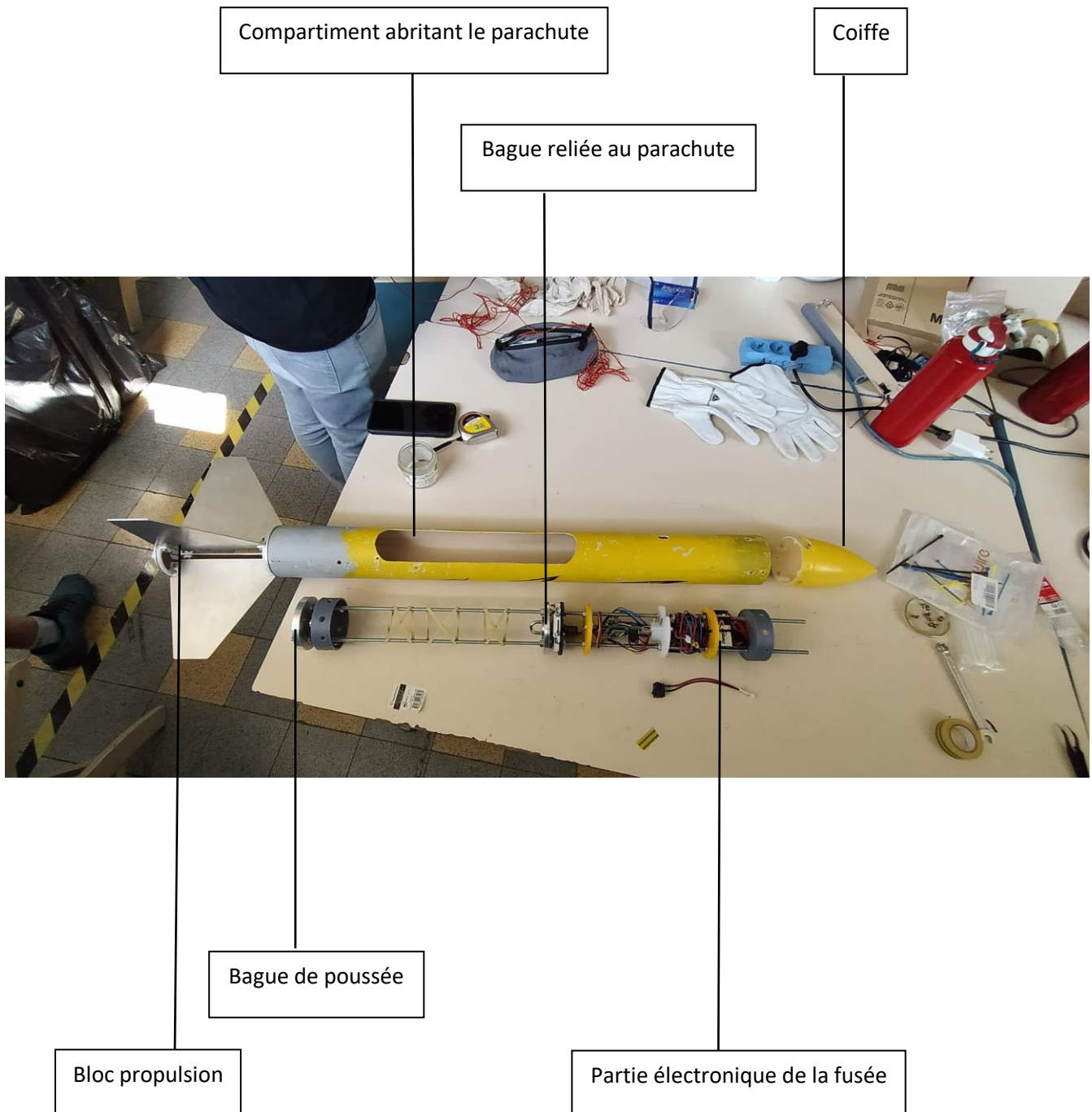
III-Conception mécanique de notre fusée

III-1 Vue d'ensemble de notre fusée

Notre fusée peut être décomposée en 3 parties :

- Une partie propulsion permettant le maintien du propulseur
- Une partie centrale qui contient le parachute et l'électronique permettant de l'éjecter et de réaliser l'expérience
- Une partie coiffe

Notre fusée pouvait être ainsi décomposée comme suit :



III-2 Partie propulsion

Le propulseur de notre fusée est un « Pandora » Pro-24g. Il s'agit du moteur généralement attribué pour les projets de mini-fusée lors de la campagne de lancement du C'space. Notre fusée devait donc pouvoir embarquer ce type de propulseur. Afin d'économiser de la masse, nous avons décidé d'effectuer un centrage directement par les ailerons. Cela nous évite d'utiliser des bagues en aluminium pour centrer le propulseur. Elles auraient alourdi la fusée. De plus, le centrage par les ailerons nous permet de fixer le corps et la bague de retenue aux ailerons. Cela limite donc le nombre de pièces (et par conséquent la masse) de notre bloc propulsion. Le système est également plus simple et permet un accès direct au propulseur.

