

Projet d'études n°32

Noms des élèves :

Pierre-Arthur AUGÉ
Etienne BASTIEN
Etienne DELANGUE
Timothée GETTI
Julien LAZURE

Commanditaire :

Centrale Lyon Cosmos

Tuteur scientifique :

David NAVARRO

Conseiller en communication :

Philippe THIMONIER

Conseillère en Gestion de Projet :

Cécile NOUGUIER

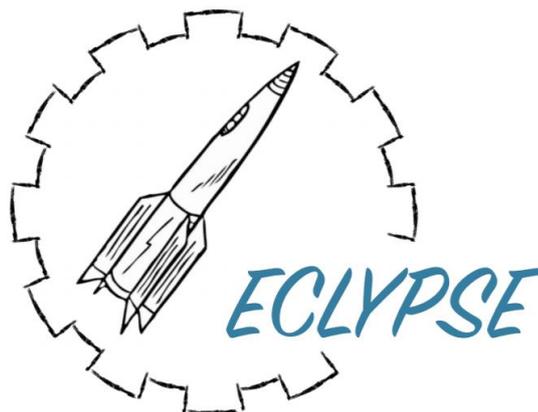
Département d'accueil :

Département EEA

Date du rapport :

9 Juin 2017

Mini-fusée : Mesure de pression et communications sans fil courte portée



Résumé

Le Projet d'Etudes (PE) n°32 a pour objectif la réalisation d'une mini-fusée dont le lancement est prévu lors de la campagne nationale de lancement C'Space en juillet 2017. Celle-ci devra répondre à trois critères principaux :

- Respecter le cahier des charges de Planète Sciences qui est l'association organisatrice de la campagne de lancement avec le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)
- Réaliser un vol nominal, c'est-à-dire s'achevant par la récupération de la fusée intacte
- Mesurer la pression au cours du vol afin de réaliser la détection de l'apogée grâce à ces données

Le projet est commandité par Centrale Lyon Cosmos (CLC), association liée à l'École Centrale de Lyon, et s'inscrit dans le cadre des projets de mini-fusées de Planète Sciences. Le CLC propose des PE de ce type depuis maintenant plusieurs années. De ce fait, la pérennisation des connaissances apportées par les précédents projets nous a permis de réaliser rapidement les tâches qui ne sont pas spécifiques à notre projet, et ainsi d'éviter certaines problématiques. C'est pourquoi la structure générale de la fusée est assez proche de celle des mini-fusées réalisées par le passé. Elle s'organise en plusieurs ensembles fonctionnels tels que le module électronique, le module parachute ou encore le module propulseur, et des éléments plus simples comme la coiffe, l'enveloppe ou les ailerons.

Toutefois, notre mini-fusée nommée ECLYPSE comporte trois principales spécificités. Celles-ci correspondent au nouvel emplacement du module parachute, à la conception totalement repensée de la bague la plus importante du module électronique, et enfin au déclenchement du déploiement du parachute par mesure de pression.

Par ailleurs, bien que basée sur les projets précédents, notre mini-fusée a une conception technique qui est adaptée à ses spécificités et sa structure a été améliorée. Cela passe notamment par l'intégration d'un système de mesure de pression composé d'un tube de Pitot et d'un manomètre différentiel dans sa coiffe. Le but étant d'enregistrer les données de pression puis de les traiter pour pouvoir déclencher le déploiement du parachute au moment où l'apogée est atteinte, et ainsi assurer un atterrissage préservant la mini-fusée. L'amélioration repose quant à elle sur l'optimisation de plusieurs éléments mécaniques, tout particulièrement les bagues et les ailerons afin de gagner en légèreté.

Pour accompagner l'équipe du projet tout au long de cette conception technique, plusieurs rencontres organisées par Planète Sciences ont eu lieu. La dernière s'est tenue le 3 juin 2017, elle nous a permis de réaliser rapidement les derniers ajustements nécessaires et de faire le point sur l'avancement de la mini-fusée, qui a été évalué à 85%. En effet, le montage de la fusée a été fait avec la quasi-totalité de sa structure mécanique, la partie informatique arrive à son terme, et les cartes électroniques ont été fabriquées et testées. Il reste principalement à réaliser des essais, notamment de simulation du vol pour s'assurer que tout fonctionne correctement, et de l'habillage.

Cependant, quelques mois après le début du projet, nous avons mis de côté la partie communication sans fil courte portée. Ce choix a été motivé par plusieurs raisons. Avant tout par la prédominance de la mesure de pression sur cette télémétrie, puisque la transmission des données ne présente aucun intérêt dans le cas d'une mesure de pression non fonctionnelle. Mais aussi par le fait que cette communication a un impact notable sur le poids de la mini-fusée et donc sur l'altitude atteinte, qui est l'un des principaux critères de performance.

Les perspectives d'avenir de la fusée ECLYPSE sont bien entendu sa participation à la campagne de lancement puisque que cela correspond à l'aboutissement et à la concrétisation de notre travail. A l'issue de ce vol il s'agira alors d'analyser les résultats obtenus et de faire un point final sur le déroulement de l'ensemble du projet. C'est ainsi qu'ECLYPSE rejoindra la liste des mini-fusées réalisées à l'École Centrale de Lyon et contribuera à son tour à la réussite des projets futurs en tirant un maximum d'enseignements de cette expérience.

Summary

The aim of the studies project n°32 is the design and construction of a mini-rocket which launch is scheduled during the C'Space national launching campaign in July 2017. The rocket will have to comply with three main requirements:

- Respect the requirement specifications of Planete Sciences which is the association organizing the launch campaign with the Centre National d'Etudes Spaciales
- Execute a nominal flight, that is to say ending with the recovery of the intact rocket
- Gather data that will allow us to conclude on the possibility to detect the apogee of the flight using a pressure sensor.

