

UE Pro - Projet d'étude n°68

Récupération d'une minifusée sans parachute

Rapport Final



Membres de l'équipage :

BATAILLE Bénédicte
JURAIN Théo
MERROUCHE Hugo
MOLLO Richard
ROBBE Arthur
VILLEDEU de TORCY Nicolas

Tuteurs de Projet :

CHOUVION Benjamin
GILLOT Frédéric
LENOIR David
PIERROU Ariane

Résumé

La récupération de fusées est aujourd'hui un sujet en plein essor. Dans ce cadre, le club Centrale Lyon Cosmos développe depuis plusieurs années un projet de récupération de mini-fusée sans parachute. La récupération est alors effectuée en imitant le principe des samares (graines d'érable en forme d'hélicoptère). Celles-ci tournent sur elles-mêmes afin de ralentir leur chute. La mini-fusée développée au cours de ce projet possède donc des pales, qui se déploient à l'apogée, et ralentissent sa chute en l'entraînant en rotation sur elle-même et créant une portance. Les pales en PVC, fixées sur le corps en carton à l'aide de charnières en acier, sont inclinées par rapport à l'horizontale d'un angle de 10° , ce qui garantit la rotation de la fusée. Elles sont maintenues fermées lors de l'ascension puis libérées par le système de libération. Ce dernier se compose d'une roue dentée, qui vient s'insérer dans des crochets fixés au bout des pales, et qui en tournant les libère. Un système de fils s'enroulant autour d'une bobine placée sous la roue dentée permet de garantir l'ouverture simultanée des pales. La rotation de l'ensemble du système de libération est contrôlée par l'électronique embarquée. Une carte électronique pilote un servomoteur, et actionne celui-ci 6.7s après le décollage (temps calculé grâce à un logiciel pour l'apogée). Enfin, les liaisons entre les différentes pièces de la fusée sont réalisées par impression 3D. L'assemblage de la fusée est presque terminé, son lancement s'effectuera mi-juillet, ce qui permettra de valider la récupération de la fusée sans parachute.

Summary

The rocket recovery is nowadays a booming topic. Accordingly, the Centrale Lyon Cosmos club has been developing for several years a mini-rocket recovery project without parachute. The recovery is then done by imitating the movement of falling maple seeds (seeds with a helicopter shape). These ones spin on themselves to slow down their fall. The mini-rocket developed in this project therefore includes blades, that deploy at the apogee, and slow its fall by setting the rocket in rotation and creating lift. The PVC blades, tethered on the cardboard core with iron hinges, are inclined at 10° from the horizontal, which ensure the rocket rotation. They are maintained during the ascension before being loosed by the releasing system. The latter is made of a toothed wheel, which holds the blades through hooks attached to the tip of them, and which releases the blades by spinning. A string system, winding around a reel situated below the toothed wheel, ensures simultaneous opening of the blades. The spinning of the whole releasing system is performed by the onboard electronics. An electronic card controls a servomotor, and activates it 6.7s after the take-off (time of the apogee calculated by an external software). Finally, the links between the different pieces of the rocket are 3D printed. The assembly of the rocket being nearly complete, its launch will take place in July, which will validate the recovery of the rocket without a parachute.

Remerciements

Nous souhaitons remercier nos tuteurs scientifiques, Benjamin Chouvion et Frédéric Gillot, qui nous ont apporté leur expertise et de nombreux conseils dans la réalisation de ce projet.

Nous souhaitons remercier notre tuteur en gestion de projet, David Lenoir, qui nous a aidés dans la conduite de ce projet.

Nous souhaitons remercier notre tutrice en communication, Ariane Pierrou, qui en plus de porter un prénom des plus adéquats pour la réalisation d'une fusée, nous a enseigné l'art de la communication : ce qui nous a permis de livrer des rapports et des présentations de projet efficaces lors des différents RVP.

Nous souhaitons remercier le Club Centrale Lyon Cosmos qui nous a accueillis dans sa grande famille et nous a offert l'opportunité de travailler sur ce projet passionnant en mettant notamment à notre disposition son local ainsi que le travail réalisé au cours des années précédentes.

Nous souhaitons remercier tout particulièrement Julien Cochard, un membre du CLC, qui par son suivi tout au long de l'année nous a donné de précieux conseils et a réussi à nous rendre notre motivation lorsque celle-ci commençait à s'estomper.

Nous souhaitons remercier Planète Sciences pour organiser le lancement au cours duquel nous validerons notre travail, ainsi que pour les divers conseils délivrés au cours des RCE, notamment pour déjouer des problèmes qui ne seraient apparus qu'au moment du lancement.

Nous souhaitons remercier le jury du Bonus Qualité Projet qui, même s'il ne nous a pas accordé tout l'argent demandé, nous a quand même fait suffisamment confiance pour nous offrir une somme conséquente.

Nous souhaitons remercier le FabLab de l'École Centrale de Lyon qui a mis à notre disposition son matériel, et notamment ses imprimantes 3D et sa découpeuse laser, pour nous permettre de réaliser nos pièces et de donner vie à une fusée qui jusque là n'existait que dans nos esprits.

Nous souhaitons remercier David Navarro pour son aide dans la partie électronique de notre projet, notamment pour nous avoir fourni les cartes électroniques ainsi que pour nous avoir donné le tube en carton constituant le bas de notre fusée.

Nous souhaitons remercier toutes les personnes travaillant au bâtiment H10 pour nous avoir accueillis et mis à notre disposition leur matériel.

Nous souhaitons remercier le personnel du magasin de l'École Centrale de Lyon pour sa disponibilité et son aide dans notre recherche de tubes en PVC.

Nous souhaitons remercier la gérante du magasin de tissu qui nous a fourni le tube en carton constituant le haut de notre fusée.

Nous souhaitons remercier le SDeC pour les impressions des diagrammes de Gantt, et autres accessoires, que nous avons utilisés au cours des divers RVP.

Enfin, nous souhaitons remercier l'École Centrale de Lyon pour nous avoir permis de réaliser un projet qui nous a fait découvrir le monde de la conception des fusées et plus généralement le travail en équipe dans lequel tout ingénieur doit pouvoir s'intégrer et s'épanouir.

Table des matières

Preliminaires	7
1 Présentation de la mission	8
1.1 Contexte de la mission	8
1.1.1 La récupération des fusées	8
1.1.2 Le Club Centrale Lyon Cosmos	8
1.1.3 La mission de l'équipage PE68	8
1.2 Objectifs de mission	9
1.3 Attribution des postes	9
2 Vue d'ensemble du projet	10
2.1 Planification du projet	10
2.2 Structure générale/Positionnement des pièces	10
2.3 Centre de gravité	11
2.4 Trajectographie	11
3 Conception	13
3.1 Électronique	13
3.1.1 Présentation de la partie électronique	13
3.1.2 Code informatique	14
3.2 Système de libération	14
3.3 Pales	15
3.3.1 Angle de calage	15
3.3.2 Angle d'ouverture	16
3.3.3 Conception des pales	17
3.3.4 Charnières	18
3.3.5 Fixation charnière-pale	18
3.3.6 Liaison avec le système de libération	19
3.4 Liaisons entre chaque pièce	19
3.4.1 Accroche des ailerons	19
3.4.2 Bague centrale	20
3.4.3 Bague propulseur	21
3.4.4 Bague moteur	21
3.4.5 Bague électronique	23
4 Fabrication	24
4.1 Partie mécanique	24
4.1.1 Pales	24
4.1.2 Corps de la fusée	24
4.1.3 Prototypage rapide	25
4.1.4 Ailerons	25
4.1.5 Bague propulseur	25
4.2 Partie électronique	26
4.2.1 Soudure des composants	26

4.2.2	Association de la batterie, de la carte et du servomoteur	26
4.2.3	Tests de fonctionnement	26
4.3	Assemblage	27
	Conclusion	28
5	Annexe : Glossaire	30
6	Annexe : Liste des taches	31
7	Annexe : Diagramme de Gantt	32
8	Annexe : Trésorerie	33
9	Annexe : Ailerons	34
10	Annexe : Liste des pièces	35
11	Annexe : Liste des liaisons	36
12	Annexe : Électronique	37
12.1	Principaux éléments de la partie électronique	37
12.1.1	batterie	37
12.1.2	carte électronique	37
12.1.3	servomoteur	38
12.2	Plan du séquenceur	39
12.3	Code informatique	40

Table des figures

1	Le mimétisme au service de la conquête spatiale <i>Source : forestry.ky.gov</i>	8
2	L'équipage de la KALINKA	9
3	Plan général de la KALINKA	10
4	Position du centre de gravité lorsque les pales sont fermées	11
5	Position du centre de gravité lorsque les pales sont ouvertes	11
6	Dimensionnement des ailerons par stabilisation du vol	11
7	Trajectoire théorique de la fusée	12
8	Check-list avant décollage	12
9	Schéma électronique de la carte	13
10	Version alpha du système de libération	14
11	Schéma simplifié global à gauche - Dessin CATIA de la bobine d'enroulement à droite	15
12	Version finale du système de libération	15
13	Angle de calage d'une pale par rapport à l'horizontal	16
14	Angle d'ouverture par rapport à la verticale	16
15	Comparaison des trois profils de pale possibles	17
16	Comparaison des deux corps possibles de la fusée	17
17	Fixation des charnières sur la bague centrale	18
18	Accroche entre les pales et les charnières inclinées d'un angle de 5°	19
19	Liaison entre les pales et le système de libération	19
20	En haut, version alpha des accroches - En bas, version finale des accroches	20
21	Schéma de la bague centrale	21
22	Version alpha de la bague moteur	21
23	Version finale de la bague moteur	22
24	En violet la coiffe - En orange la bague électronique - En vert les cartes électroniques - En bleu le système de libération - En gris les tiges filetées	23
25	Méthode de découpe de six pales dans un tube	24
26	Découpe du corps de la fusée	24
27	Exemple d'une impression 3D	25
28	Découpe de la bague propulseur	25
29	Liste des tâches	31
30	Diagramme de Gantt	32
31	Comparaison entre trésorerie prévisionnelle et trésorerie réelle	33
32	Plan des ailerons	34
33	Liste des pièces	35
34	Schéma de toutes les liaisons	36
35	Différentes signaux de commande faisant tourner le servomoteur dans différentes positions	38

Préliminaires

Le présent document détaille les résultats obtenus par le PE68 dans la mission qui lui a été confiée : la récupération d'une fusée sans parachute.

Dans un premier temps, un rappel rapide mais efficace est fait concernant la mission en général ; le contexte ainsi que les objectifs y sont présentés.

Puis, une vue d'ensemble du projet est dressée, rassemblant les divers choix faits pour la structure générale de la fusée et les résultats impliqués en ce qui concerne la stabilité du vol et le respect du cahier des charges imposés. Une fois la preuve donnée que les choix réalisés mènent à un respect de tous les éléments du cahier des charges, les diverses parties composant la fusée sont détaillées selon qu'il s'agit de conception (donc de théorie) ou de fabrication (donc de pratique).

La conception est présentée à l'aide d'un découpage par pôles : les pôles principaux du projet étant l'électronique, le système de libération et les pales. De plus, les liaisons choisies pour rassembler tous ces pôles dans une seule fusée y sont également détaillées.

La conception étant détaillée, les résultats obtenus en pratique (donc en fabrication) ainsi que leur moyens d'obtention sont présentés selon qu'il s'agit de mécanique (système de libération, pales, ailerons) ou d'électronique. Enfin, les méthodes d'assemblage sont présentés montrant l'efficacité des liaisons conçues pour rassembler toutes les pièces.

1 Présentation de la mission

1.1 Contexte de la mission

1.1.1 La récupération des fusées

La récupération des fusées est un enjeu qui prend de l'ampleur dans le contexte actuel. En effet, un système efficace permettrait de pouvoir réutiliser les fusées et donc de réduire le coût de la conquête spatiale.

Ainsi, de nombreuses initiatives voient le jour pour développer des systèmes pouvant remplacer les parachutes afin de réaliser des atterrissages plus surs et moins violents. SpaceX a par exemple choisi de se lancer dans la création de rétro-propulseur pour faire atterrir ses engins, avec plus ou moins de réussite.

1.1.2 Le Club Centrale Lyon Cosmos

Dans ce contexte, le Club Centrale Lyon Cosmos essaie également de créer, à un plus petit niveau, un tel système de récupération.

En effet, fort de plusieurs années d'expérience dans la réalisation de mini-fusées, la réussite d'un tel projet lui permettrait d'accroître encore sa visibilité parmi le grand nombre de clubs de réalisation de fusées en France. C'est pourquoi, même si ce projet a été lancé depuis plusieurs années sans toutefois être mené à terme, il reste une priorité pour le CLC et son lancement lors de la campagne C'Space organisée par Planet Sciences est très attendu.

1.1.3 La mission de l'équipage PE68

C'est ainsi que l'équipage PE68 s'est vu confier la réalisation de cette mission avec l'aide de **Frédéric Gillot** et **Benjamin Chouvion** qui apportent leur expertise technique, **David Lenoir** qui suit l'organisation et la gestion des tâches et **Ariane Pierrou** qui enseigne à communiquer sur les résultats obtenus.

Pour réaliser cette mission, la recherche est guidée par l'observation des samares et leur façon de ralentir leur chute : à l'aide de leurs feuilles, elles sont mises en rotation ce qui crée une force de portance et donc les freine. Le système consistera donc à fixer sur la fusée six pales pour ralentir sa chute. Ce système mimétique est schématisé sur la figure 1.