Le diamètre des bagues inférieure et supérieure de notre bloc propulseur est de 75 mm. Sur la bague inférieure, nous avons décidé de fixer une bride de retenue pour maintenir le propulseur pendant le vol. Cette bride de retenue est constituée d'une languette maintenue par deux boulons autour d'une vis. Nous avons choisi ce système relativement simple car il nous permet d'ajuster la position de la languette métallique et ainsi de régler la pression que nous voulons appliquer contre la collerette du propulseur. Nous avons monté les ailerons de sorte à laisser un léger jeu (environ 1mm) entre le propulseur et ces derniers. Ce jeu a pour but d'éviter un problème lié à un gonflement du propulseur lors du vol.



Figure 2 : vue d'ensemble du bloc propulsion

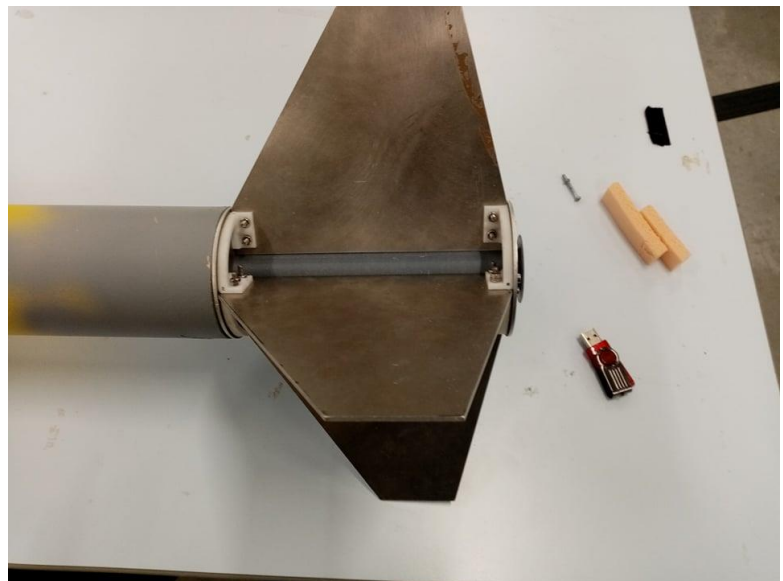


Figure 1 : validation du bloc propulsion avec une maquette d'un pro 24g

La bague de poussée ne faisait pas proprement partie du bloc propulseur de notre fusée. Elle était fixée au corps de la fusée grâce à notre système d'écrous et de tiges (nous y reviendrons plus tard). Elle présentait un creux circulaire et plat en son fond dans lequel venait se loger le propulseur. Ce creux circulaire a pour fonction de reprendre la poussée du propulseur lors de la phase de vol. Nous n'avons pas eu à prendre en compte le dépotage du propulseur car nous en avons un de type « Pandora » Pro-24g. Le propulseur vient donc directement s'emboîter contre la poche circulaire faite dans la bague de poussée. La bague de poussée est reliée au corps de la fusée grâce à 2 tiges qui passaient à travers

ladite bague. Elle était fixée aux tiges par 4 boulons. La géométrie que nous avons donc utilisée est la géométrie classiquement adoptée pour une bague de poussée d'une mini-fusée.

IV-3 Corps de la fusée

Le corps de la fusée est la partie de la fusée qui embarque le parachute et l'intégralité du système électronique. Nous avons fait le choix de fixer l'intégralité de nos bagues le long de deux tiges métalliques. Cela nous permet d'ajuster facilement leur position par rapport au tube de notre fusée. Nous avons donc moins de contraintes par rapport à la peau de notre fusée.

Pour relier ce treillis et cet enchaînement de bagues à notre corps, nous avons créé deux bagues chargées de faire la jonction entre le treillis et le corps de la fusée. Ces bagues sont situées aux deux bouts de notre fusée pour rendre possible le montage manuel des boulons et des vis permettant leur fixation au tube. Elles présentent 4 trous latéraux qui servent à la fixation du corps. Les bagues de fixation en question sont également fixées le long de deux tiges. Cela assure la liaison avec le corps de notre fusée. Le contact entre le tube et la bague de fixation est un contact ponctuel ce qui n'est pas optimal en termes de contraintes exercées contre la paroi. Cependant, ce n'est pas un problème dans notre cas et nous avons choisi de laisser un tel contact pour des raisons de simplicité.