This project is sponsored by the CLC (Centrale Lyon Cosmos), an organization linked with the Ecole Centrale de Lyon and is part of the Planete Sciences projects. The CLC has been sponsoring study projects on mini-rockets for a few years now, allowing us access to knowledge that sped up the project on tasks that were not specific to our project and allowing us to sidestep classic problems. That is why the general structure of the rocket is rather close to that of the mini-rockets realized in the past. It gets organized in several functional sets such as the electronic module, the parachute module or the propulsive module, and elements simpler as the headgear, the envelope or the ailerons.

However, our mini-rocket named ECLYPSE presents three main specificities. These correspond to the new location of the module parachute, to the design totally rethought of the most important ring of the electronic module, and finally to the release of the deployment of the parachute by measure of pressure.

Besides, although based on the previous projects, our mini-rocket has a technical design which is adapted to its specificities and its structure was improved. It comes from the integration of a measurement system of pressure compound of a tube of Pitot and a differential manometer in its headgear. The purpose is to record the data of pressure then to handle them to be able to activate the deployment of the parachute when the peak is reached, and so to assure a landing protecting the mini-rocket. The improvement consists on the optimization of several mechanical elements, particularly rings and ailerons to gain in lightness.

To go with the project team throughout this technical design, several meetings organized by Planet Sciences took place. The last one was on June 3rd, 2017, it allowed us to realize quickly the last necessary adjustments and to review the progress of the mini-rocket, which was estimated at 85 %. Indeed, the assembly of the rocket was made with almost all of its mechanical structure, the IT part comes to an end, and electronic boards were made and tested. It remains mainly to realize tries, in particular simulation of the flight to make sure that everything works correctly, and of the casing.

However, a few months after the beginning of the project, we put aside the part wireless short-range communication. This choice was motivated by several reasons. Above all by the ascendancy of the measure of pressure on this telemetry, because the data transmission presents no interest in the case of a measure which doesn't work. But also by the fact that this communication has a notable impact on the weight of the rocket and thus on the reached height, which is one of the main criteria of performance.

The future prospects of the rocket ECLYPSE are naturally its participation in the launching campaign because that corresponds to the outcome and to the realization of our work. At the end of this flight, we will have to analyzing the obtained results and of making a full stop on the progress of the whole project. This is the way ECLYPSE will join the list of mini-rockets realized to the École Centrale of Lyon and will contribute in turn to the success of the future projects by pulling a maximum of teachings of this experience.

Remerciements

Avant toute chose, l'équipe du projet souhaite remercier tout particulièrement Monsieur David Navarro, notre tuteur scientifique, pour l'aide qu'il nous a apporté tout au long de l'année, à travers ses conseils et ses encouragements. Sa présence et son savoir se sont avérés essentiels à l'avancement de notre projet et à la concrétisation de la mini-fusée.

Nous tenons également à remercier Madame Cécile Nougier et Monsieur Philippe Thimonier, nos conseillers en gestion de projet et en communication, pour leurs avis constructifs durant les rendez-vous de pilotage ainsi que les travaux dirigés.

Nous exprimons beaucoup de reconnaissance envers le département de mécanique des fluides de l'Ecole Centrale de Lyon, pour le prêt de leur matériel de TP, ainsi que leur support durant les essais pratiques.

Nous remercions l'équipe du Bonus Qualité Projet qui nous a accordé leur confiance à travers un financement supplémentaire. Celui-ci nous permet de mener notre projet à son terme en allant à la campagne de lancement de notre mini-fusée.

Nous remercions aussi l'organisme Planète Sciences et le Centre National d'Etudes Spatiales pour leur accompagnement tout au long de la réalisation de la mini-fusée. Nous les remercions également pour leur campagne de lancement C'Space qui nous permettra de voir l'aboutissement de notre projet en juillet.

De plus, nous remercions chaleureusement Julien Hamoy, Noé Bolin ainsi que l'association Centrale Lyon Cosmos dans son ensemble pour leurs conseils et leur bienveillance, tout particulièrement au début de notre projet. Une partie des remerciements revient également à Julien Cochard pour son suivi régulier de l'avancement de notre projet, ainsi que ses précieux conseils.

Enfin, nous pensons à toute l'équipe du PE n°31 pour leur présence et leur bonne humeur durant les séances de réalisation de notre mini-fusée. L'entraide qui s'est mise en place entre leur projet et le nôtre a été essentielle à la réalisation des deux mini-fusées.

Table des matières

RESUME	2
SUMMARY	3
REMERCIEMENTS	4
TABLE DES MATIERES	5
TABLE DES FIGURES	6
INTRODUCTION	7
1^{ERE} PARTIE : CONTEXTE DU PROJET ECLYPSE	8
I-1. L'EQUIPE DU PROJET	8
I-2. LES ORGANISMES LIES AU PROJET	9
I-2.a) Centrale Lyon Cosmos (CLC)	9
I-2.b) Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)	9
I-2.c) Planète Sciences	9
I-3. LA CAMPAGNE DE LANCEMENT C'SPACE	9
I-4. A PROPOS DU VOL DE LA FUSEE	10
I-4.a) Principe général	10
I-4.b) Cahier des charges	10
2^{EME} PARTIE : PRESENTATION GENERALE DE LA MINI-FUSEE	12
II-1. SA STRUCTURE MECANIQUE	12
II-2. SA STRUCTURE ELECTRONIQUE.....	14
3^{EME} PARTIE : INNOVATIONS PAR RAPPORT AUX MINI-FUSEES PRECEDENTES	15
III-1. LA MODIFICATION DE LA POSITION DU PARACHUTE.....	15
III-2. LA NOUVELLE CONCEPTION DE LA BAGUE MIXTE	15
III-3. LE DEPLOIEMENT DU PARACHUTE PAR MESURE DE PRESSION.....	16
4^{EME} PARTIE : CONCEPTION TECHNIQUE D'ECLYPSE	17
IV-1. LA PARTIE MECANIQUE.....	17
IV-1.a) La coiffe.....	17
IV-1.b) L'enveloppe	18
IV-1.c) Les bagues supportant les cartes électroniques.....	18
IV-1.d) La case parachute	19
IV-1.e) Les bagues supportant le propulseur	19
IV-1.f) Les ailerons	20
20	
IV-2. LA PARTIE ELECTRONIQUE.....	21
IV-2.a) Les composants électroniques	21
IV-2.b) Les cartes électroniques	23
IV-2.c) Connections et liens entre les cartes électroniques.....	26
IV-3. LA PARTIE INFORMATIQUE	27
IV-3.a) Présentation générale.....	27
IV-3.b) Cartes programmables	29
5^{EME} PARTIE : RESULTATS OBTENUS A LA DATE DU 9 JUIN 2017	33
V-1. L'AVANCEMENT ACTUEL D'ECLYPSE	33
V-1.a) Vue globale de l'avancement.....	33
V-1.b) Eléments manquants	33
V-2. LES INFORMATIONS RELATIVES AU VOL	34
6^{EME} PARTIE : PERSPECTIVES ET AVENIR DU PROJET	36