FIGURE 1 – Le mimétisme au service de la conquête spatiale

Source : forestry.ky.gov

1.2 Objectifs de mission

L'objectif principal de la mission est le suivant :

Comment mettre en place la récupération d'une mini-fusée à l'aide de pales ?

Pour prouver le succès de la mission, une mini-fusée d'une hauteur de 1,20 mètres et d'une masse inférieure à 2 kg doit être construite pour y installer le système de récupération. Puis, une fois l'étape de la fabrication terminée, la fusée *KALINKA* sera lancée à la campagne C'Space 2017.

1.3 Attribution des postes

Prenant en compte, les goûts et les compétences de chacun, l'organisation interne de l'équipe s'est faite d'elle-même selon la répartition montrée en figure 2.



FIGURE 2 – L'équipage de la KALINKA

En ce qui concerne la répartition des tâches techniques, elle s'est faite selon la provenance et les aspirations de chacun, de la manière suivante :

- Bénédicte et Arthur sont en charge de toute l'électronique embarquée ; du choix des composants à leur soudure sur les cartes électroniques en passant par la programmation informatique.
- Théo et Nicolas s'occupent de tout ce qui concerne les pales : leur forme, leur fabrication, leur accroche et leur calage.
- Hugo et Richard développent le système de libération : la conception en CAO, le choix de l'actionneur et le mode d'attache des pales.

2 Vue d'ensemble du projet

2.1 Planification du projet

La planification du projet a été réalisée en deux étapes. D'une part, une liste détaillée a été dressée pour récapituler les tâches à effectuer, cette liste est fournie en Annexe 6. La numérotation adoptée a été par la suite reprise dans le diagramme de Gantt fourni en Annexe 7, qui répartit l'ensemble des tâches sur l'année.

Sur le diagramme de Gantt, la ligne verte représente l'avancement du projet à l'heure de l'écriture du rapport. Les retards sont principalement associés à la partie électronique et sont dus à un problème de délai de commande indépendant de notre volonté : les composants ont mis plusieurs mois à arriver.

2.2 Structure générale/Positionnement des pièces

Plusieurs décisions concernant l'agencement général de la fusée ont dû être prises. En effet, le choix d'un système de libération électro-mécanique (précisé en 3.2) alimenté par une batterie a été fait, ce qui impose pour des questions pratiques de mettre l'électronique dans la partie haute de la fusée (pour qu'il n'y ait pas de fils qui parcourent librement tout l'intérieur de la fusée). Toutes les cartes électroniques seront donc positionnées dans la coiffe, ainsi il a simplement fallu modifier la coiffe pour y insérer les bagues devant les accueillir (comme cela sera montré ultérieurement). Ces deux choix sont résumés sur le plan général représenté en figure 3.

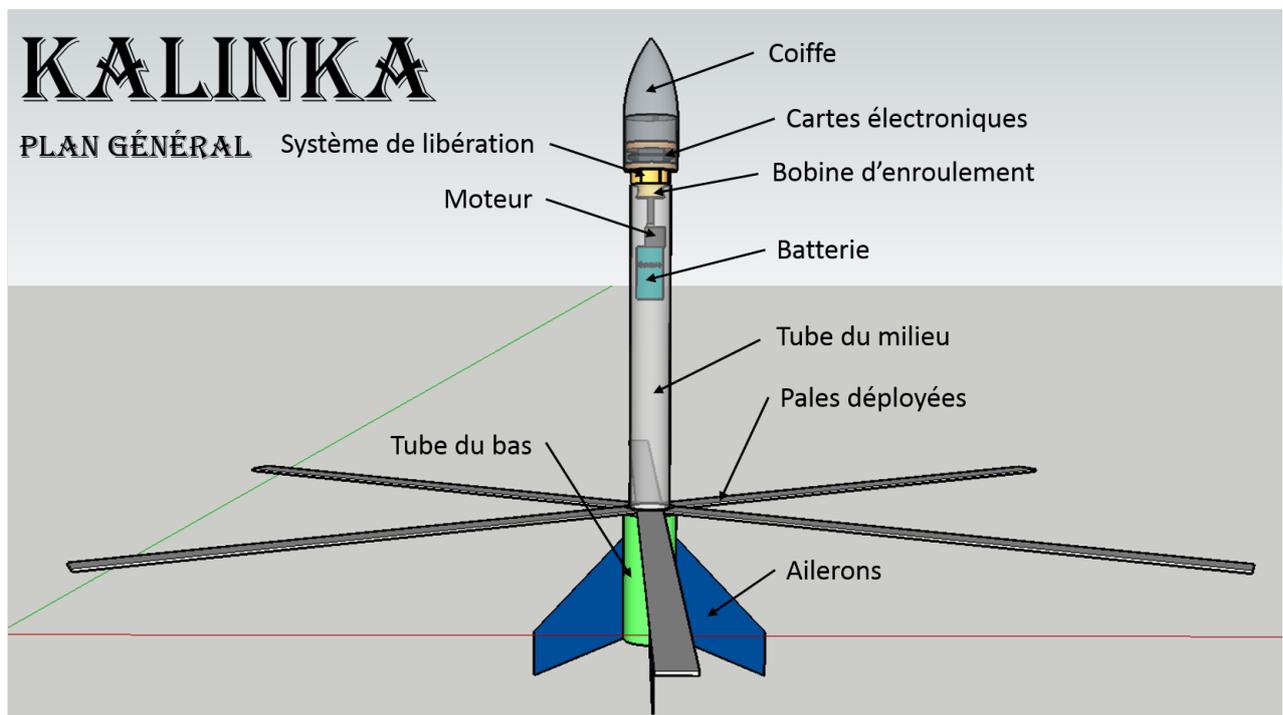


FIGURE 3 – Plan général de la KALINKA

Sur ce plan, il est possible de voir les caractéristiques générales de la fusée :

- 4 ailerons dont le dimensionnement est traité en 2.4.
- 6 pales dont la forme et l'angle de calage seront étudiés en 3.3.
- Deux tubes de diamètres différents

En disposant de la liste de toutes les pièces, fournie en Annexe 10, de leur masse estimée et de leur position dans la fusée, il est possible de déduire la position du centre de gravité de la fusée.

2.3 Centre de gravité

Une première estimation des masses et des centres de gravité des différentes pièces a donc permis de déterminer le centre de gravité de la fusée. La figure 4 représente l'estimation des masses et la position du centre de gravité en phase ascendante lorsque les pales ne sont pas encore déployées (l'angle entre les pales et l'axe de la fusée est donc de 0°). La masse estimée totale de la fusée est donc de 1,7 kg inférieure à celle du cahier des charges. Le centre de masse est placé à 58,5 cm du bas de la fusée.

Référence : 0mm = Bas de la fusée												
Angles ouverture pales (degrés) : 0												
Partie fusée	Tube du bas	Tube du milieu	Coiffe	Pales (x6)	Charnières (x6)	Ailerons (x4)	Syst Déclench	Moteur	Electronique	Bague inter-tubes	Bague Propulseur	TOTAL
Masse	26,14	75,80	33,6	806,4	90	155,25	100	26	250	40	80	1683,19
Position CG	100	600	1100	600	205	10	950	900	1050	190	100	585,4344734

FIGURE 4 – Position du centre de gravité lorsque les pales sont fermées

Lorsque la fusée atteint son apogée et durant toute sa phase de chute, les pales sont ouvertes d'un angle d'environ 85° (elles ne sont pas entièrement ouvertes comme expliqué en 3.3.3). La figure 5 montre la nouvelle position du centre de gravité situé à 41 cm du bas de la fusée.

Référence : 0mm = Bas de la fusée												
Angles ouverture pales (degrés) : 85												
Partie fusée	Tube du bas	Tube du milieu	Coiffe	Pales (x6)	Charnières (x6)	Ailerons (x4)	Syst Déclench	Moteur	Electronique	Bague inter-tubes	Bague Propulseur	TOTAL
Masse	26,14	75,80	33,6	806,4	90	155,25	100	26	250	40	80	1683,19
Position CG	100	600	1100	234,8622971	205	10	950	900	1050	190	100	410,5003757

FIGURE 5 – Position du centre de gravité lorsque les pales sont ouvertes

Il faut noter que la masse est ici estimée sans le propulseur fourni par **Planète Sciences**. Cette masse est une première estimation qu'il faudra comparer lorsque chaque pièce sera disponible et la fusée complètement assemblée.

Le fait d'avoir la masse totale et le centre de gravité permet de déterminer une estimation de la trajectoire du vol et de dimensionner les ailerons pour que cette trajectoire soit stable.

2.4 Trajectographie

Pour étudier la stabilité de la trajectoire et dimensionner les ailerons, le logiciel *Stabtraj* fourni par **Planète Sciences** a été utilisé : l'onglet *Stabilito* permettant de dimensionner les ailerons. Pour cela, il faut donner en entrée la masse totale de la fusée ainsi que son centre de gravité, ensuite en modifiant les divers paramètres dimensionnant les ailerons, il est possible d'arriver à une stabilité du vol comme il est montré sur la figure 6.

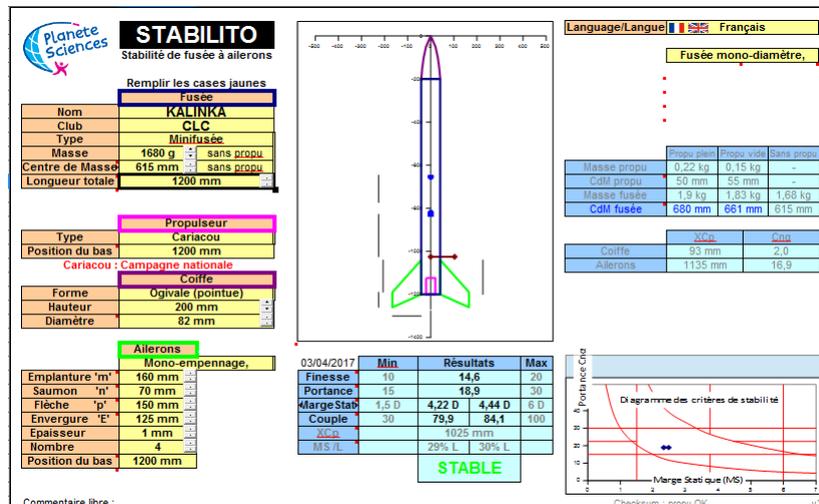


FIGURE 6 – Dimensionnement des ailerons par stabilisation du vol

Maintenant que les ailerons sont dimensionnés (selon le plan en Annexe 9), l'onglet *Trajecto* permet d'observer la trajectoire théorique de la fusée comme il est montré en Figure 7. Il est possible de voir que l'apogée se fait 6,7 s après le décollage. On peut également y voir que la vitesse de descente est de $8,6 \text{ m.s}^{-1}$ soit comprise entre 5 et 15 m.s^{-1} comme le demande le cahier des charges. Ce calcul généré automatiquement par le logiciel a été fait en adaptant les paramètres du parachute pour qu'ils décrivent des pales (la surface du parachute est remplacée par la surface des 6 pales).

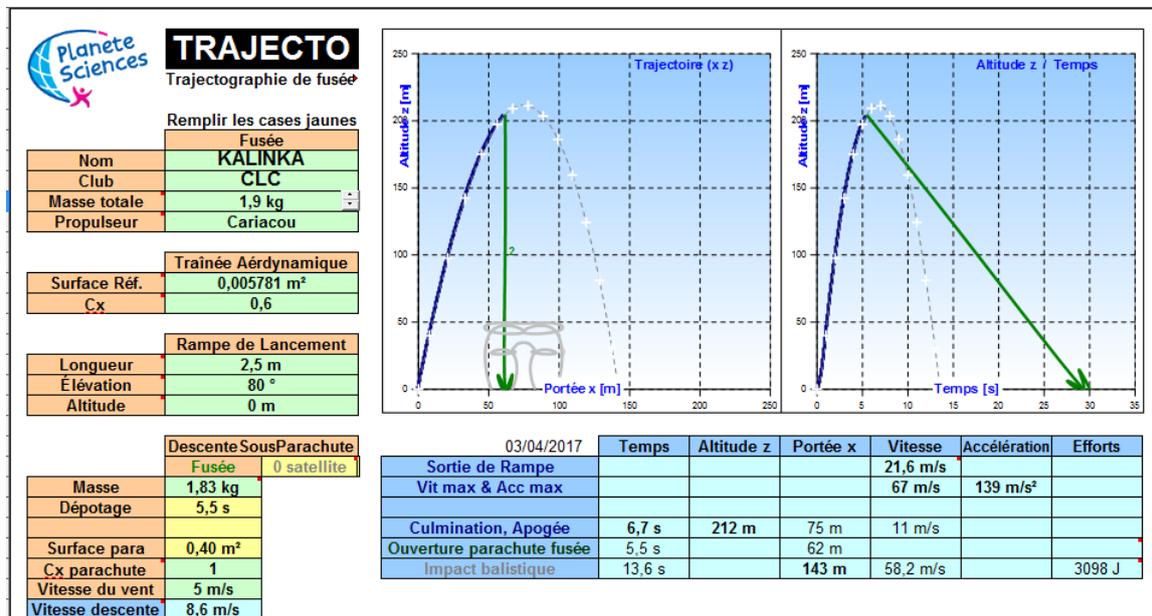


FIGURE 7 – Trajectoire théorique de la fusée

Enfin, grâce à l'onglet *Contrôle*, il est possible de vérifier que toutes les conditions du cahier des charges sont remplies. La check-list, fournie en figure 8, permet de valider le vol.