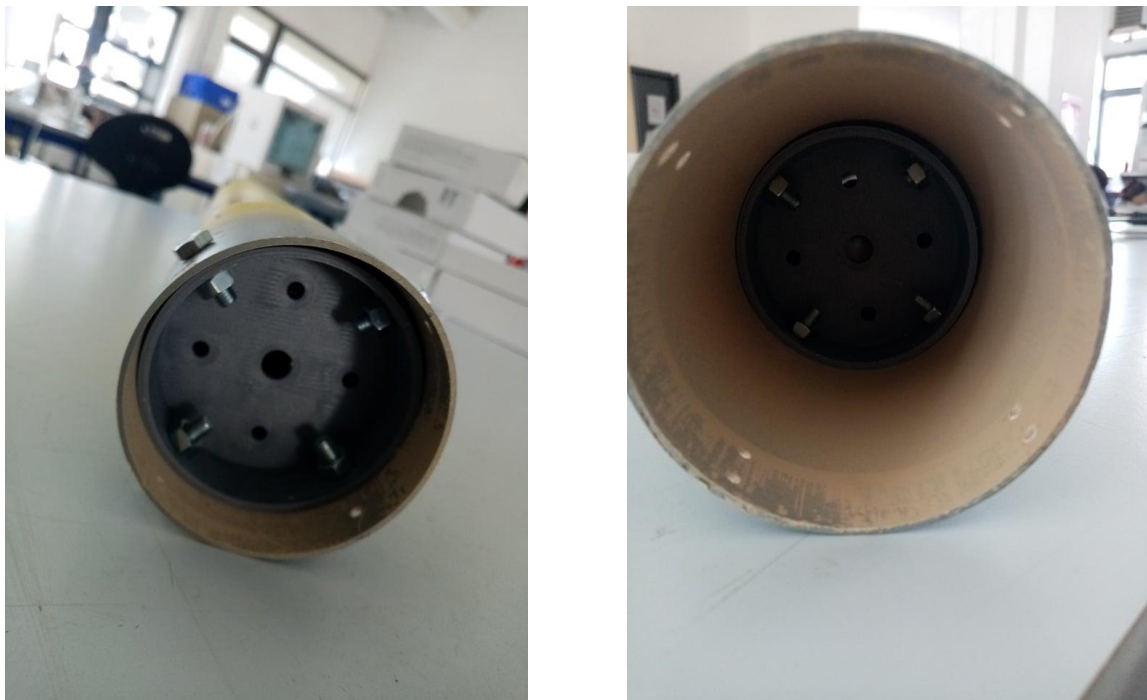


Figure 3 : Système de fixation utilisé pour relier le tube aux tiges de notre fusée

La bague parachute était, tout comme la bague de poussée, faite en aluminium. La bague de poussée a été fabriquée en aluminium afin de garantir que le propulseur ne l'endommage pas lors du vol. La bague parachute a été usinée dans ce même matériau pour s'assurer que le parachute ne viendrait pas arracher la bague lors de son éjection. Nous avons installé la bague parachute en dessous de la bague où est fixée le servo-moteur pour l'éjection du parachute. Un anneau est vissé sur celle-ci pour permettre de le maintenir.

Les bagues embarquant l'électronique de notre fusée se situent au-dessus du compartiment abritant le parachute. Elles ont été imprimées en 3D ou bien usinées dans un bloc de plastique. Les parties imprimées en 3D l'ont été en ABS. Nous n'avons pas utilisé de PLA car ce matériau peut facilement fondre à des températures relativement peu élevées. L'ABS présente également l'avantage d'avoir une masse volumique moins élevée que celle du PLA. L'ensemble de ces bagues ont un orifice de 1 cm en leur centre afin de faire passer les différents câbles électriques de notre système. La fixation aux tiges s'effectue de manière analogue à celle des autres bagues.

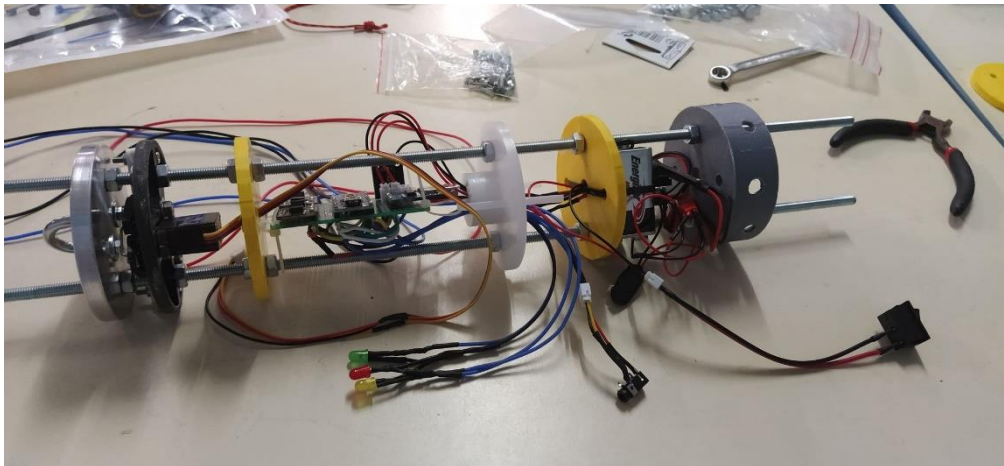


Figure 4 : vue d'ensemble du compartiment embarquant l'électronique de notre mini-fusée