VI-1. BILAN ET INNOVATIONS DU PROJET.....	36
VI-2. AMELIORATIONS ET PERSPECTIVES POSSIBLES	36
VI-3. TRANSMISSION DE CONNAISSANCE	36
CONCLUSION.....	37
BIBLIOGRAPHIE.....	38
ANNEXE.....	39
ANNEXE 1 : ETALONNAGE DU CAPTEUR DE PRESSION.....	39
APPENDICE DE GESTION DE PROJET	41
GDP 1 : DIAGRAMME DE GANTT	41
GDP 2 : BUDGET DU PROJET	42
CHECK-LIST.....	43

Table des figures

Figure 1 : Trombinoscope de l'ensemble des intervenants sur le projet	8
Figure 2 : Logo de Centrale Lyon Cosmos	9
Figure 3 : Logo du Centre National d'Etudes Spatiales	9
Figure 4 : Logo de Planète Sciences	9
Figure 5 : Illustration des étapes d'un vol nominal (Source : Rapport du PE25 de 2016)	10
<i>Figure 6 : Vue extérieure de la mini-fusée avec son enveloppe transparente</i>	12
Figure 7 : Trombinoscope de l'ensemble des intervenants sur le projet	13
Figure 8 : Illustration de la structure électronique	14
Figure 9 : Vue extérieure de la fusée du PE25 de 2015 (Source : Rapport du PE25 de la promo 2015E)	15
Figure 10 : Photographie de la bague mixte et de sa carte électronique	16
Figure 11 : Photographie du manomètre différentiel servant à la mesure de pression	16
Figure 12 : Vue en coupe et photographie de la coiffe comportant le tube de Pitot	17
Figure 13 : Photographie de la peau d'ECLYPSE à l'état brut	18
Figure 14 : Photographie de bagues de la mini-fusée avant montage	18
Figure 15 : Vue de la case parachute avec sa trappe transparente	19
Figure 16 : Vue des bagues supportant le propulseur	19
Figure 17 : Photographie d'un propulseur Cariacou	20
Figure 18 : Dessin de définition des ailerons	20
Figure 19 : Illustration de la structure électronique	21
Figure 20 : Photographie de la batterie utilisée	22
Figure 21 : Photographie du servomoteur HITEC HS-5055MG	22
Figure 22 : Photographie du manomètre différentiel MPX2200DP	23
Figure 23 : Photographie du connecteur DB9	23
Figure 24 : Photographie de la carte alimentation	24
Figure 25 : Schéma explicatif du fonctionnement de la carte séquenceur	24
Figure 26 : Photographie de la carte séquenceur	25
Figure 27 : Schéma explicatif du fonctionnement couplé des cartes capteurs	25
Figure 28 : Photographie de la carte capteur "mère"	25
Figure 29 : Photographie de la carte mixte	26
Figure 30 : Schéma explicatif des connexions entre les cartes électroniques	27
Figure 31 : Photographie du microcontrôleur PIC 18F2685	27
Figure 32 : Photographie du branchement des cartes à l'ordinateur	28
Figure 33 : Photographie de l'Interface PIC C Compiler	28
Figure 34 : Photographie d'un message d'erreur du logiciel	29

Figure 35 : Schéma de l'architecture du programme de la carte séquenceur	30
Figure 36 : Schéma du fonctionnement du programme de l'ensemble capteur	32
Figure 37 : Photographie d'ECLYPSE une fois le montage terminé	33
Figure 38 : Trajectoire théorique d'ECLYPSE d'après le logiciel de simulation Trajecto	34
Figure 39 : Allure du logiciel Trajecto après simulation	35
Figure 40-Notre montage sur le banc du jet d'air du laboratoire de mécanique des fluides	39
Figure 41-Courbe d'étalonnage du manomètre différentiel: relation entre la résistance d'un résistor de l'amplificateur 1 et la différence de tension en sortie du manomètre	40

Introduction

Depuis plusieurs années, l'association Centrale Lyon Cosmos de l'École Centrale Lyon commandite des projets d'études dont le but est la réalisation de mini-fusées. Celles-ci sont destinées à faire un unique vol lors de la campagne de lancement nationale C'Space. C'est dans ce cadre que s'inscrit le projet d'études n°32 qui nous a été confié. L'objectif du projet est donc de réaliser une mini-fusée, nommée ECLYPSE, d'une taille d'environ un mètre de hauteur et qui devra être opérationnelle pour son lancement prévu en juillet 2017.

Il s'agit d'un projet multidisciplinaire puisque celui-ci fait appel à de la mécanique des solides mais aussi de l'électronique et de l'informatique. De ce fait, il y a une quantité de connaissances importante à assimiler pour le réaliser, celles-ci provenant pour la plupart des enseignements tirés des mini-fusées lancées les années précédentes. De plus, il nous a semblé pertinent de diviser l'équipe du projet selon ces trois domaines afin de permettre une spécialisation de chaque élève et la parallélisation des tâches. Cette stratégie a permis un gain de temps et d'efficacité.

La principale particularité de notre mini-fusée par rapport à celles des années précédentes réside dans la nature et le rôle de la mesure qui sera effectuée lors du vol. En effet, on verra que la fusée est munie d'un système de mesure de la pression qui devra permettre une détection de l'apogée et un déclenchement du système de récupération au bon moment, permettant ainsi un retour au sol en douceur et un vol réussi.