GN1	Respect des interdits	VL4	Vsortie de rampe (> 18 m/s)	21,6
GN1	Éléments éjectés reliés	VL4	10 < finesse < 20	14,6
GN2	Inflammeur présent	VL4	15 < Cn < 30	18,9
GN2	Interrupteur Sécurité	VL4	1,5 < Ms < 6	4,2 4,4
GN3	Compatibilité Rampe	VL4	30 < Ms x Cn < 100	79,9 84,1
GN3	Accès aux commandes	VL5	Flèche statique < 1%	
GN3	Autonomie (> 15 min)	VL5	Flèche dynamique < 1%	
GN4	Interrupteur M/A	VL6	Fixation des éléments internes	
GN5	Indicateurs état fusée	VL6	Sécurité goupille	
VL1	Chronologie	RC1	5 < Vc < 15 m/s	8,6
VL2	Montage propulseur	RC2	Temps de retard ralentisseur	5,5
VL2	Jeu de montage	RC3	Solidité ralentisseur	
VL2	Plaque de poussée	RC4	Trappe conforme	
VL3	Axe longitudinal	RC5	Compatibilité fusée/terrain avec masse minimale	
VL3	Respect du gabarit			
conseil	Solidité fixation patins	Télem	Test télémessure	
conseil	Attache ralentisseur	TEST	Vol simulé	

FIGURE 8 – Check-list avant décollage

3 Conception

3.1 Électronique

3.1.1 Présentation de la partie électronique

La partie électronique occupe une place importante dans ce projet, même si ce dernier est plutôt orienté vers la mécanique. Cette partie a pour but de faire fonctionner trois éléments de la mini-fusée : le *servomoteur* alimenté par la *batterie* et contrôlé par la *carte électronique*. Ces éléments, ainsi que les principaux composants de la carte électronique sont donnés dans l'Annexe 12.1.

Aussi, l'objectif ici est d'utiliser ces trois éléments pour qu'à l'apogée de la trajectoire, la carte mette en marche le servomoteur qui fera tourner le système de libération et permettra ainsi aux pales de se déployer. Par ailleurs, en faisant tourner le système de libération, le servomoteur va aussi tendre des fils liés aux pales pour assister le déploiement. Des explications plus détaillées sur cette étape d'ouverture sont données dans la partie 3.2.

Ainsi, le plus important est de pouvoir détecter l'apogée de la trajectoire. Pour ce faire, deux méthodes sont possibles :

- *En utilisant un accéléromètre* : l'apogée sera alors atteinte pour une accélération nulle.
- *En calculant l'instant de l'apogée* en prenant en compte le dimensionnement de la fusée et le propulseur utilisé.

Dans le cadre de ce projet, l'utilisation d'un accéléromètre serait trop compliquée et le temps passé à s'assurer du bon fonctionnement de l'électronique associée à ce capteur serait du temps perdu pour le développement du système de libération, qui est finalement le cœur du projet. Aussi, seule la deuxième méthode est retenue. Le calcul s'effectue numériquement grâce au logiciel *Trajecto* et la simulation donne une apogée atteinte au bout de 6,7s.

Ainsi, la carte électronique devra inclure la fonction de minuterie. Cette dernière se déclenchera en coupant une connexion Jack juste avant le lancement. En pratique, la minuterie est réalisée en utilisant une carte de type *séquenceur* dont le plan de branchement des composants est donné en figure 9 ainsi qu'en Annexe 12.2 pour un plan de plus grande taille.

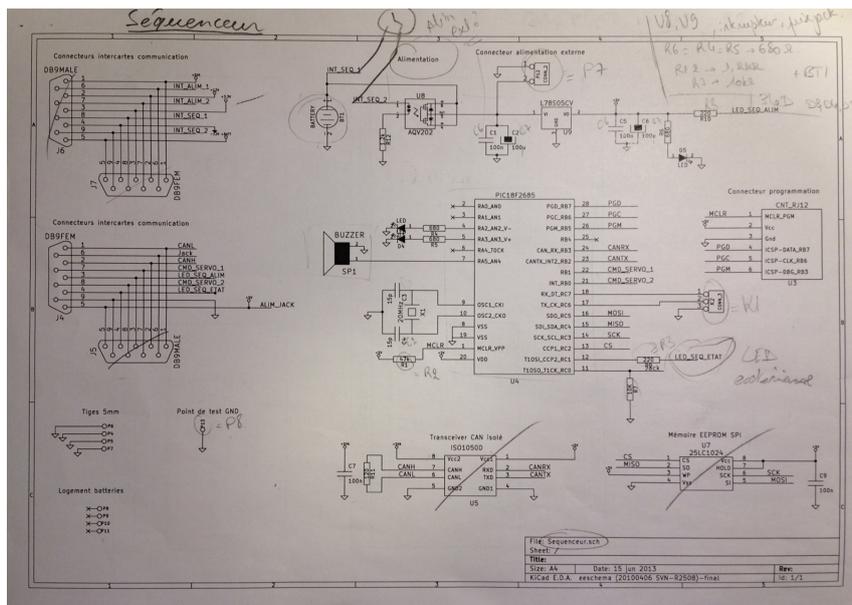


FIGURE 9 – Schéma électronique de la carte

Cette carte commande le servomoteur en utilisant l'énergie de la batterie selon un code informatique. La partie suivante détaillera le code informatique utilisé.

3.1.2 Code informatique

Les cartes se programment en langage C et le logiciel utilisé pour y implémenter le code est *C Compiler*. Le reste de cette partie détaille la chronologie du code qui se conforme aux exigences du Cahier des Charges fixé par Planète Sciences. Ce code est d'ailleurs donné en Annexe 12.3.

Tout d'abord, la carte est mise sous tension. Un "bip" sonne alors une fois et la LED numéro 1 située dans le haut de la fusée clignote lentement. Ensuite, on branche le Jack, à nouveau le buzzer sonne 1 fois et la LED 1 se met à clignoter rapidement. Puis le Jack est arraché lors du décollage, la LED 2 se met alors à clignoter le temps du décompte. À la fin du décompte, on considère l'apogée atteinte, la LED 2 s'éteint tandis que la LED 3 clignote 1 fois pour signaler la fin du décompte. Tout de suite après, la carte commande la mise en rotation du servomoteur.

Toutes ces étapes sont inscrites dans le cahier des charges du C'Space et seront vérifiées par les contrôleurs de Planète Sciences lors des campagnes de lancement. Le rôle de ces étapes est double : d'une part, elles permettent de prouver le bon fonctionnement de la partie électronique et d'autre part elles permettent d'actionner le système de libération, dont le fonctionnement est détaillé dans la partie suivante.

3.2 Système de libération

Le système de libération tient une place centrale dans la mission ; en effet, c'est lui qui est responsable de l'ouverture des pales. L'étude des systèmes utilisés par les équipes précédentes a permis de conclure que le meilleur système était un système mécanique tournant qui libère les pales à un instant bien défini par le timer. La première version était une roue avec des crochets dans lesquels les pales s'insèrent et qui en tournant les libère. Ce système est représenté sur la figure 10.

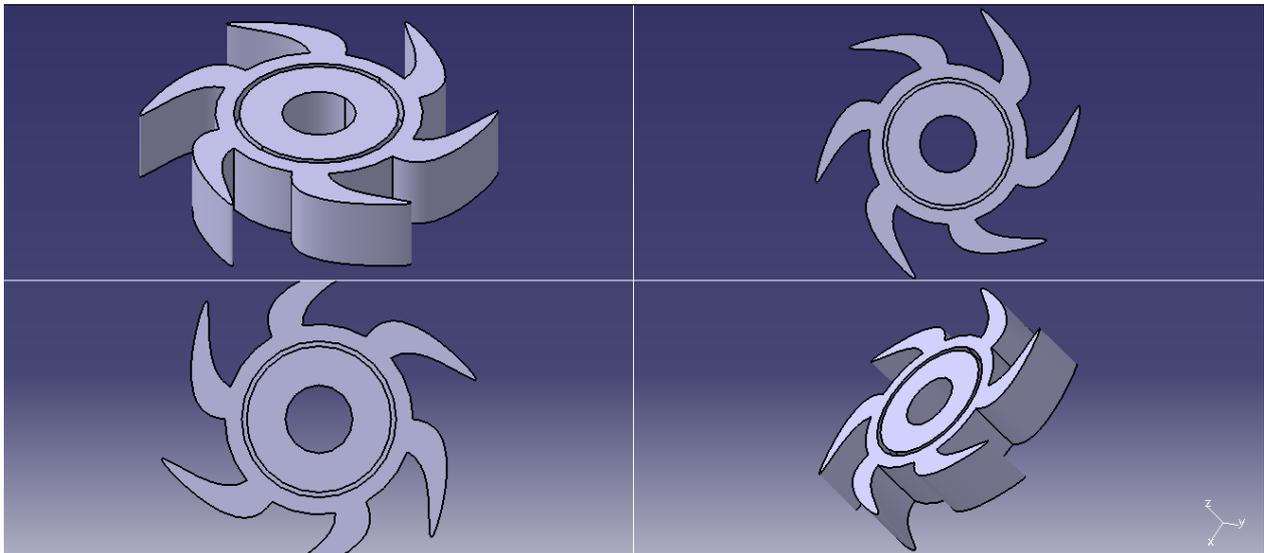


FIGURE 10 – Version alpha du système de libération

Le problème majeur présenté par cette méthode est qu'il libère les pales sans les ouvrir ; en effet, si les pales ne s'ouvrent pas toutes en même temps, la fusée est déstabilisée dans son vol comme cela est déjà arrivé il y a quelques années. Pour résoudre ce problème, il a donc été nécessaire de prévoir un système accompagnant les pales dans leur ouverture. Après avoir songé à un système de ressort qui s'est révélé trop cher et trop difficile à mettre en place, un système plus simple a été développé : des fils accrochés aux pales vont s'enrouler autour d'une bobine tournante et donc ouvrir les pales. Un schéma simplifié de ce système est fourni en figure 11.

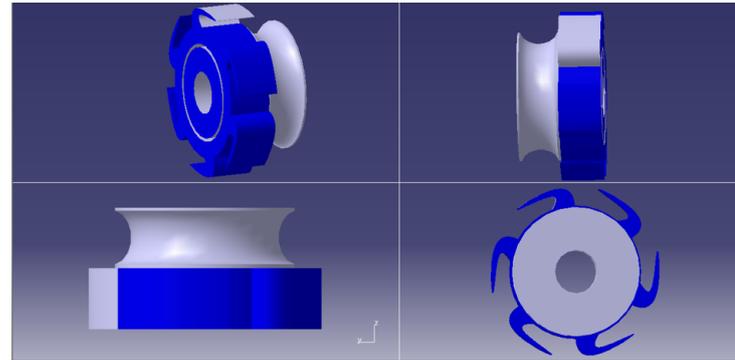
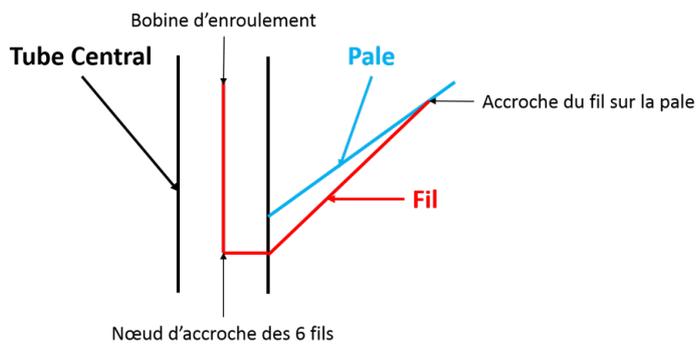


FIGURE 11 – Schéma simplifié global à gauche - Dessin CATIA de la bobine d'enroulement à droite

Une fois le système définitif choisi, il a été possible de travailler à optimiser la roue tournante pour y ajouter des fonctionnalités. En effet, la version finale de la roue, représentée en figure 12, peut, en plus de libérer les pales, faire tourner la bobine pour enrouler les fils et contient aussi la partie basse de la coiffe dans laquelle s'insère les cartes électroniques.

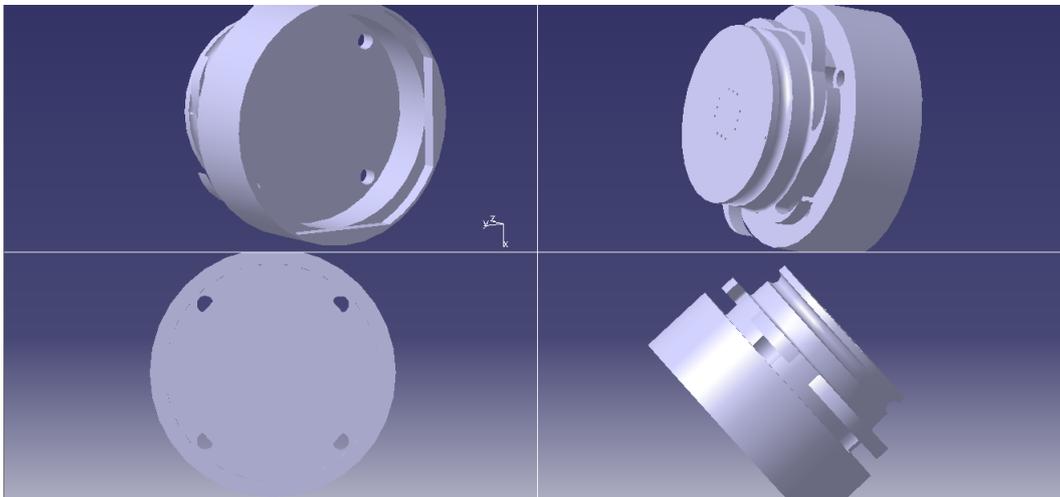


FIGURE 12 – Version finale du système de libération

3.3 Pales

3.3.1 Angle de calage

Afin de ralentir la fusée lors de sa chute, il est nécessaire de créer une force de portance grâce aux pales. Pour obtenir une grande force de portance, la vitesse incidente de l'air par rapport à la pale doit être maximale, d'où la nécessité d'entraîner la fusée en rotation lors de la chute. La solution proposée est donc de fixer les pales ouvertes avec un angle par rapport à l'horizontale : l'angle de calage, représenté sur la figure 13.