Au-dessus du corps, nous se trouve la coiffe de notre fusée. Haute de 15 cm, elle était vide et est maintenue par 4 vis au tube. Une sorte « d'auto-taraudage » permet de fixer la coiffe directement. Le corps en PVC de notre fusée présentait plusieurs orifices. On retrouve ainsi un trou pour faire passer la prise jack et un autre trou pour faire passer le capteur de pression. Un autre trou a aussi été percé dans le tube pour permettre le passage de l'interrupteur permettant d'allumer l'ordinateur de bord.

III-4 Ejection parachute

Nous avons fait le choix d'utiliser un système d'éjection utilisant un servo-moteur. Celui-ci repose sur un système de mords qui s'articule au moment de l'éjection du parachute grâce à un servo-moteur présentant en son extrémité une languette. Cette languette est reliée de part et d'autre à deux broches. Ces deux broches sont chacune reliées à un mord. Une languette est pressée et maintenue en position entre ces deux mords. Elle est directement reliée à la trappe permettant l'éjection du parachute.

Les ressorts sont comprimés contre la trappe. Ils ne provoquent pas l'éjection de celle-ci car la trappe est reliée à la languette dont la position est maintenue grâce à la pression exercée par les mords. Lorsque le servo-moteur est activé et que son extrémité tourne, les mords se relâchent et la languette n'est plus maintenue en position. Ainsi, plus rien ne maintient la trappe au corps de la fusée. Les deux ressorts pressés contre la paroi de la trappe se détendent alors car la contrainte exercée par le maintien en position n'est plus présente. Ils poussent alors la trappe et le parachute peut sortir.



Figure 5: vue du système d'éjection de la trappe avec les deux ressorts. La languette est absente sur la photo

Néanmoins, la languette maintenue par les mords n'aurait pas suffi à retenir seule la trappe. Pour cela, nous avons installé des crochets en glissière avec les tiges dans le bas de l'ouverture. De plus, une cornière était visée à la trappe et venait s'emboîter dans une encoche. Ces deux systèmes combinés nous permettaient d'assurer le maintien de la trappe avant l'éjection du parachute.



Figure 6: vue d'ensemble du compartiment abritant le parachute

Le parachute est équipé d'un anneau anti-torche afin d'éviter que les suspentes de celui-ci ne s'entremêlent lors de l'éjection. Celui-ci a été fabriqué manuellement à partir d'un film d'aluminium.

Pour éviter que le parachute ne glisse lors de l'éjection, nous avons inséré un disque sectionné bleu (voir figure 7) à la base du compartiment où se loge le parachute.



Figure 7 : vue de la trappe et du système d'éjection avec le parachute plié en accordéon

IV-Conception du système électronique de notre fusée

IV-1 Architecture électronique du circuit électrique

Les schémas suivants présentent l'architecture électronique globale de notre système. A noter que la prise Jack de notre fusée est absente sur ces derniers.