Dans un premier temps, on présentera le contexte de notre projet. Puis on découvrira la structure générale de la mini-fusée, ainsi que les innovations qui lui ont été apportées par rapport aux précédentes. Ensuite, on précisera la conception d'ECLYPSE d'un point de vue technique. Après cela, les résultats obtenus à la date du rapport seront présentés. Et enfin on exposera les perspectives d'avenir du projet pour finalement aboutir à une conclusion générale.

1^{ère} partie : Contexte du projet ECLYPSE

I-1. L'équipe du projet

L'équipe d'élèves chargés de la réalisation de la mini-fusée est composée de 5 personnes comme on peut le voir sur la *figure 1* ci-dessous. Celle-ci présentant des aspects techniques variés, une répartition des rôles par pôles scientifiques a été adoptée en prenant en compte les compétences et préférences de chacun. L'équipe est ainsi divisée en 3 pôles : mécanique, électronique et programmation. Néanmoins, il a fallu assurer une bonne communication et une coordination entre chaque pôle afin de préserver la cohésion de l'ensemble puisque la mini-fusée regroupe ses trois domaines. Les tâches liées à la gestion de projet ont quant à elles été réalisées par tous les membres du groupe.

En plus des élèves, un tuteur scientifique et deux conseillers ont accompagné le projet tout au long de l'année, à travers des conseils techniques, de gestion de projet ou encore de communication.

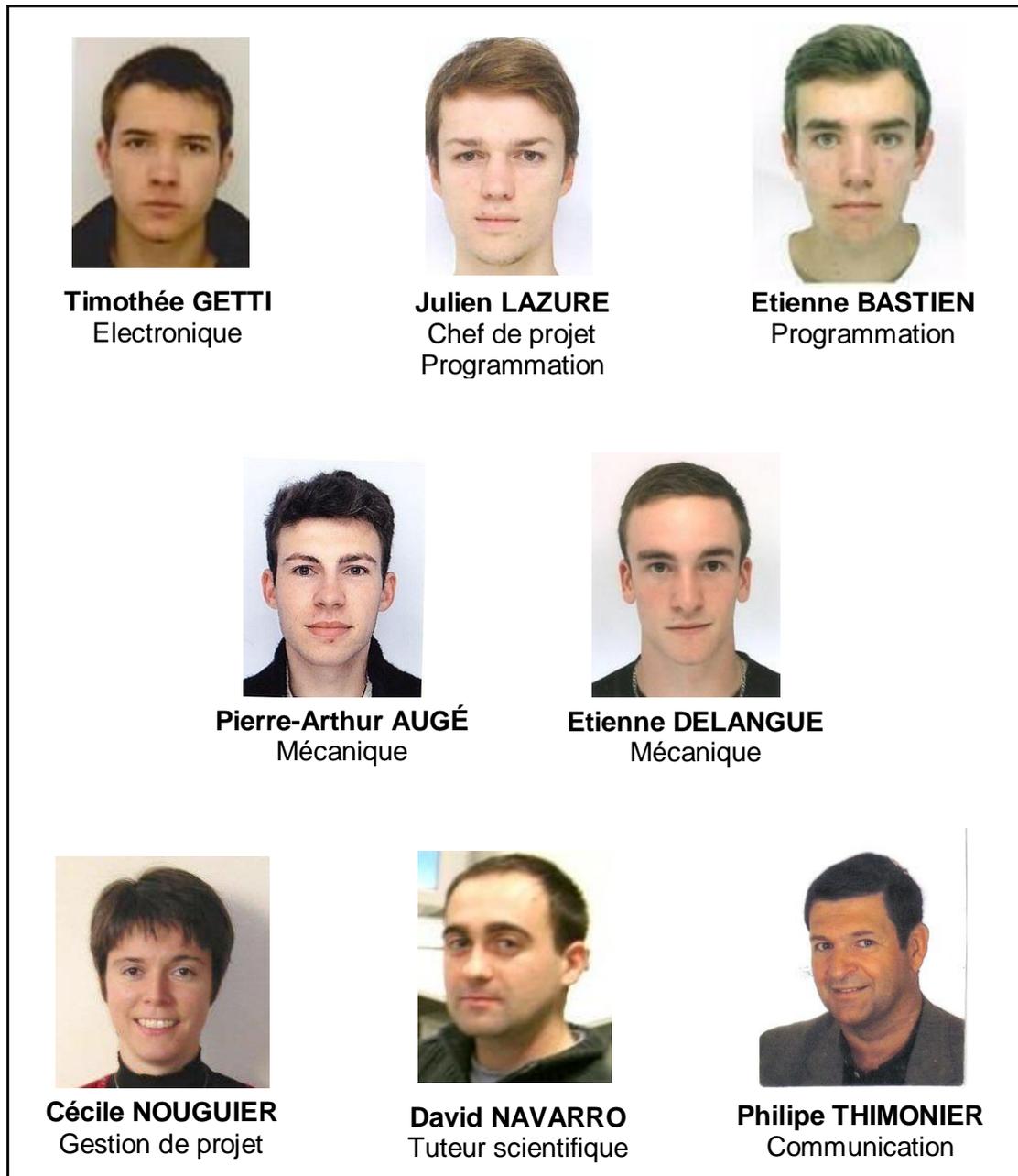


Figure 1 : Trombinoscope de l'ensemble des intervenants sur le projet

I-2. Les organismes liés au projet

I-2.a) Centrale Lyon Cosmos (CLC)



Figure 2 : Logo de Centrale Lyon Cosmos

Le CLC est une association liée à l'Ecole Centrale de Lyon, qui a pour mission de permettre aux élèves centraliens de pouvoir participer à des activités autour de l'espace. Le CLC est également le commanditaire des PE mini-fusées, qui sont au nombre de trois cette année. Par ailleurs, il prend part à des projets de plus grandes envergures menés par le CNES.