L'angle de calage est ensuite optimisé afin de maximiser la portance des pales. Un modèle numérique sur Matlab fourni par le commanditaire, le club Centrale Lyon Cosmos, modélise la portance des pales en fonction de la vitesse de rotation de la fusée, qui dépend directement de l'angle de calage et de la vitesse de chute de la fusée. Ceci permet d'établir qu'un angle compris entre 5° et 10° donne les meilleurs résultats de portance et donc de freinage. L'angle retenu est alors de 5° .

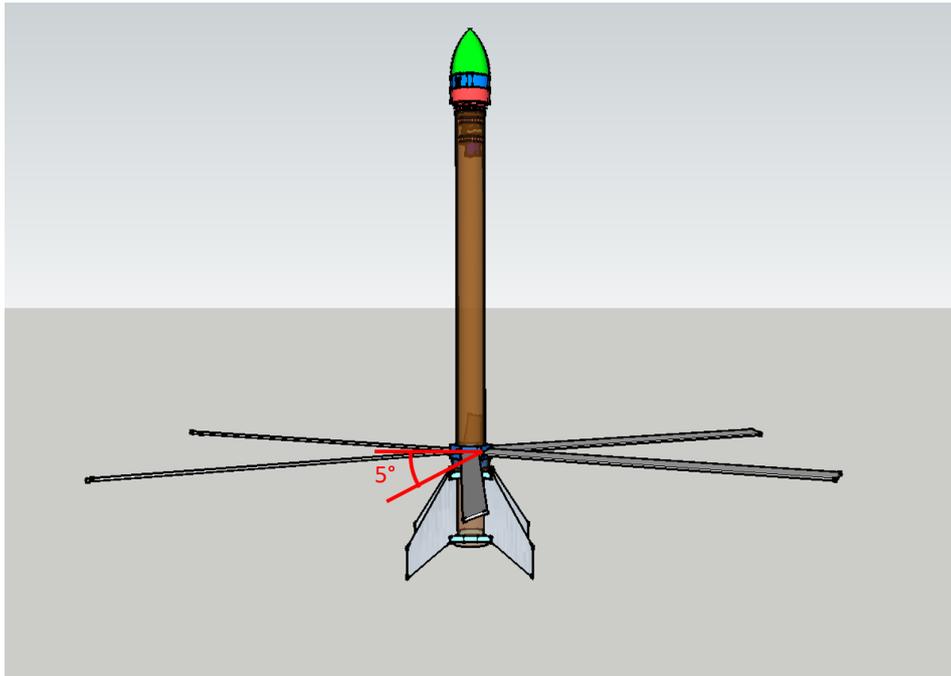


FIGURE 13 – Angle de calage d'une pale par rapport à l'horizontal

3.3.2 Angle d'ouverture

Lors de l'ouverture des pales de la fusée, ces dernières ne procèdent pas à une ouverture complète à 90° par rapport à la verticale. Elles se bloquent à un angle de 85° , comme illustré sur la figure 14, ce qui permet d'assurer une meilleure rigidité des pales face à leur prise au vent. En effet, il est crucial d'éviter une flexion des pales supérieure à 90° , qui entraînerait une brusque perte de portance et endommagerait les pales. Cependant, cette rigidité s'acquiert au détriment de la surface projetée face à l'air, c'est-à-dire que la surface contribuant à la portance est réduite, et donc la portance elle-même est amoindrie.

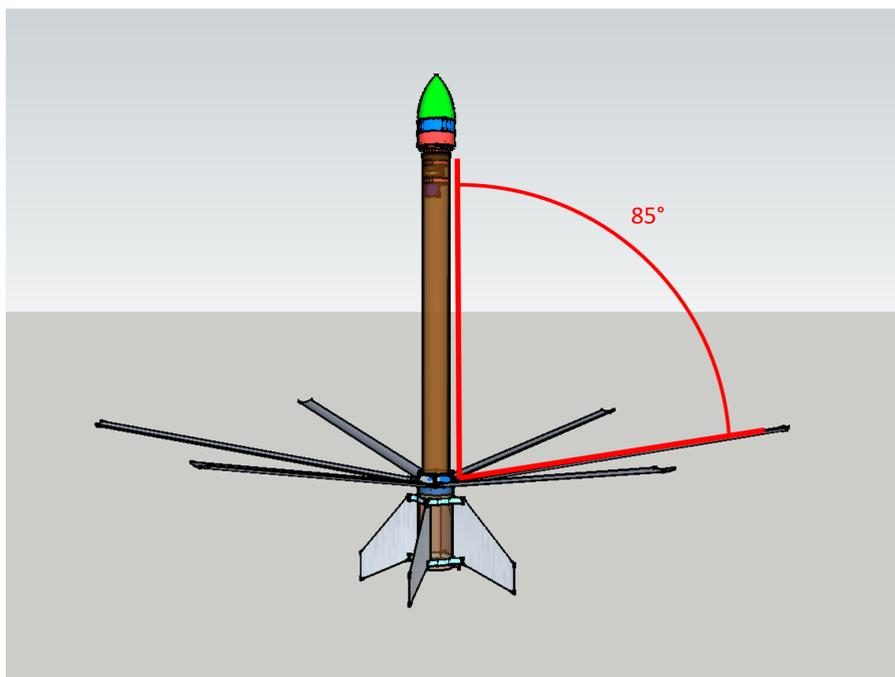


FIGURE 14 – Angle d'ouverture par rapport à la verticale

3.3.3 Conception des pales

Une fois le positionnement des pales validé, il est ensuite nécessaire de déterminer leur forme exacte, influant directement sur la portance et l'aérodynamisme de la fusée. En effet, deux catégories de solutions sont possibles, présentant chacune leurs avantages et leurs inconvénients. Les divers profils de pale envisagés sont représentés sur la figure 15

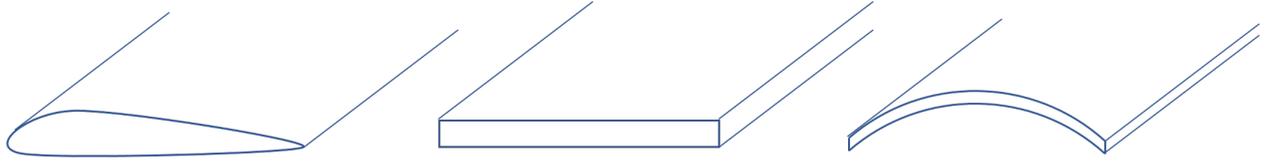


FIGURE 15 – Comparaison des trois profils de pale possibles

La première catégorie se compose des pales de forme plate.

La première solution appartenant aux pales plates est une pale possédant un profil aérodynamique de type NACA (profil typique des ailes d'avion). L'avantage de cette solution est d'obtenir un coefficient de portance maximal, ce qui permet d'obtenir le meilleur freinage possible pour la fusée. Cependant, un tel profil est complexe à calculer et difficile à réaliser en pratique. Dans le cadre des vitesses atteintes par la mini-fusée, qui ne dépassent pas $70m.s^{-1}$ (relativement faible dans le domaine aéronautique), le gain de portance dû à ce profil est négligeable. Cette solution n'est donc pas adaptée au cadre de la récupération de mini-fusées sans parachute.

La deuxième solution envisageable est l'utilisation de pales présentant deux faces planes. Ce profil présente certes un faible coefficient de portance, mais ce dernier est toutefois suffisant à de faibles vitesses incidentes de l'air sur la pale, en tenant compte de l'angle de calage des pales et de la vitesse de rotation de la fusée sur elle-même. Toutefois, cette pale rectangulaire présente le même défaut que toutes les pales de la catégorie de forme plate : lorsque ces pales sont repliées, le corps de la fusée devient alors hexagonal, comme illustré en figure 16. Ceci nuit alors grandement à l'aérodynamisme de la fusée lors du vol et la déstabilise.

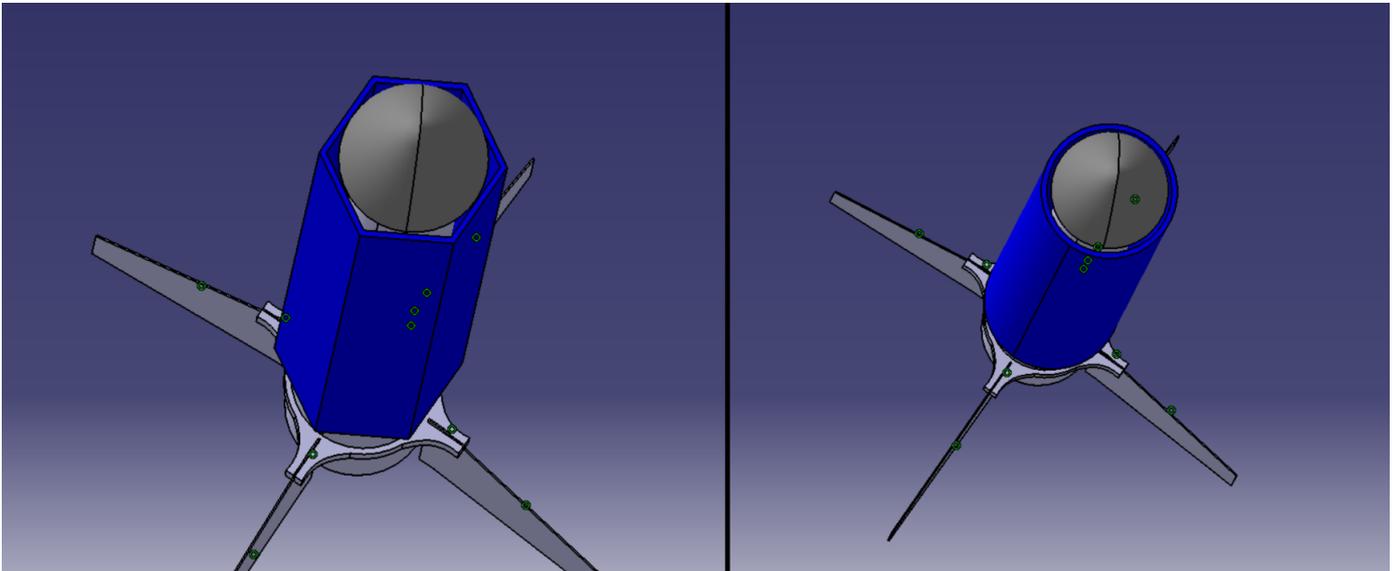


FIGURE 16 – Comparaison des deux corps possibles de la fusée

La deuxième catégorie de pales permet de répondre à l'inconvénient majeur de la première (un corps hexagonal). En effet, les pales issues de cette catégorie présentent une forme cylindrique qui leur permet, une fois repliées, de former un corps cylindrique autour de la fusée. Ces pales sont formées d'un arc de cercle de 60° , ce qui permet d'obtenir avec six pales un cylindre complet. Ensuite, des pales cylindriques présentent un coefficient de portance correct, bien meilleur que le coefficient de portance des pales rectangulaires, mais inférieur à celui d'un profil en aile d'avion. Enfin, la forme creuse de ces

pales leur assure une plus grande résistance à la flexion, et évite ainsi qu'elle ne fléchisse sous la force du vent lors de la descente de la fusée.

Cependant, la forme caractéristique de ces pales présente un inconvénient : la fixation des charnières, planes, sur les pales, cylindriques, est alors plus complexe et nécessite une liaison particulière.

3.3.4 Charnières

Afin de lier les pales à la fusée, il est nécessaire de concevoir une liaison permettant l'ouverture des pales tout en restant extrêmement rigide. En effet, cette liaison doit pouvoir couvrir une plage angulaire de 90° , tout en respectant l'angle de calage de 5° . Elle doit de plus résister aux forts efforts que subiront les pales lorsqu'elles seront ouvertes et auront la plus grande prise au vent.

La liaison entre les pales et le corps de la fusée est donc réalisée par six charnières en acier, fixées sur la bague centrale, inclinées d'un angle de 5° , comme illustré sur la figure 17. L'avantage d'utiliser des charnières en acier est de présenter la résistance nécessaire, mais leurs deux principaux inconvénients sont d'être lourdes et encombrantes, en comparaison avec les autres éléments de la fusée.