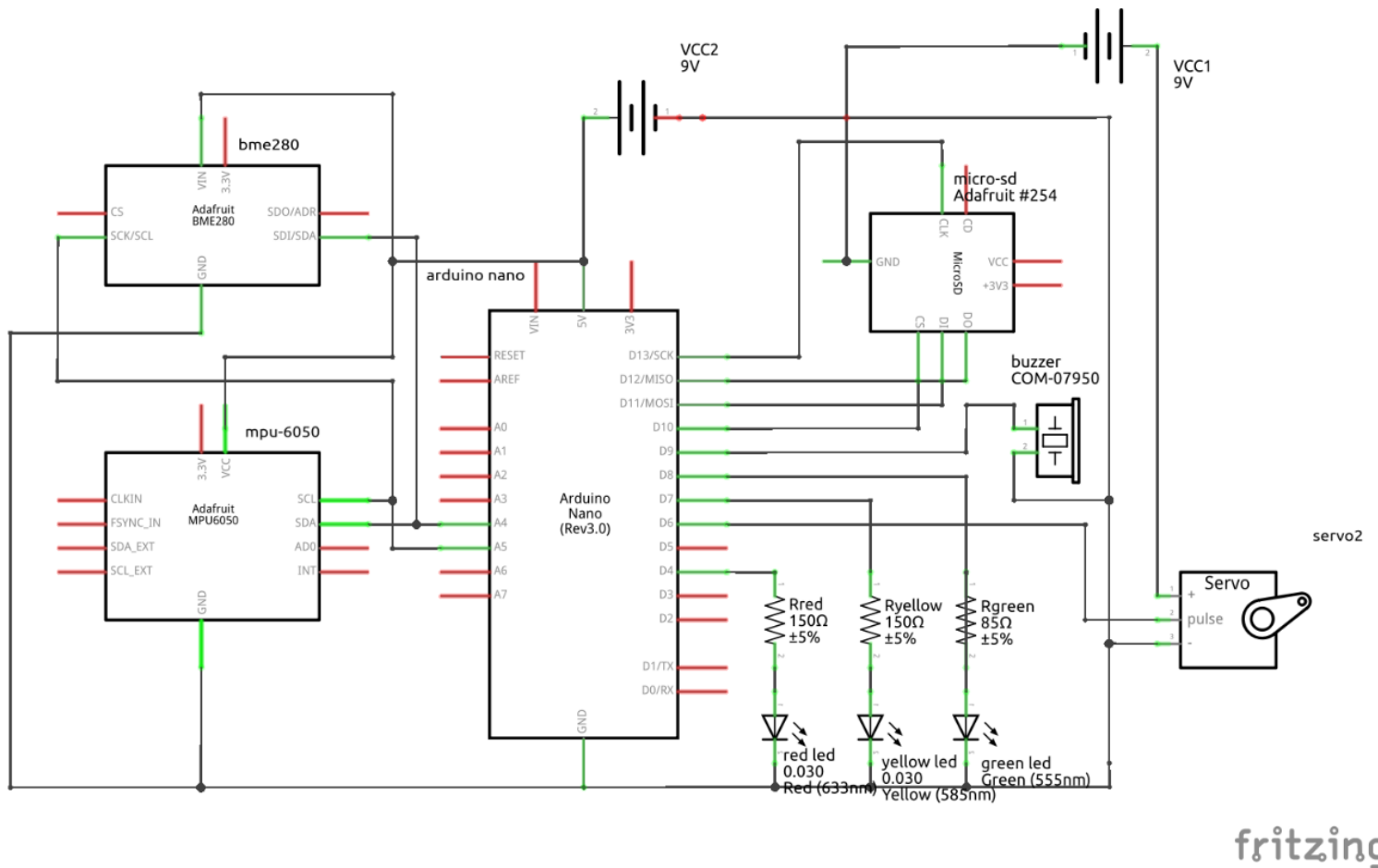


Figure 8 : circuit électrique de notre fusée

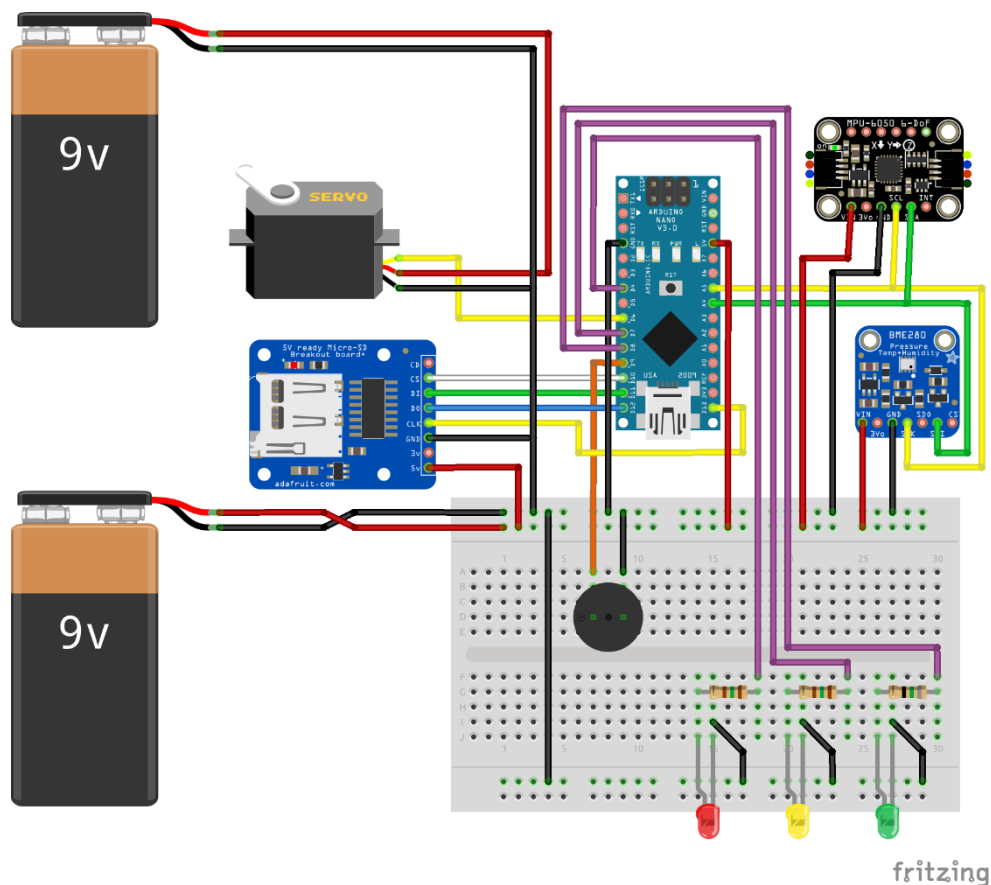


Figure 9 : représentation graphique du circuit électrique de notre fusée

Nous avons installé un interrupteur accessible au niveau du corps de notre fusée pour allumer ou éteindre l'ordinateur de bord de celle-ci. Pour alimenter notre système, nous avons fait le choix d'installer deux alimentations électriques distinctes. En effet, nous craignons qu'une seule alimentation électrique ne soit pas suffisante pour alimenter l'intégralité du système électronique pendant la phase de vol. Le servo-moteur n'aurait alors pas pu tourner suffisamment et la trappe (et donc le parachute) n'aurait pas été éjectée. La mini-fusée aurait alors fait un vol balistique. Nous avons donc alimenté le servo-moteur avec une alimentation électrique distincte du reste du circuit électronique. Les deux alimentations électriques sont des piles 9V. Le cœur de notre système est une carte Arduino-nano dans laquelle a été implémentée le code de notre système. Elle est reliée aux différents composants de notre système. Ainsi, elle permet l'allumage des LED et l'enregistrement des données sur une carte micro SD. L'Arduino-Nano est reliée à l'altimètre (BME-280 sur le schéma) et à la centrale inertielle (MPU-6050 sur le schéma) afin de pouvoir transférer les données à la carte micro SD. Enfin, elle est branchée au servo-moteur pour permettre la rotation de l'extrémité de celui-ci lors de l'éjection parachute.

Lors de l'implémentation de notre système, nous avons fait attention à utiliser de petites résistances pour que les LED soient visibles de jour. La procédure d'allumage des LED pour la phase de test est classique. Une LED verte signifie que l'intégralité des capteurs et composants fonctionne correctement. Une LED rouge signifie que l'un des composants est défectueux. Comme on peut le voir

sur le schéma, nous avons rajouté un buzzer pour nous assurer du bon fonctionnement du système dans le cas de figure où le clignotement de la LED verte n'aurait pas été aperçu. Une fois le système vérifié, le rôle des LED change pour s'adapter à la phase de vol. La LED verte est allumée initialement en continu mais sans bips. Lorsque la fusée est en phase d'ascension la LED orange s'allume et la LED rouge s'allume lorsque le parachute est éjecté.