I-2.b) Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)



Figure 3 : Logo du Centre National d'Etudes Spatiales

Le CNES est un établissement public à caractère industriel et commercial qui propose aux pouvoirs publics la politique spatiale de la France et la met en œuvre dans cinq grands domaines stratégiques : Ariane, les Sciences, l'Observation, les Télécommunications et la Défense. Le CNES nous fournira le propulseur à poudre Cariatou qui permettra de lancer la fusée.

I-2.c) Planète Sciences



Figure 4 : Logo de Planète Sciences

Planète Sciences est une association à but non lucratif dont l'objectif est de promouvoir les sciences auprès des jeunes via de multiples projets. Avec le CNES, Planète Sciences organise la campagne de lancement C'Space consacrée au lancement de fusées étudiantes qui mesurent entre 70cm et 2m. Elle fournit également une aide technique et contrôle l'avancement du projet via les Rencontre Club Espace (RCE), auxquelles nous avons participé deux fois dans l'année.

I-3. La campagne de lancement C'Space

Chaque année se déroule la campagne de lancement C'Space. Tous les projets étudiants de fusée en France s'y retrouvent pour procéder aux dernières vérifications de leurs fusées et procéder à leurs lancements. Pour espérer pouvoir les lancer, il faut préalablement réussir tous les tests visant à vérifier la conformité de la fusée au cahier des charges de Planète Sciences. Cette année la campagne de lancement est prévue du 15 au 22 juillet à Tarbes sur la base militaire de Gers du 1^{er} Régiment de Hussards Parachutistes.

I-4. A propos du vol de la fusée

I-4.a) Principe général

Il faut est nécessaire que la mini-fusée intègre un système de récupération, dans notre cas un parachute, qui lui permettra d'effectuer un vol nominal, c'est-à-dire d'atterrir correctement afin d'être récupérée intacte. Pour cela, il faut déclencher le parachute au bon moment, l'idéal étant à l'apogée puisque qu'à cet instant la vitesse est minimale. Le but recherché cette année est de détecter l'apogée grâce à une mesure de pression dans la coiffe de la mini-fusée.

Pour remplir cet objectif, il est nécessaire d'avoir une intelligence à l'intérieur de la fusée pour analyser ces mesures de pression et réagir en fonction de ces dernières. Cette intelligence est constituée de plusieurs cartes électroniques commandées par des programmes informatiques, d'où l'existence des pôles programmation et électronique. En vol, la fusée devra également être stable et résister à d'importantes contraintes mécaniques. Le pôle mécanique conçoit la structure de la fusée de façon à ce qu'elle respecte le cahier des charges. La *figure 5* ci-dessous illustre les différentes étapes d'un vol nominal.

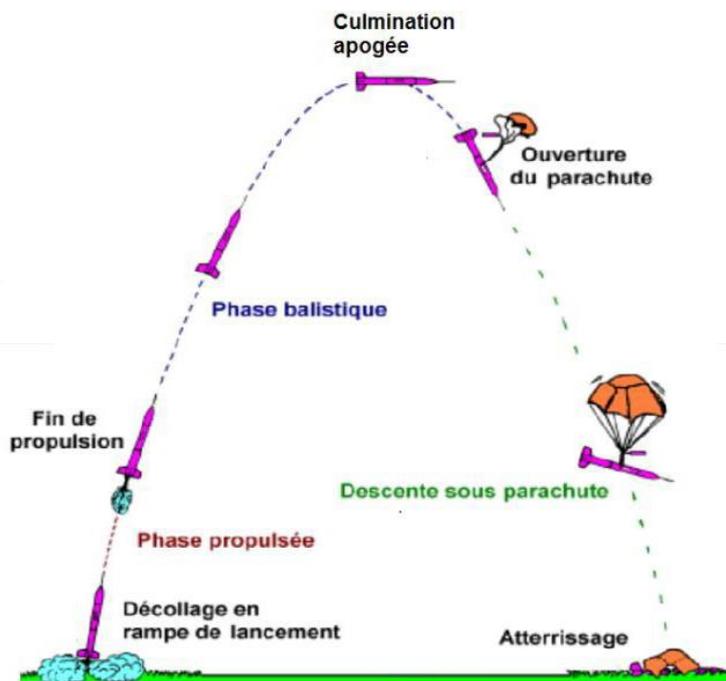


Figure 5 : Illustration des étapes d'un vol nominal (Source : Rapport du PE25 de 2016)

I-4.b) Cahier des charges

Le cahier des charges du projet se base à la fois sur les objectifs du projet mais également sur le cahier des charges fourni par Planète Sciences.

Fonctions principales :

- FP1 : Effectuer un vol nominal
- FP2 : Effectuer des mesures de pression

Fonctions secondaires :

- FS1 : Réaliser une télémétrie en temps réel

Généralités :

- GN1 : Ne pas mettre en danger qui que ce soit
- GN2 : Ne pas avoir d'impact sur l'environnement
- GN3 : Pouvoir accepter le propulseur Cariacou du CNES
- GN4 : Adapter la fusée à la rampe de lancement du CNES

Vol :

- VL1 : Réaliser un vol stable
 - VL1.1 : Maintenir le propulseur dans l'axe de la fusée
 - VL1.2 : Maintenir les ailerons dans l'axe de la fusée
 - VL1.3 : Avoir une vitesse en sortie de rampe supérieure à 18m/s
 - VL1.4 : Avoir une finesse comprise entre 10 et 20
 - VL1.5 : Avoir une portance comprise entre 15 et 30
- VL2 : Conserver une déformation longitudinale (flèche) inférieure à 1% entre la plaque de poussée et la coiffe
- VL3 : Avoir des ailerons adaptés à la fusée et aux efforts aérodynamiques

Récupération :

- RC1 : Garantir une vitesse de retour au sol entre 5 et 15m/s
- RC2 : Garantir le déploiement du système de récupération autour de l'apogée
- RC3 : Assurer un contrôle de l'ouverture de la trappe
- RC4 : Assurer le retour au sol dans la zone prévue par Planète Sciences
- RC5 : Assurer une attache solide du système de récupération à la fusée pour éviter un décrochage lors du déploiement du système et de la descente