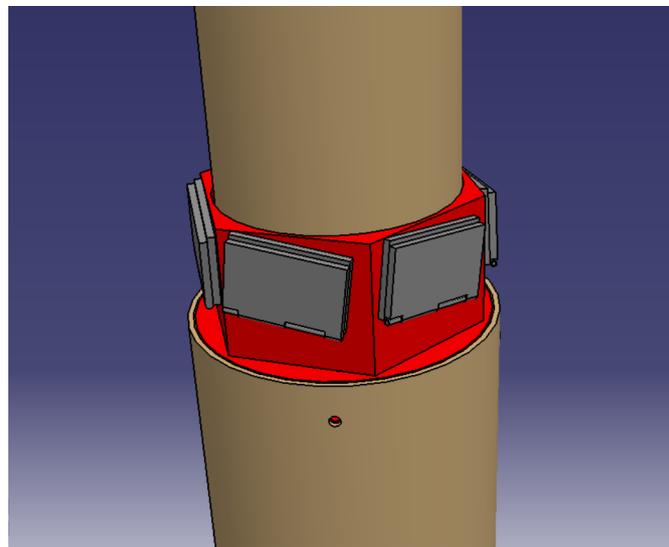


FIGURE 17 – Fixation des charnières sur la bague centrale

Une autre solution possible pour améliorer l'ouverture des pales est d'utiliser des charnières à ressort, qui sont ouvertes en position au repos, et qui exerce un effort pour s'ouvrir lorsqu'elles sont fermées. De telles charnières fourniraient un couple aidant donc au déploiement des pales, mais leur poids et leur taille sont incompatibles avec l'espace et la masse qui leur sont attribués dans la fusée.

3.3.5 Fixation charnière-pale

Ensuite, afin de réaliser les liaisons des pales cylindriques avec les charnières planes, il est nécessaire de concevoir une pièce rendant possible la fixation des pales sur les charnières. La pièce ainsi réalisée, dont le modèle est fourni en figure 18, comporte une face cylindrique qui épouse la forme de la pale, et une face plane accueillant la charnière. La face plane de la pièce de fixation est dimensionnée afin de recevoir la charnière rectangulaire inclinée d'un angle de 5° .

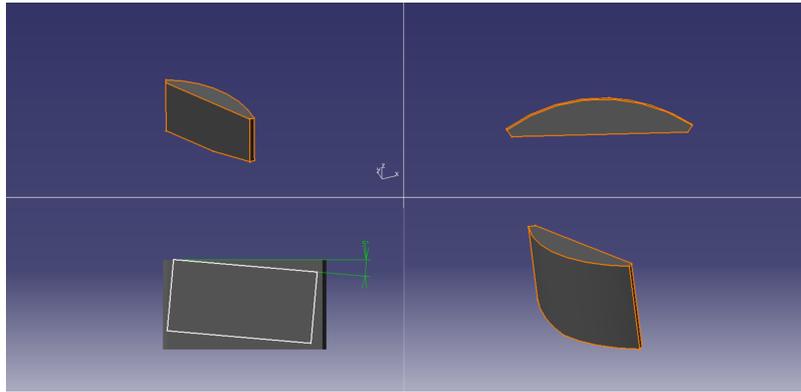


FIGURE 18 – Accroche entre les pales et les charnières inclinées d'un angle de 5°

3.3.6 Liaison avec le système de libération

Finalement, les pales sont reliées à leur extrémité supérieure au système de libération. La principale contrainte imposée à cette liaison est d'assurer le maintien des pales fermées pendant l'ascension de la fusée, en étant soumises aux forces extérieures et vibrations du système. Elle doit de plus pouvoir se fixer sur les pales arrondies, et s'adapter aux crochets du système de libération.

Tout d'abord, la pièce possède une face circulaire afin de se fixer sur les pales cylindriques. Ensuite, sa face intérieure correspond à la courbure des crochets du système de libération, ce qui leur permet de coulisser librement lors de la rotation du système libérant les pales à l'apogée. Toutefois, la rigidité de la pièce reste un sujet critique, car sa position dans la fusée limite la place disponible et donc la quantité de matière utilisable. La solution proposée afin de répondre à cette contrainte est une nervure rigidifiant l'ensemble. Le schéma de cette pièce est fourni en figure 19.

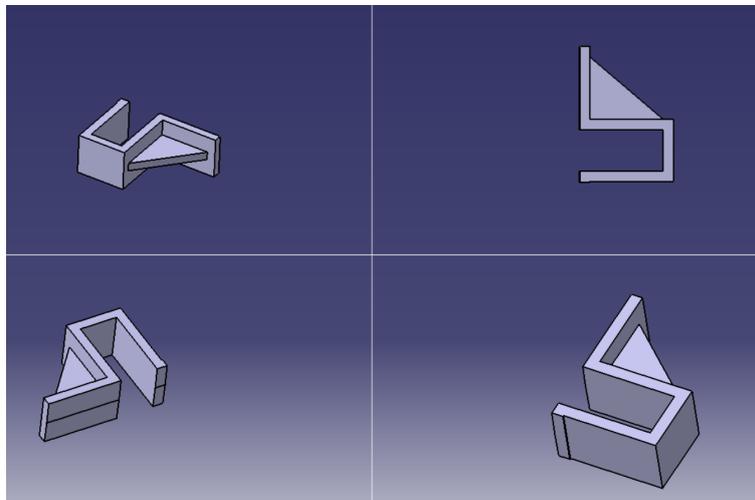


FIGURE 19 – Liaison entre les pales et le système de libération

3.4 Liaisons entre chaque pièce

La liste de toutes les liaisons de la fusée est représentée sur un schéma fourni en Annexe 11.

3.4.1 Accroche des ailerons

Les ailerons seront réalisés dans une plaque d'aluminium de 1 mm d'épaisseur. Ces ailerons sont soumis à de fortes sollicitations sur le pas de tir, car ils assurent le maintien de la mini-fusée sur sa rampe de lancement. Les accroches des ailerons sur le corps de la fusée doivent donc être capable de résister à de fortes charges, tout en garantissant un maintien en position précis, car les ailerons sont

responsables de la trajectoire de la fusée lors de son vol.

Une première solution proposée a été d'utiliser une bague unique enserrant le tube inférieur de la fusée, et pourvu de 4 rainures destinées à accueillir les ailerons. Cette forme de pièce présente un avantage majeur, celui de garantir précisément le positionnement des quatre ailerons à 90° les uns des autres. Cependant, la fixation des ailerons n'est alors réalisée qu'en un seul point le long du tube inférieur de la fusée, ce qui fragilise la liaison et rend les ailerons peu solidaires du reste de la fusée.

La solution retenue est de réaliser une liaison qui couvre toute la longueur des ailerons. Ceci assure une meilleure fixation et une grande rigidité entre les ailerons et le corps de la fusée, grâce aux deux points de fixation placés le long de l'aileron. De plus, les rotations autour du point de fixation, dues à la faible longueur de contact caractérisant la précédente solution, sont ici éliminées. Cette pièce étant toutefois de dimensions importantes, il est impossible, pour respecter les contraintes de masse, de la réaliser en un seul tenant. L'accroche des ailerons se compose donc de 4 pièces séparées, ce qui rend particulièrement sensible leur fixation sur le tube inférieur. En effet, le positionnement des ailerons à 90° autour de la fusée n'est plus assuré, de même que leur parallélisme avec l'axe central de la fusée. Un soin tout particulier devra donc être apporté à la fixation de ces accroches lors de la fabrication. Les schémas des deux accroches sont fournis sur la figure 20.

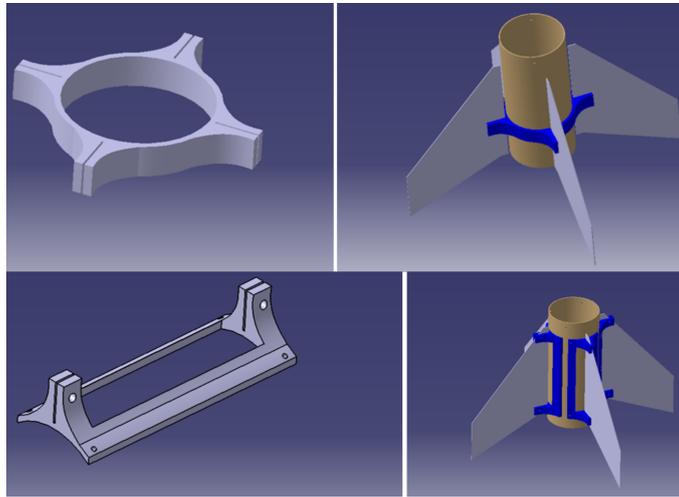


FIGURE 20 – En haut, version alpha des accroches - En bas, version finale des accroches

3.4.2 Bague centrale

La bague centrale réalise la liaison entre le tube inférieur et le tube supérieur de la fusée. De plus, puisque cette bague est située à l'intersection des deux tubes, elle permet aussi de réaliser la liaison avec les charnières.

Cette bague est donc plus épaisse que les autres, afin de fixer les deux tubes à l'aide de vis à bois, et elle présente un profil hexagonal qui permet la fixation des charnières rectangulaires sur ses faces. Cette bague est représentée sur la figure 21.

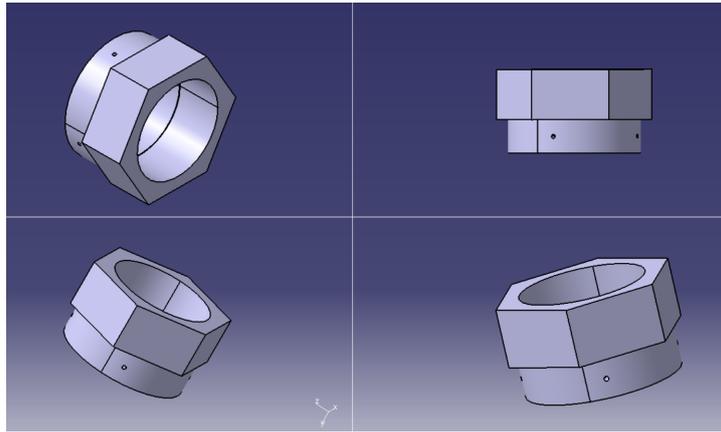


FIGURE 21 – Schéma de la bague centrale

3.4.3 Bague propulseur

La propulsion de la mini-fusée est réalisée par un propulseur à poudre de type Cariacou, possédant une poussée maximale de 320 N pendant 0,95 s. Il sera maintenu dans la fusée à l'aide d'un ensemble de pièces capable de résister à la force de poussée subie par la fusée ainsi qu'aux fortes températures liées à l'utilisation d'un propulseur à poudre. Cette liaison se compose tout d'abord d'une bague de poussée en bois, qui, comme son nom l'indique, sert d'appui au propulseur et ainsi de support à la force de poussée. Le maintien du propulseur dans le corps de la fusée est assuré radialement par des tasseaux permettant d'encastrer en force le propulseur dans le tube inférieur, et axialement par une bague de maintien se fixant sous le propulseur.

Le matériau choisi, le bois, non présent sur le reste de la fusée, présente les inconvénients d'être lourd et difficilement usinable. Cependant, il reste un matériau suffisamment résistant pour supporter la poussée du propulseur, ainsi que les fortes températures dues à la combustion dans le propulseur.

3.4.4 Bague moteur

L'ensemble de la partie supérieure (coiffe, électronique et système de libération) étant fixé sur l'arbre moteur, et donc sur le moteur, ce dernier doit être fermement maintenu sur la partie inférieure de la fusée. La liaison entre le moteur et le tube supérieur de la fusée est réalisée par une bague, maintenue fermement dans le tube supérieur, et sur laquelle le moteur est vissé. Le schéma en figure 22 représente les deux parties de cette bague.

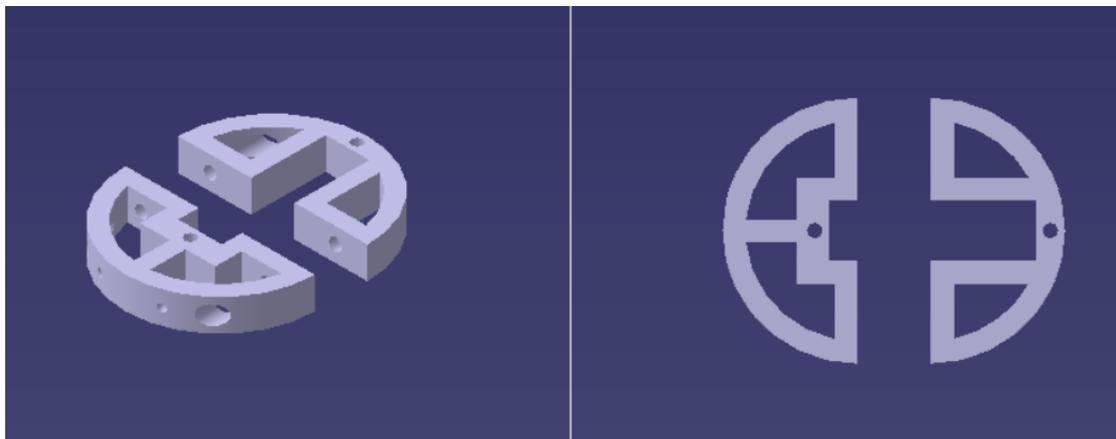


FIGURE 22 – Version alpha de la bague moteur

Cette bague est évidée afin de minimiser sa masse, tout en conservant des renforts qui permettent d'assurer sa rigidité. De plus, considérant l'encombrement du moteur (fils, attaches), la bague est réalisée en deux parties afin de lui permettre de s'adapter au moteur.

Cette bague a ensuite été améliorée pour pouvoir également accueillir la batterie qui alimente le moteur. Celle-ci se positionne en effet juste sous le moteur à l'emplacement fait pour dans la nouvelle bague moteur représentée sur la figure 23.