Nous avons également choisi un capteur de pression compatible avec notre vol. La précision du capteur est en effet de plus ou moins 1hPa et permet une mesure de pression entre 300 et 1100hPa (soit 0,3 à 1,1 bars). Comme nous ne sommes pas allés pas au-delà de 100m d'altitude, nous sommes sûrs que notre fusée n'est pas passée en dessous d'un niveau de pression de 0,3 bar, la pression théorique à 100 m étant normalement de 0,99 bar à 25°C (contre 1,01 bars au niveau de la mer). La gamme de températures de fonctionnement du capteur est de -40°C à 85°C ce qui est tout à fait compatible avec le vol de notre fusée. Le capteur renvoie la valeur de la pression. Cette mesure est par la suite transformée en altitude. Une centrale inertielle est présente dans notre système. Elle mesure la rotation et l'accélération suivant 3 axes et détecte également le décollage de la fusée.

Le système d'éjection repose sur la détection de l'apogée à l'aide des données de vol obtenues grâce à la centrale inertielle et à l'altimètre. Un système se servant d'un « timer » et d'une interruption logicielle sur le TIMERO de la carte Arduino a été intégré en « backup » au cas où le système principal ne fonctionnerait pas. C'est d'ailleurs ce système qui a enclenché l'ouverture du parachute. En effet les critères pour l'ouverture du parachute à partir des données de vol étaient trop restrictifs. Ils reposaient notamment sur une altitude minimale à atteindre. Cette attitude minimale, basée sur l'apogée théorique, n'a jamais été atteinte. Nous reviendrons sur ce point par la suite.

IV-2 Programme informatique de l'ordinateur de bord

L'ordinogramme de notre système est présenté à la page suivante. Il s'agit d'une version qui détaille de manière simplifiée le fonctionnement des codes implémentés dans notre circuit électronique. Il permet de se représenter la logique existante derrière les différentes lignes de code programmées.