Contraintes supplémentaires :

- FC1 : Communiquer l'état de la fusée à tout instant via LED et buzzer
- FC2 : Avoir un interrupteur de marche/arrêt sur la fusée
- FC3 : Assurer une autonomie électrique suffisante
- FC4 : Assurer un accès facile aux cartes électroniques
- FC5 : Orienter la prise jack (indicateur du décollage) vers le bas

2^{ème} partie : Présentation générale de la mini-fusée

II-1. Sa structure mécanique

La mini-fusée ECLYPSE s'inscrit dans la continuité des précédents projets de mini-fusées du CLC. C'est pourquoi elle se base sur un certain nombre d'éléments des années précédentes qui ont démontré leur efficacité. Afin de limiter les risques lors du vol, ces éléments ont été optimisés et adaptés à la mini-fusée mais leur matériaux n'ont pas été remis en question. On peut voir les principaux constituants de sa structure mécanique sur la *figure 6*, ce sont :

- La coiffe qui est conçue afin d'optimiser les frottements avec l'air. Faite en acide polylactique (PLA) et située à l'avant, elle permet une très bonne pénétration dans l'air. Sa spécificité est d'être réalisée en deux parties afin d'intégrer au mieux un tube de Pitot.
- L'enveloppe de la mini-fusée, autrement dit sa peau, qui est constituée de deux tubes en carton de 82mm de diamètre extérieur. Elle contient tous les éléments internes et assure la cohésion de la structure.
- Les différentes bagues en médium placées à l'intérieur de la peau. Elles servent de supports aux cartes électroniques embarquées ainsi qu'au propulseur, tout en apportant davantage de rigidité à l'ensemble.
- La case parachute accueillant le parachute et dont l'ouverture de la trappe permet le déploiement de ce dernier.
- Les ailerons qui sont faits en aluminium. Ils ont pour but d'assurer la stabilité de la mini-fusée au cours du vol et notamment d'éviter qu'elle ne vrille, c'est à dire qu'elle tourne sur elle-même.

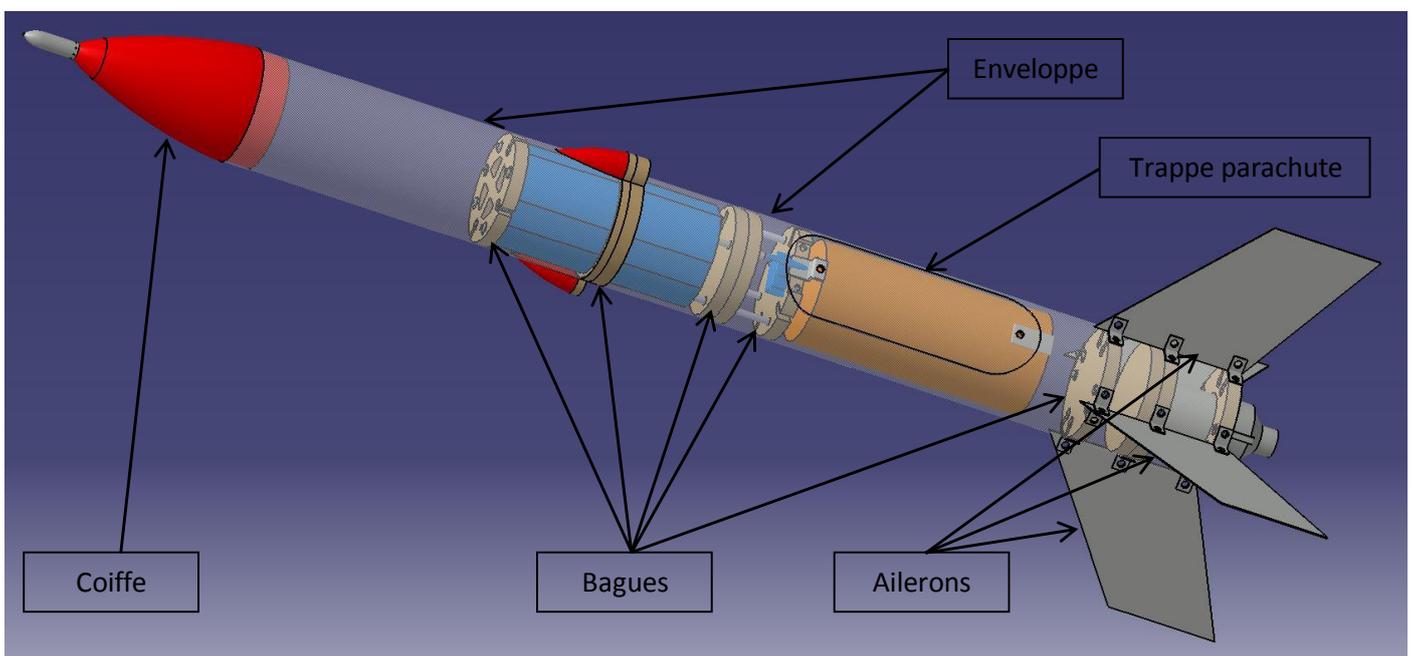


Figure 6 : Vue extérieure de la mini-fusée avec son enveloppe transparente

Depuis peu, le cahier des charges de Planète Sciences impose d'avoir accès à un interrupteur et à une diode électroluminescente depuis l'extérieur de la mini-fusée. Pour satisfaire ce critère, il est nécessaire d'avoir une bague de plus gros diamètre que les autres afin qu'elle affleure la peau de la fusée, c'est la bague mixte. Par conséquent l'enveloppe est divisée en deux parties de part et d'autre de la bague mixte. La cohésion entre ces deux parties de la peau et les bagues qui supportent les cartes électroniques est alors assurée par quatre tiges filetées. En effet chaque bague est fixée sur ces tiges filetées et les bagues aux extrémités sont vissées sur la peau. Toute cette structure permet de rigidifier l'ensemble et de placer les bagues où l'on souhaite pour positionner le centre de gravité de façon à assurer la stabilité de la mini-fusée. On peut l'observer partiellement sur la *figure 7* ci-dessous.