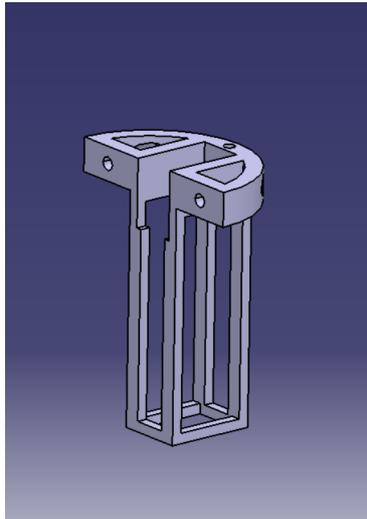


FIGURE 23 – Version finale de la bague moteur

Seule la partie droite a été modifiée, la partie gauche reste donc la même que pour la première version.

3.4.5 Bague électronique

Comme mentionné précédemment dans la structure générale de la fusée, l'électronique embarquée se situe dans la partie supérieure. Il est donc nécessaire de fixer la carte électronique et ses composants dans un espace réduit entre la coiffe de la fusée et le système de libération. La carte électronique de la fusée possède déjà un système de fixation standard, 4 trous permettant le passage d'un système de tiges filetées et écrous.

Suite à de nombreuses propositions pour ce système, la solution finalement retenue est de placer la carte et ses composants dans la partie haute du système de libération, et la fixation des tiges filetées est réalisée par l'ensemble des 3 pièces suivantes : système de libération - bague électronique - coiffe montré par la Figure 24.

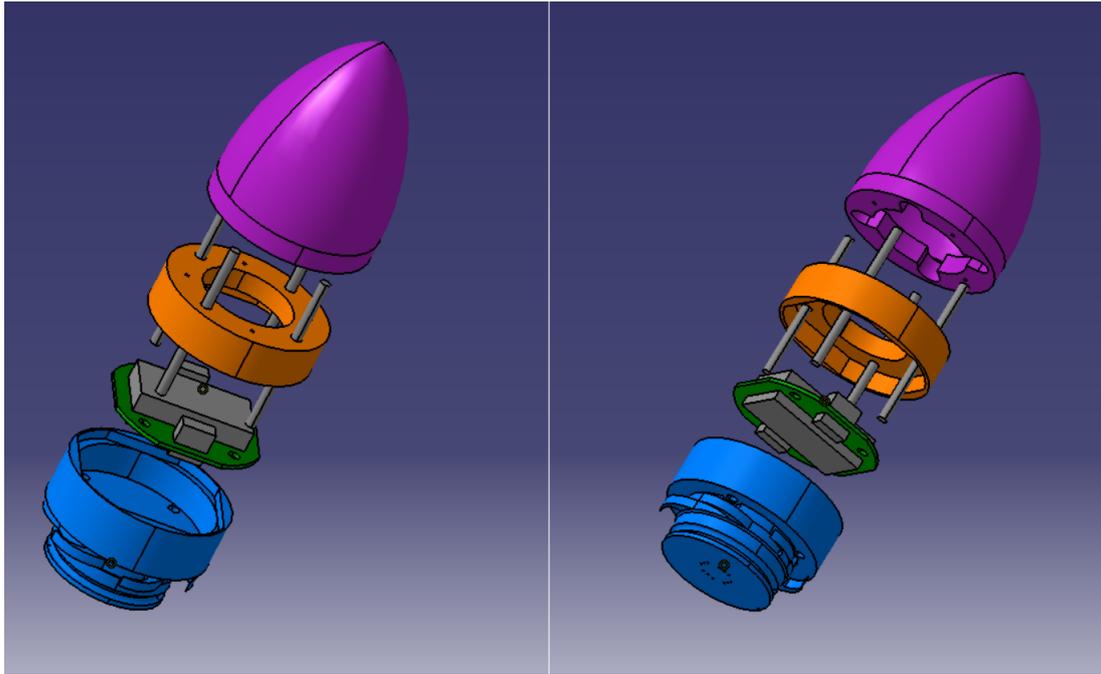


FIGURE 24 – En violet la coiffe - En orange la bague électronique - En vert les cartes électroniques - En bleu le système de libération - En gris les tiges filetées

Dans cette configuration, la bague électronique, accessible des deux côtés lors du montage, permet de fixer les tiges filetées. Cette bague se fixe ensuite sur la coiffe à l'aide de vis à bois, puis l'ensemble bague-coiffe est assemblée avec le système de libération. Les cartes électroniques sont alors maintenues dans l'espace prévu au sein de cette structure.

Le système de libération vient ensuite se visser sur l'arbre moteur, à l'aide de trous prévus à cet effet. Finalement, le fil de pêche, qui s'enroule sur la partie inférieure du système de libération, vient s'attacher dans une encoche réalisée dans la bobine.

4 Fabrication

4.1 Partie mécanique

4.1.1 Pales

Pour la fabrication des pales, réalisées dans un tube de PVC de diamètre 80 cm, deux tubes ont été achetés dans un magasin de bricolage. Un tube a également été récupéré auprès d'Alexandre Bira qui travaille au magasin de l'École Centrale de Lyon.

La découpe des pales a également été réalisée : avec une micro scie du Fablab, le tube en PVC a pu être divisé en deux parties égales découpées en douze pales comme le montre la figure 25. Les six pales les mieux découpées ont ensuite été choisies pour être fixées sur la fusée.



FIGURE 25 – Méthode de découpe de six pales dans un tube

4.1.2 Corps de la fusée

Pour avoir les tubes de carton composants le corps de la fusée, M.Navarro, après avoir été contacté, nous a donné le tube inférieur de gros diamètre (83 cm), et le tube supérieur de petit diamètre (60 cm) a été obtenu dans un magasin de tissu dont la gérante a accepté de le fournir. Le tube supérieur a ensuite été scié pour avoir la bonne longueur souhaitée comme montré sur la figure 26.

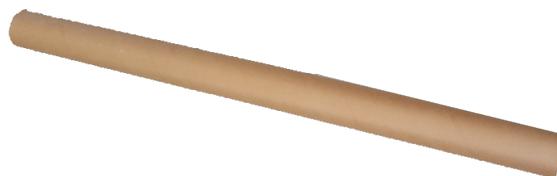


FIGURE 26 – Découpe du corps de la fusée

4.1.3 Prototypage rapide

De nombreuses pièces ont été dessinées sur CATIA et sont destinées à être imprimées en 3D à l'aide du FabLab. Par exemple, le résultat de l'impression de la coiffe et du système de libération est représenté sur la figure 27.



FIGURE 27 – Exemple d'une impression 3D

4.1.4 Ailerons

Pour la fabrication des ailerons, les plaques en aluminium de la bonne épaisseur (2 mm) ont été récupérées au local du club Centrale Lyon Cosmos. Différentes initiatives ont été envisagées pour les découper et finalement ils le seront au H10 avec le matériel de l'Ecole Centrale.

4.1.5 Bague propulseur

La bague propulseur devant être en bois, une planche de bois épaisse a été récupérée et la bague a été fabriquée à l'aide de la découpeuse laser du fablab comme le montre la figure 28.



FIGURE 28 – Découpe de la bague propulseur

4.2 Partie électronique

La "fabrication" des cartes peut être divisée en trois parties qui correspondent à un ordre chronologique de l'assemblage :

1. La soudure des composants sur la carte
2. L'association de la batterie, de la carte et du servomoteur
3. La réalisation de tests de fonctionnement

4.2.1 Soudure des composants

La soudure des composants sur la carte constitue la partie centrale de l'étape de fabrication. En effet, c'est l'agencement de ces composants qui détermine les fonctions de la carte comme cela a été expliqué dans la partie 3.1.1. Il faut compter environ un mois pour la soudure de tous les composants.

4.2.2 Association de la batterie, de la carte et du servomoteur

Il faut maintenant relier les trois parties du pôle électronique que sont la *batterie*, la *carte*, et le *servomoteur*.

Il aurait été possible de séparer l'alimentation de la commande en utilisant deux cartes distinctes. La batterie aurait alors été branchée sur une carte *alimentation* et le moteur aurait été à la fois branché sur une carte *alimentation* et sur une carte *séquenceur* (pour la commande). C'est le choix qui est fait par les autres PE du CLC spécialisés dans l'électronique notamment parce que les capteurs qu'ils utilisent et le traitement qu'ils effectuent sur leurs données nécessitent une multitude de cartes. Le PE68 ne comportant pas de capteurs, son électronique est grandement simplifiée. Aussi, seule une carte séquenceur est nécessaire. Utiliser en plus une carte alimentation compliquerait inutilement cette partie du projet.

Les conséquences de ce choix sont des précautions à prendre. En effet, l'énergie que fournit la batterie ne peut pas passer par la carte séquenceur pour alimenter le servomoteur. Le risque de faire cela serait de griller la carte puisque le servomoteur nécessite environ 100 mA pour fonctionner alors que le courant maximal pouvant traverser le séquenceur est d'environ 10 mA. Il faut donc que la batterie alimente en parallèle la carte séquenceur et le moteur, et que la carte fournisse le signal de commande au servomoteur.

4.2.3 Tests de fonctionnement

Il reste maintenant à réaliser les tests de fonctionnement. Même si la partie précédente détaille comment brancher la batterie aux autres éléments du pôle électronique, il est préférable de travailler avec une alimentation stabilisée pour éviter d'user la batterie lors des tests. Ces tests se font dans l'ordre suivant :

1. *Tests de fonctionnement des éléments principaux de la carte* (LED, buzzer, interrupteur et prise Jack) : en effet, si ces composants remplissent correctement leur fonction, alors la carte électronique pourra être considérée fonctionnelle.
2. *Tests de fonctionnement du moteur* : il faut vérifier que le signal de commande détaillé en Annexe 12.1.3 permette effectivement de faire tourner le moteur jusqu'à la position souhaitée, et que le couple du moteur permette de mettre en rotation les 275g de la partie haute de la fusée.
3. *Tests de fonctionnement du code* : L'essai consiste à tester le code dans son intégralité en utilisant la batterie comme source de tension.

Une fois ces essais concluants, la fabrication de la partie électronique peut-être considérée comme achevée.

4.3 Assemblage

Après avoir rassemblé les différentes pièces et matériaux pour réaliser la fusée, la question de leur assemblage se pose. Il faut alors réfléchir à un ordre particulier pour faciliter le montage de la fusée mais aussi pour que les différents moyens de fixation utilisés se montent le plus facilement possible.

Les tubes de carton inférieur et supérieur sont assemblés en premier pour constituer le corps de la fusée, en les reliant par une bague en plastique et des vis. Puis, les charnières sont fixées sur cette même bague aux emplacements prévus, en prenant soin de bien respecter l'inclinaison choisie de 15° . Leur fixation est facilitée par le fait qu'aucun autre élément n'ait été assemblé sur le corps. Ensuite, les pales fabriquées sont fixées sur les charnières au moyen de pièces intermédiaires servant de liaison, en respectant là-aussi une inclinaison de 15° par rapport aux charnières pour que les pales restent verticales une fois repliées.

L'étape suivante consiste à assembler la partie haute de la fusée, qui correspond à la partie de la fusée qui va tourner sur elle-même. La création de cette partie haute se décompose de la façon suivante : positionner et fixer la carte électronique par rapport aux bagues électroniques hautes et basses ; fixer l'ensemble électronique sur le système de libération au moyen de tiges filetées en acier ; couvrir cet ensemble avec la coiffe qui est vissée au-dessus. La partie haute ainsi construite, il faut ensuite la fixer sur l'arbre moteur en utilisant des pièces fournies par le constructeur. Puis, le moteur est fixé sur la bague moteur, qui est elle-même fixée en haut du tube de carton supérieur. La batterie alimentant l'électronique sera positionnée sur cette même bague, juste en dessous du moteur.

Une autre partie importante est l'attache des fils sur les pales. Les fils de maintien des pales en position ouverte seront fixés à la fin de l'assemblage et réglés à la bonne longueur. En ce qui concerne les fils qui forcent l'ouverture des pales, leur installation est plus complexe : ils doivent être reliés aux pales et au système de libération avant que la bague moteur ne soit mise en place et que le tube supérieur ne soit plus accessible.

Enfin, il reste à fixer les ailerons sur le tube de carton inférieur grâce aux accroches fabriquées, mais aussi à fixer la bague propulseur et les bagues de serrage qui servent à positionner correctement le propulseur dans le bas de la fusée. La fusée sera alors prête à être lancée en récupérant le propulseur Cariatou fourni pendant la campagne C'Space 2017!

Conclusion

Rappel des objectifs

Durant ce projet, l'objectif de base, récupérer une mini-fusée sans parachute, s'est décliné en plusieurs objectifs tous indispensables :

- Mettre en place une électronique embarquée simple permettant le déclenchement des pales.
- Trouver un compromis entre le meilleur profil de pales pour créer une portance suffisante, la faisabilité de ces pales (méthode de découpe) et le coût du matériau.
- Mettre au point un système de libération permettant de maintenir les pales fermées lors de la phase ascendante, libérer les pales à l'apogée et forcer leur ouverture rapidement.

Tous ces points sont indispensables à la réalisation du projet, car si un seul de ces objectifs n'est pas atteint, la mission ne peut pas réussir. Lorsque tous ces objectifs sont atteints, il reste encore à les réunir dans une même fusée pesant moins de 2 kg pour respecter le cahier des charges.

Pour que la mission soit considérée comme réussie, la vitesse de chute de la fusée doit être comprise entre 5 et 15 $m.s^{-1}$. Bien que ce dernier point soit le seul à être prioritaire aux yeux de Planètes Sciences, du CLC et de l'équipage PE68, sa réalisation passe par la réussite de tous les autres objectifs.