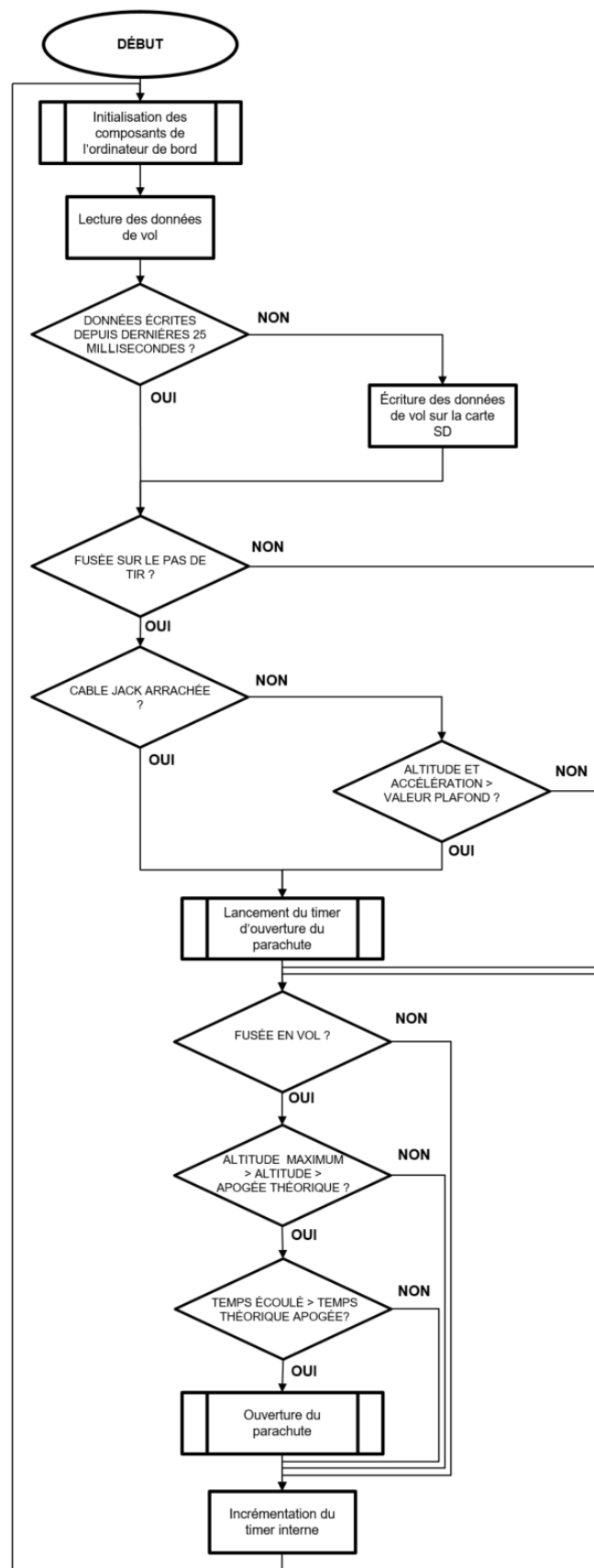


Figure 10 : ordinogramme de notre ordinateur de bord

V-C'space

VI-1-Ajustement et modification faites au C'space

Lorsque nous sommes allés au C'space, notre fusée n'était pas encore complètement achevée. Nous disposions du circuit électronique et de la majorité de la structure physique de notre mini-fusée. Cependant, ils nous restait à faire plusieurs ajustements avant le lancement. Le tube de notre fusée a ainsi été usiné pour permettre le passage de l'interrupteur et des LEDs de notre système électronique. Les ailerons jugés coupants ont été ponçés et un disque bleu (évoqué précédemment) a été rajouté.



Figure 11 : La mini-fusée avant la phase de test

V-2 Vol de la fusée

Une fois la fusée terminée, notre équipe est allée voir le personnel de Planète Sciences afin de passer les tests pour la qualification. Ceux-ci se sont déroulés avec succès et notre équipe c'est dirigée vers la rampe de lancement. Le parachute a été plié en « accordéon » puis embarqué dans la fusée. Cependant, peu avant le lancement, la trappe pour l'éjection de notre parachute s'est ouverte. Les deux membres de notre projet se sont alors aperçu que le servo-moteur n'avait plus de puissance électrique et qu'il fallait le changer. Le servo-moteur a ainsi été remplacé et nous avons repassé avec succès les qualifications. La fusée a alors été lancée le 21 juillet à 15 h.