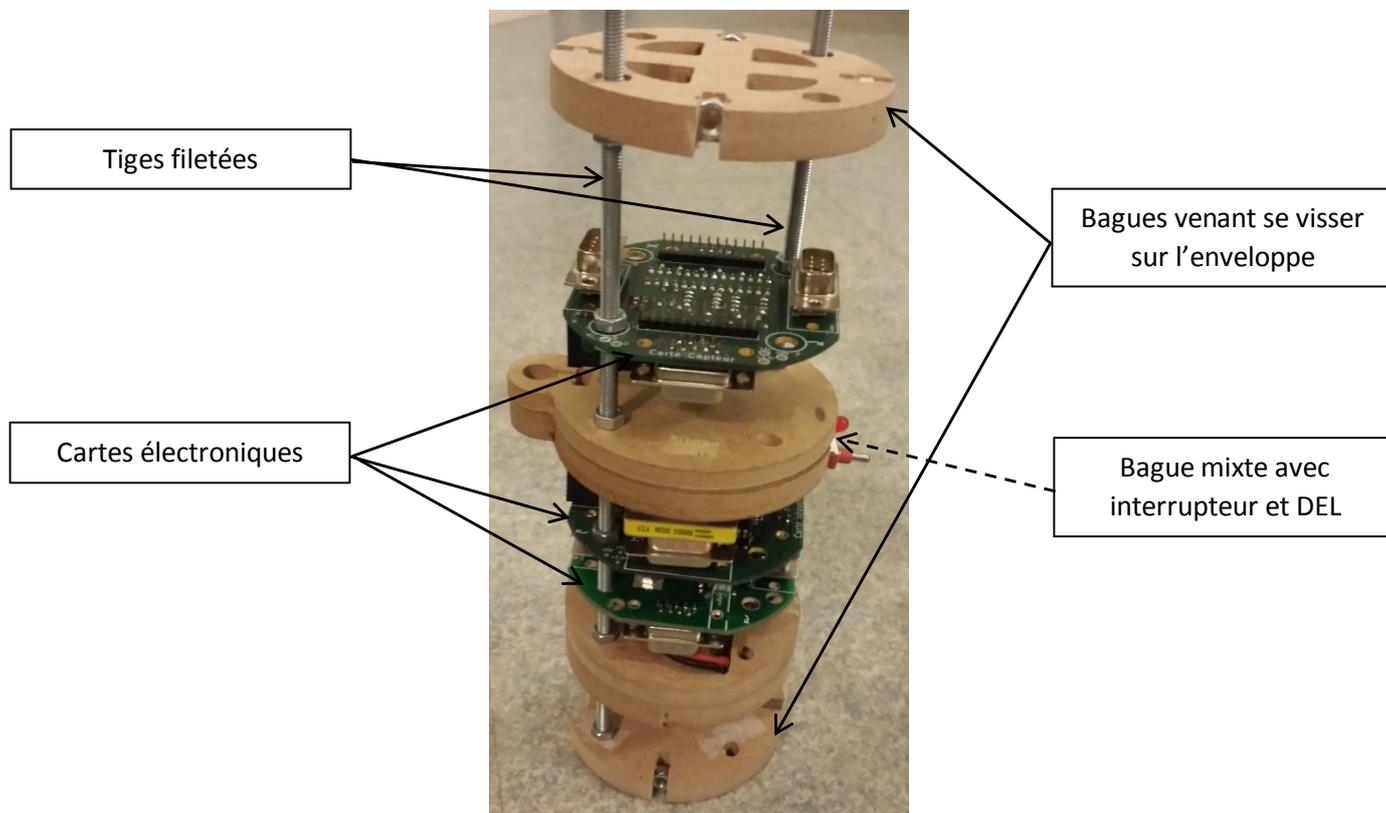


Figure 7 : Trombinoscope de l'ensemble des intervenants sur le projet

Si le choix des matériaux n'est pas remis en cause depuis quelques années, c'est grâce à leurs qualités qui assurent un très bon équilibre entre les trois critères principaux que sont le prix, le poids et la résistance. En effet, le carton, le médium et l'aluminium sont peu onéreux, légers, et offrent une résistance suffisante aux efforts subis lors du vol. Bien entendu, la réussite des campagnes de lancement précédentes vient fortement conforter ce choix. De fait, si des vols balistiques ont déjà eu lieu, les matériaux n'en étaient pas la cause.

Concernant le diamètre de l'enveloppe, il répond à une volonté du CLC de standardiser la taille des cartes électroniques. Elle a été choisie afin d'être suffisamment importante pour y souder les connecteurs et les composants. La dimension fixée pour les cartes impose alors les diamètres des bagues et de l'enveloppe.

La coiffe et les pièces ayant un profil aérodynamique ont été imprimées en 3D grâce aux imprimantes disponibles au Fablab de l'Ecole Centrale de Lyon, ce qui permet une économie d'argent et favorise l'autonomie de l'équipe.

Le cahier des charges de Planètes Sciences présenté plus haut reste, dans les grandes lignes, le même d'année en année. Sans cette constance il ne serait pas possible de s'appuyer sur les solutions mises en œuvre les années précédentes, bien qu'elles restent sujettes à des innovations.

De plus, Planètes Sciences fournit son propulseur et impose donc au projet de concevoir une mini-fusée capable de l'intégrer. On utilise pour cela un système de bagues en médium similaires à celles qui servent de support aux cartes électroniques. L'ensemble des bagues de la fusée sera présenté dans la suite du document.