Résultats de la mission

La plupart des objectifs pouvant être réalisés avant la fin scolaire du projet le sont :

- L'électronique embarquée a été plus difficile que prévue à mettre en place mais l'a finalement été.
- Un profil de pale simple et efficace a pu être choisi et réalisé.
- Le système de libération a été mis au point et réalise toutes les fonctions nécessaires.

En ce qui concerne l'assemblage, il n'est pas encore terminé mais le sera avant le décollage qui aura lieu en Juillet 2017.

Perspectives

Le prochain rendez-vous pour l'équipage PE68 est la campagne de lancement C'Space 2017 au cours de laquelle la fusée, totalement assemblée, sera soumise aux contrôles de Planètes Sciences avant de pouvoir décoller pour valider sa mission.

En cas d'échec, les sources d'erreur pourront être analysées grâce aux données fournies par le vol. Ainsi, les éventuels prochains équipages pourront poursuivre la mission en évitant de commettre les mêmes erreurs et peut-être enfin la mener à son terme.

En cas de succès, l'étude du vol de la fusée fournira des données intéressantes à étudier, et sera en particulier d'une aide précieuse pour améliorer encore le ralentissement. En effet, il sera, dans ce cas-là, possible de se pencher plus en détail sur le profil des pales pour optimiser la portance créée et rendre plus efficace le ralentissement.

En somme, bien que l'aventure de l'équipage PE68 s'achève cet été, la fin de l'histoire de la KALINKA reste encore à écrire...

A suivre... ?

Bibliographie

Rapports précédents :

Rapport Final du PE94 - 2011/2012

Rapport Final du PE110 - 2014/2015

Rapport Final du PE94 - 2015/2016

Rapport de RVP 1 - Novembre 2016

Rapport de RVP 2 - Avril 2017

Documents de Planète Sciences :

Cahier des Charges pour Mini-fusées CARIACOU - 15 Octobre 2005 - MINIF/CDC/2/CNES-PLASCI/V2_1

Cahier des Charges Mini-fusées - 22 Novembre 2014 - MINIF/CDC/1/CNES-PLASCI

5 Annexe : Glossaire

- Angle de calage : angle que forment les pales avec l'horizontale.
- Angle d'ouverture : angle que forment les pales avec la verticale.
- CATIA : logiciel de Conception Assistée par Ordinateur, permettant de réaliser des modèles 3D de toutes les pièces de la fusée, ainsi que de réaliser des plans pour le prototypage rapide.
- C'Space : campagne de lancement nationale organisée par Planète Sciences en juillet 2017. C'est là que toutes les fusées construites par des étudiantes et ayant reçues l'aval de Planète Sciences sont lancées.
- Pales : remplacent le système de parachute classique sur une fusée, elles se déploient à l'apogée et permettent d'imiter lors de la descente de la fusée, la chute des samares.
- Prototypage rapide : méthode de fabrication additive (par ajout de matière) qui permet de réaliser quasiment toutes les formes possibles, à partir de conception assistée par ordinateur. Le prototypage rapide utilisé dans ce projet est l'impression 3D à partir de PLA, acide polylactique, sur des modèles réalisés sous Catia.
- RCE : Rencontre Club Espace, organisée par Planète Sciences pour vérifier l'avancement du projet et valider son lancement pendant le C'Space.
- RVP : Rendez-Vous Pilotage, deux dans l'année, qui servent à présenter l'avancement du projet aux tuteurs.
- Samares : : graines d'érable qui tournent sur elles-mêmes en tombant pour ralentir leur chute. Couramment considérés comme de petits hélicoptères végétaux.

6 Annexe : Liste des tâches

Tâches	Durée (semaines)	Antécédents
1. Réalisation documents (PERT, GANTT)	2	-
2. Maquette	4	-
2.1 Tube du haut	2	-
2.2 Tube du bas	2	-
2.3 Coiffe	1	2.1
2.4 Ailerons	1	2.2
2.5 Pales	2	2.2
2.6 Tests de la maquette	2	2.1 à 2.5
3. Conception de la fusée	11	2
3.1 <i>Electronique</i>	11	-
3.1.1 Commande des cartes	4	3.1.1
3.1.2 Conception de l'algorithme	2	3.1.2
3.1.3 Apprendre à utiliser les cartes	1	3.1.3
3.1.4 Écrire le code	1	3.1.4
3.1.5 Tester les cartes avec le code implémenté	3	3.1.5
3.2 <i>Système de déclenchement</i>	11	-
3.2.1 Lecture rapport/Trouver des idées	4	-
3.2.2 Conception	7	3.2.1
3.2.2.1 Dessin Catia	4	-
3.2.2.2 Choix des matériaux	5	-
3.3 <i>Pales et système d'attache</i>	11	-
3.3.1 Calculs théoriques	5	-
3.3.1.1 Angle pales par rapport au corps	2	-
3.3.1.2 Forme des pales	1	-
3.3.1.3 Résistance des matériaux	2	-
3.3.2 Pales	4	-
3.3.2.1 CAO	3	-
3.3.2.2 Choix matériaux	3	-
3.3.3 Attaches	3	3.3.2
3.3.3.1 Choix du type d'attache	1	-
3.3.3.2 CAO	1	-
3.3.3.3 Commande des pièces	3	3.3.3.2
3.4 <i>Corps de la fusée (CAO)</i>	3	-
3.4.1 Tube du haut	1	-
3.4.2 Tube du bas	1	-
3.4.3 Coiffe	1	3.4.2
3.4.4 Ailerons	3	-
4. Réalisation	14	3
4.1 Fabrication	10	-
4.1.1 Installer l'électronique dans la fusée	3	-
4.1.2 Usinage/Impression 3D du système de déclenchement	10	-
4.1.3 Pales et attaches	9	-
4.1.3.1 Fabrication des pales	9	-
4.1.3.2 Fabrication système d'attache	9	-
4.1.4 Fabrication du corps de la fusée	9	-
4.2 Assemblage entre chaque parties de la fusée	5	4.1
4.3 Vérification de l'intégrité et des fonctionnalités	2	4.2
5. Lancement	4	4

FIGURE 29 – Liste des tâches

7 Annexe : Diagramme de Gantt

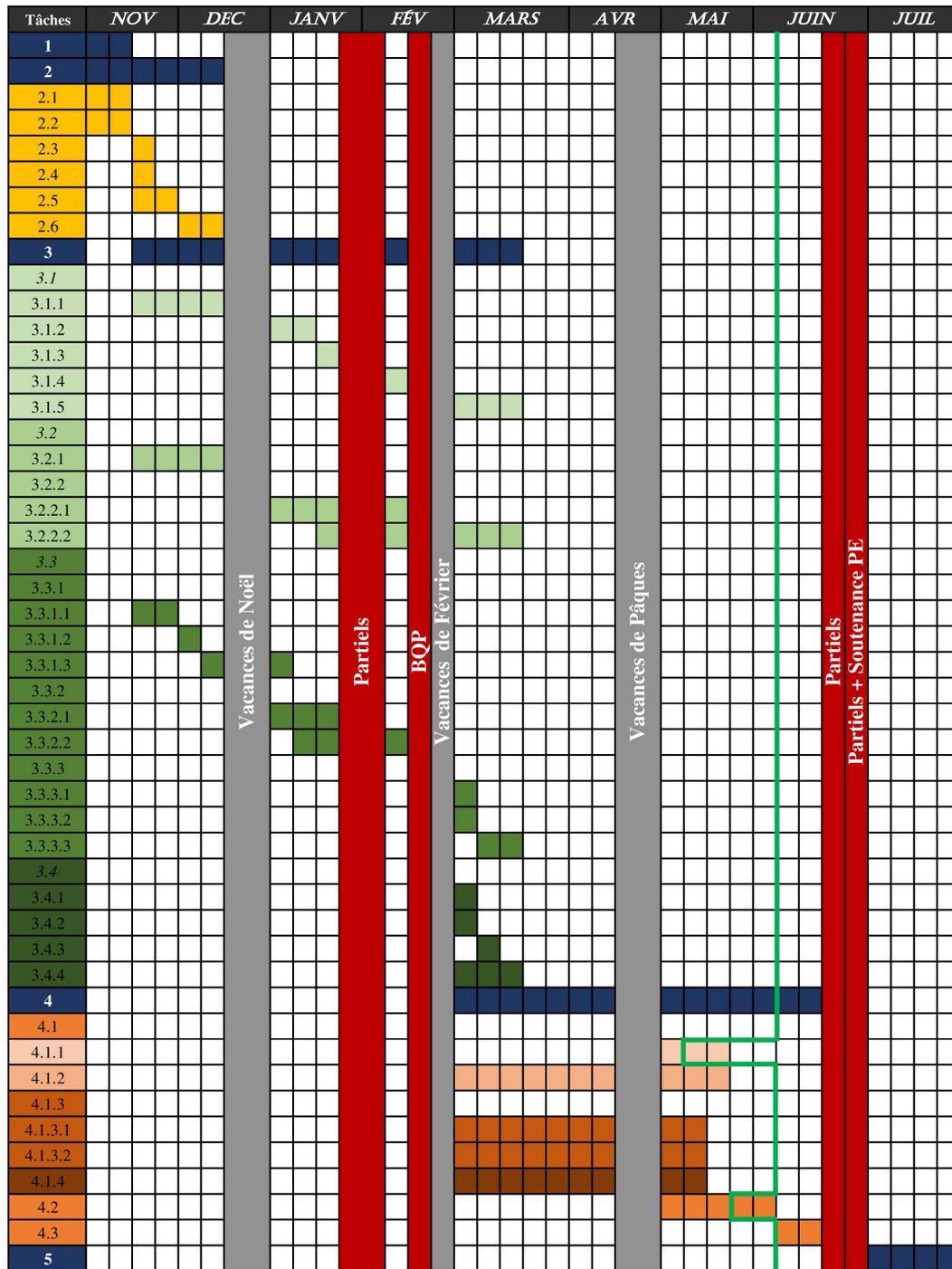


FIGURE 30 – Diagramme de Gantt

8 Annexe : Trésorerie

Le projet de réalisation d'une mini-fusée est particulier dans le sens où la finalisation du projet n'intervient pas au mois de juin, mais plutôt mi-juillet lors de la campagne du C'Space 2017 à Tarbes. C'est à ce moment-là que le propulseur sera intégré à la fusée pour qu'elle puisse être lancée dans le ciel et que le système de ralentissement se déploie.

Or les coûts relatifs à cette campagne sont relativement élevés. C'est pourquoi un budget supplémentaire a été demandé lors du programme Bonus Qualité Projet proposé par l'École Centrale de Lyon. Sur les 1820€ requis, seuls 700€, ont été accordés. Bien que cette diminution de budget total n'impacte en rien la fabrication de la fusée en elle-même, la campagne sera désormais limitée à 2 personnes maximum.

La figure 31 résume la trésorerie estimée en début de projet et la trésorerie réel du projet.

Commandes (TTC)	Dépenses budget PE	Dépenses BQP
Dépenses effectuées		
Maquette	0,00 €	
Carte électronique	0,00 €	
Composants électroniques	100,30 €	
Dépenses prévues		
Tube du bas	0,00 €	
Tube du milieu	3,40 €	
Servo-moteur	29,70 €	
Fabrication pales (tube PVC)	25,00 €	
Charnières à ressort fixation pales	96,40 €	
Fils d'attache des pales	5,00 €	
Attaches métalliques des fils	20,00 €	
Œillets métalliques	5,99 €	
Anneau élastique	5,00 €	
Crochet bobine	2,79 €	
Impression 3D des pièces/blagues	0,00 €	
Usinage des ailerons	0,00 €	
Visserie et colle forte		25,00 €
Campagne C'Space		
RCE2 (50% remboursé)		45 €
RCE3 (50% remboursé)		50 €
Frais d'inscription		950 €
Frais de transport		750 €
TOTAL	293,58 €	1 820 €

Budget du Projet	
Budget Initial	300 €
Bonus Qualité Projet	700 €
Budget Total	1 000 €

Dépenses	
Maquette	
Récupération	0 €
Fusée	
Composants électroniques	95,36 €
Moteurs	45,25 €
Fabrication des pales	23,49 €
Matériel de fixation	38,26 €
Total	202,36 €
Campagne de Lancement (2 personnes)	
Frais d'inscription	399,80 €
Frais de transport	300 €
Total	699,80 €
Total Dépenses	902,16 €