Figure 12 : Tonnerre de Brest lors de son lancement

Notre fusée a donc été lancée avec une vitesse initiale de 22 m/s. Le vol a duré une quarantaine de secondes. Le parachute de notre fusée s'est ouvert et « Tonnerre de Brest » a effectué un vol nominal. Son apogée a été atteinte au bout de 5,8 s et la trappe c'est ouverte à 7s. L'altitude maximale est de 75 m. Bien que le vol ait été nominal, nous pouvons tout de même mentionner quelques petits problèmes lors de celui-ci. L'altitude atteinte a été relativement faible et en dessous de ce qui était prévu (128 m). Selon les pyrotechniciens de Planètes sciences, le moteur Pandora aurait pris un « coup de chaud » à cause des températures particulièrement élevées lors du C'space. Ces performances en auraient été préalablement affectées. Cela pourrait expliquer la différence importante entre ce qui était prévu et ce qui a été observé en ce qui concerne l'altitude. De plus, la trappe a été éjectée par la sécurité au bout de 7 s. La fusée a été retrouvée en bon état. Seules quelques pièces semblent s'être légèrement désolidarisées du corps. Une partie des pièces semble même pouvoir être réutilisable. Les données mesurées par nos capteurs ont également pu être récupérées.



Figure 13 : Tonnerre de Brest après son vol nominal

VI-Résultat de l'expérience

Nous avons récupéré les données de notre fusée. Nous avons alors obtenu les courbes suivantes pour les données de vol :

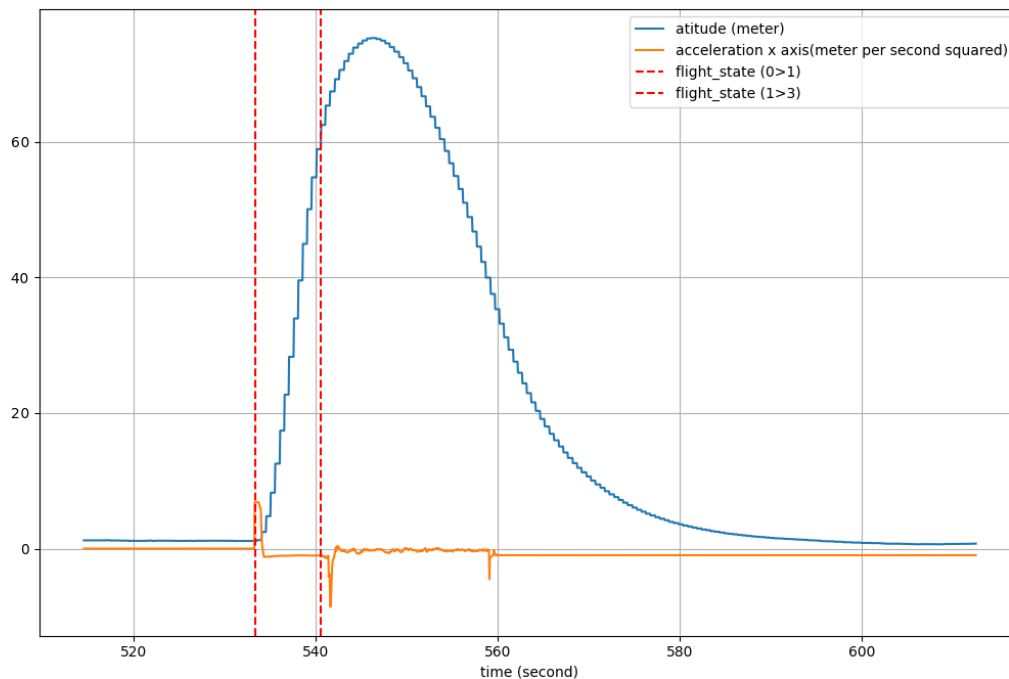


Figure 14 : Données de vol récoltées

Le graphique montre la progression de l'altitude en bleu et en fonction du temps. Nous pouvons retrouver en orange l'évolution de l'axe x, qui était l'axe de flèche de la fusée. Les traits rouges représentent les changements d'état de l'ordinateur de bord. Le passage à l'état 0 vers 1 correspond à la détection du décollage par le câble jack et celui à l'état 1 vers 3 correspond à l'ouverture du parachute par le timer. On notera que sur ce graphe, l'origine du temps n'est pas à 0s mais à 535s. Cela s'explique par le fait que le système électronique a été activé peu avant le vol. Le « timer » commençait déjà à mesurer le temps écoulé. Une fois que nous avons l'altitude, nous pouvons déduire la pression et tracer l'évolution de celle-ci. Grâce à la formule fournie dans la notice de fonctionnement du capteur, nous pouvons remonter à la valeur de la pression à partir de la hauteur mesurée. L'altitude maximale relevée est de 75 m ce qui est bien inférieure à la valeur théorique qui était de 128 mètres.

VII-Conclusion

Le projet «Tonnerre de Brest » fut l'occasion pour 6 membres du club Spacieta de construire une mini-fusée. Celle-ci a effectué un vol nominal et a récolté des données que nous avons pu exploiter par la suite. Plusieurs améliorations pourraient cependant être apportées à notre fusée. La masse de la fusée aurait put être allégée et les fixations des différents composants améliorées. Ce projet a cependant été un succès et s'est terminé sur un vol nominal de notre fusée. Il permettra certainement au club Spacieta de mieux former les nouveau venus.