FIGURE 31 – Comparaison entre trésorerie prévisionnelle et trésorerie réelle

9 Annexe : Ailerons

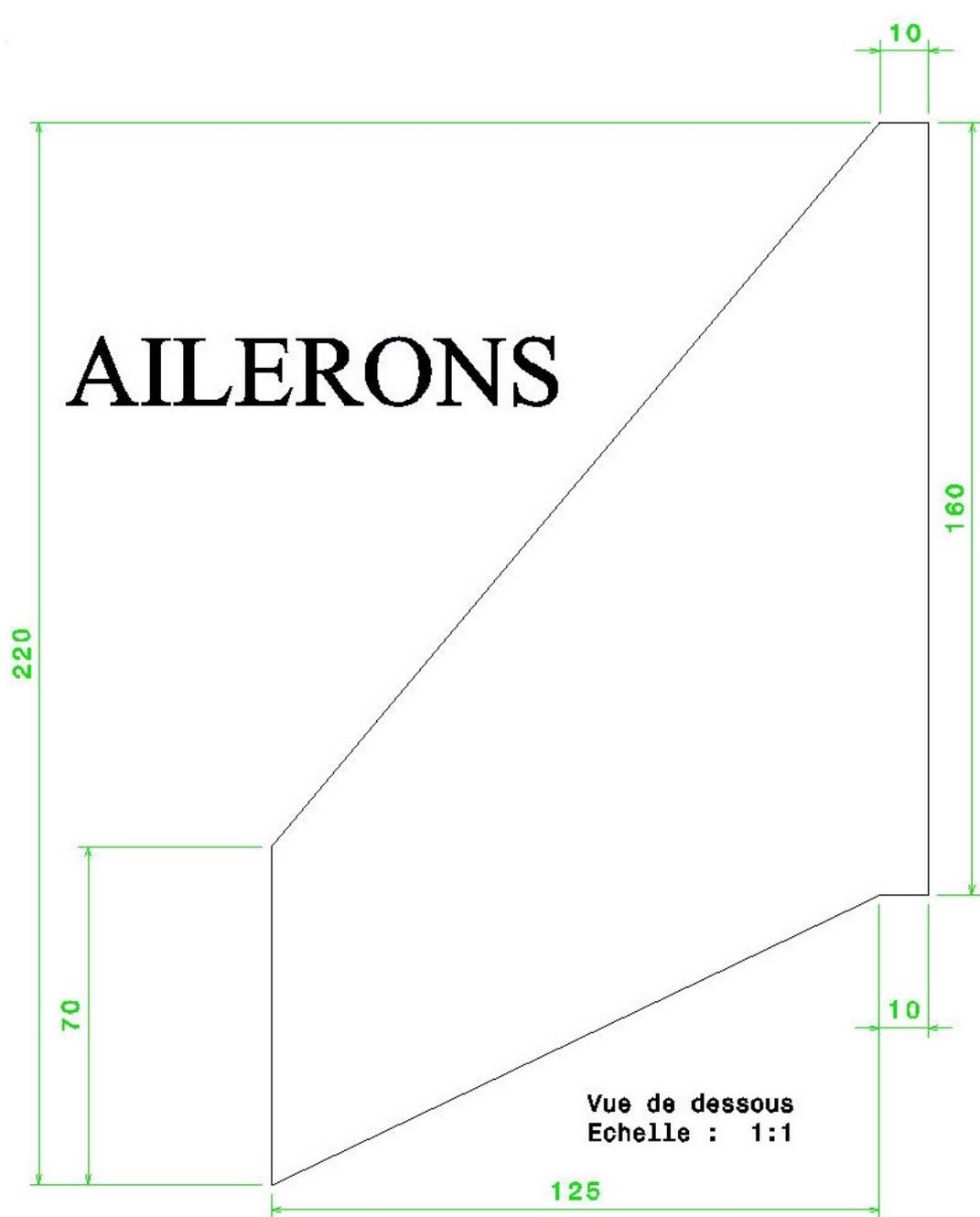


FIGURE 32 – Plan des ailerons

10 Annexe : Liste des pièces

	Liste des pièces	Quantité	OK ?
Achats / Commandes	Composants électroniques	14	OK
	Cartes électroniques	2	OK
	Moteur	1	OK
	Tube PVC	1	OK
	Charnières ressort	6	OK
	Fil de pêche	1	OK
	Anneau élastique	1	OK
	Tube carton du bas	1	OK
	Tube carton du milieu	1	OK
	Visserie	1	OK
	Colle forte	1	OK
	Electronique	Carte séquenceur	-
Moteur		-	Non OK
Interrupteurs		-	OK
Fonctionnement global		-	Non OK
Impression 3D	Coiffe	1	OK
	Système de libération + bobine	1	OK
	Bague fixation électronique	1	OK
	Bague moteur	1	OK
	Bague charnières	1	OK
	Bague inter-tubes	1	OK
	Bague propulseur haute	1	OK
	Bague propulseur basse	1	OK
	Bague accroche ailerons	1	OK
	Crochet accroche pale	6	OK
Usinage	Ailerons	4	Non OK
	Fabrication pales	6	OK
Assemblage	Assemblage pales	-	OK
	Assemblage partie supérieure	-	Non OK
	Assemblage partie inférieure	-	OK
	Assemblage complet	-	Non OK

FIGURE 33 – Liste des pièces

11 Annexe : Liste des liaisons

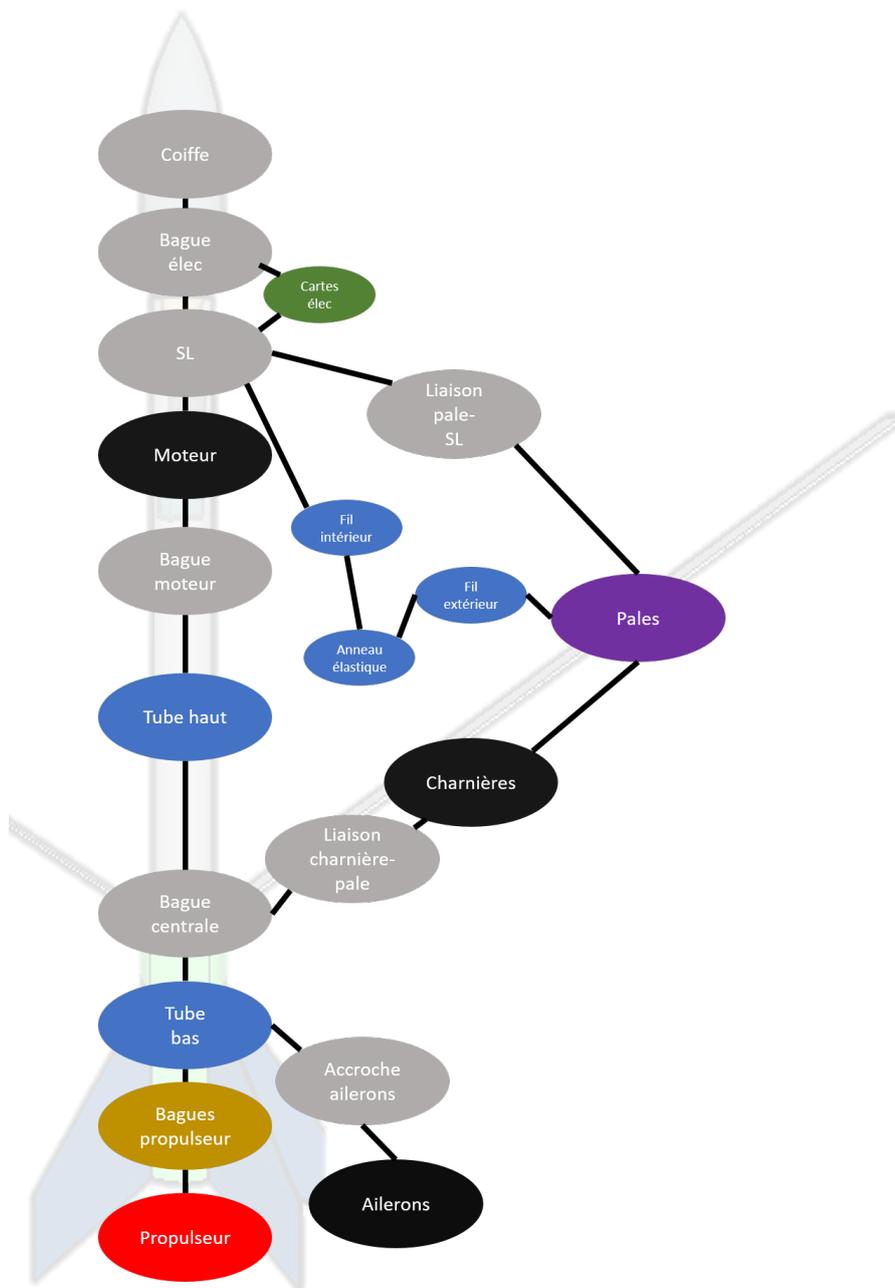


FIGURE 34 – Schéma de toutes les liaisons

12 Annexe : Électronique

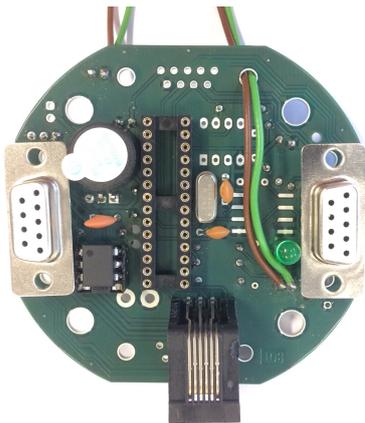
12.1 Principaux éléments de la partie électronique

12.1.1 batterie



La batterie utilisée fournit une tension nominale de 7,4V. Elle permet d'alimenter la carte électronique et de fournir l'énergie au servomoteur pour tourner.

12.1.2 carte électronique



La carte utilisée ici est une carte séquenceur. Les fonctions que doivent remplir cette carte sont détaillés dans la section [3.1.1](#) l'explication du choix de ce type de carte est détaillé en section [4.2.2](#). Sur l'image ci-contre, il est possible de voir que la carte se compose d'une multitude de composants (27 en tout). Cependant seuls 4 d'entre eux seront mentionnés dans la suite du rapport. Le rôle de ces composants est détaillé dans le tableau ci-dessous.

Image	Nom	Quantité	Fonction
	LED	3	S'allume en vert pour indiquer le bon fonctionnement de la carte
	Buzzer	1	Sonne à une fréquence aigüe (4kHz) à 80dB
	Jack	1	Permet de lancer la minuterie lorsque l'embase et la prise se détachent
	Interrupteur	1	Commande la mise sous tension de la carte

12.1.3 servomoteur



Le servomoteur aura pour but de faire tourner la partie haute de la fusée et de contribuer au déploiement des pales comme expliqué en section 3.2. Il se commande en position grâce à un signal en impulsions de fréquence $50Hz$. La largeur de l'impulsion varie de $1ms$ à $2ms$ et dépend linéairement de la position qui varie alors de 0° à 180° . En figure 35 est donné l'allure de ces signaux de commande. Par ailleurs, ce servomoteur développe un couple de $1,6kg.cm$ lorsqu'il est alimenté sous $6V$.

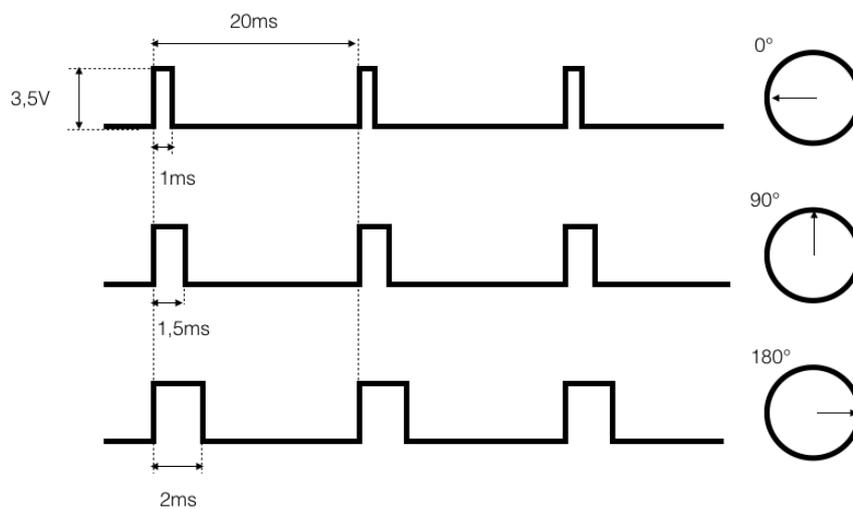


FIGURE 35 – Différentes signaux de commande faisant tourner le servomoteur dans différentes positions

12.3 Code informatique

```

#include <18F2685.h>
#define ICD=TRUE
#define delay(clock=20M)
#define fuses HS,NOPROTECT,NOLVP,NOWDT
#define BUZZER (PIN_A5)
#define JACK (PIN_C0)
#define LED1 (PIN_A3)
#define LED2 (PIN_C1)
#define LED3 (PIN_A2)
#define LENT 1000
#define RAPIDE 250
#define SERVO (PIN_B1)
#define TEMPS 10

void blink(unsigned int pin, unsigned int32 periode) // Fonction clignotement
{
    output_high(pin);
    delay_ms(periode);
    output_low(pin);
    delay_ms(periode);
}

void buzz(unsigned int i) //Fonction pour faire sonner le buzzer
{
    output_high(BUZZER);
    delay_ms(i);
    output_low(BUZZER);
}

void main()
{
    long i;

    // La carte est mise sous tension mais le Jack n'est pas branche //
    for (i=0;i<2;i++)
        buzz(); //le buzzer sonne 2 fois
    while(!input(JACK))
        blink(LED1, LENT);

    // On branche le Jack //
    buzz(100);
    while (input(JACK))
        blink(LED1, RAPIDE);

    // Le Jack est arrache, on clignote tant que l'apogee n'est pas atteinte //
    for (i=0;i<3;i++)
        blink(LED2,1000); // La LED clignote pendant 6.7ms
    delay_ms(500); // total d'attente 6.5s : il manque 200ms
    blink(LED3,100); // total 6.7s : l'apogee est theoriquement atteinte

```

```
// L'apogee est atteinte, on fait tourner le moteur //  
for (i=0;i<10;i++)  
  {  
    output_high(SERVO);  
    delay_us(2000);      //Impulsion de 2 ms  
    output_low(SERVO);  
    delay_ms(19);  
  }  
  output_high(BUZZER);  
}
```