II-2. Sa structure électronique

Afin d'enregistrer les données issues de la mesure de pression, de les traiter puis de transmettre les signaux de commande pour le déclenchement du parachute, plusieurs cartes électroniques et des programmes associés sont nécessaires :

- La carte alimentation qui permet d'adapter et de transmettre le courant venant de la batterie aux autres cartes électroniques. Elle est bien sûr indispensable au fonctionnement de toutes les autres cartes.
- La carte séquenceur est le cerveau de la mini-fusée. Elle traite et enregistre les informations qu'elle reçoit, et envoie l'instruction au servomoteur d'ouvrir la trappe du parachute.
- La carte capteur mère sur laquelle vient se fixer la carte capteur fille qui comporte le manomètre différentiel. Ce sont ces cartes électroniques qui permettent d'extraire des données de la mesure de pression et de les transmettre à la carte séquenceur.
- La bague mixte est le lien entre les deux parties de la mini-fusée ainsi qu'entre l'intérieur et l'extérieur de celle-ci. Elle permet à l'opérateur en charge du lancement de contrôler le fonctionnement de la mini-fusée à travers la DEL et l'interrupteur. De plus, c'est par l'intermédiaire de la prise jack qu'elle comporte que la mini-fusée est informée du décollage.

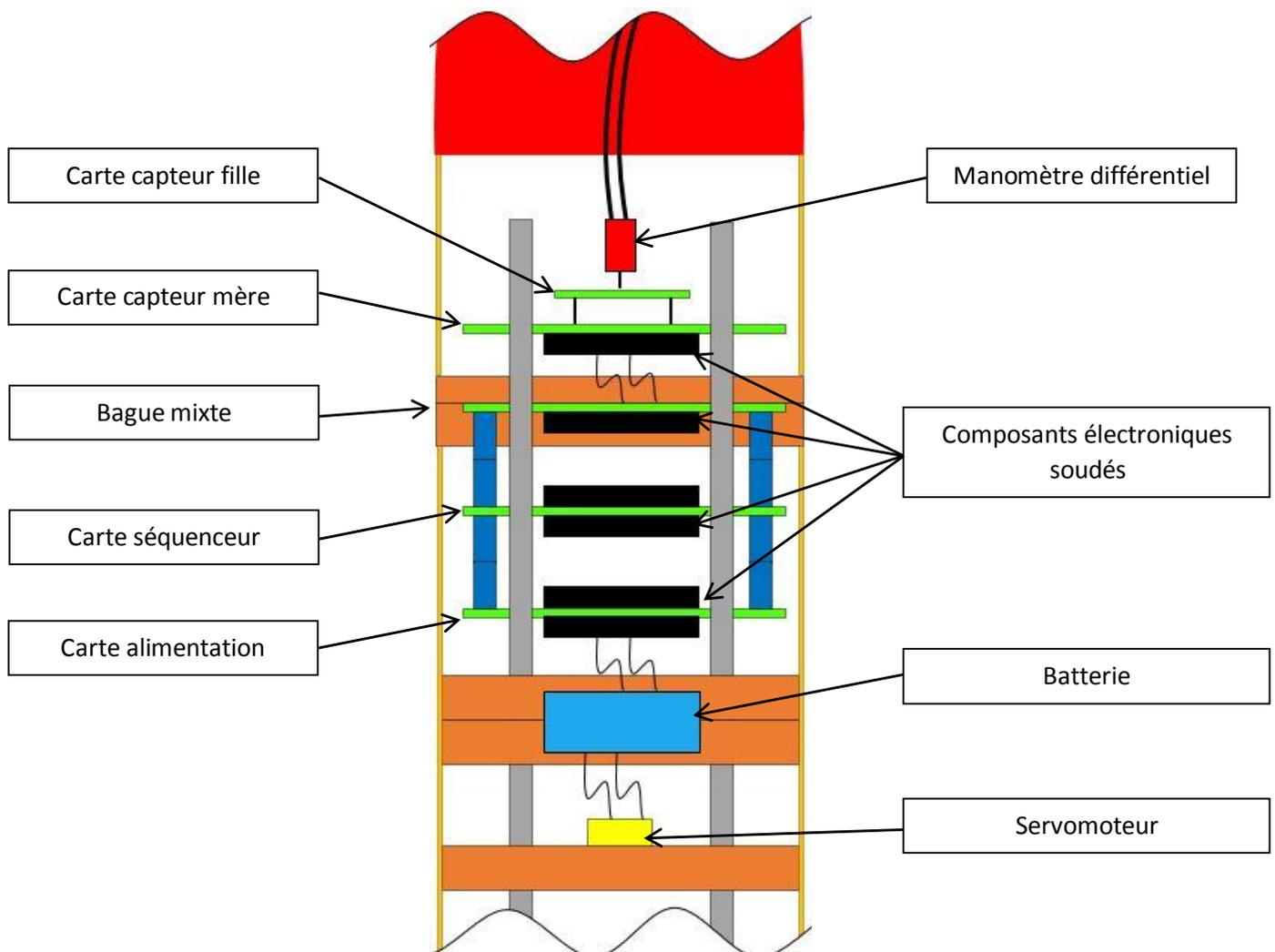


Figure 8 : Illustration de la structure électronique

3^{ème} partie : Innovations par rapport aux mini-fusées précédentes

Comme indiqué précédemment, la mini-fusée ECLYPSE s'inscrit dans une lignée de projets d'études qui a maintenant plusieurs années. A chaque nouveau projet, les équipes essayent d'améliorer la mini-fusée, que ce soit en termes de simplicité de conception et de fonctionnement ou en terme de résistance. Cependant, le travail effectué porte également sur des spécificités. L'acquisition des connaissances des années précédentes et l'appropriation du travail réalisé sur les mini-fusées précédentes restent des tâches demandant beaucoup de temps et d'implication.

Cette année, plusieurs modifications majeures ont donc été apportées. La première concerne la position du parachute, la seconde porte sur la bague mixte et la carte électronique qu'elle contient, la troisième est la méthode de détection d'apogée, enfin la quatrième est la réduction des fils transmettant l'énergie et l'information à l'intérieur de la fusée.

III-1. La modification de la position du parachute

Le parachute est l'un des éléments clés de la fusée. En effet, celui-ci permet de ramener la fusée au sol en toute sécurité. Les élèves des années précédentes le positionnaient dans la partie supérieure par peur qu'il s'enflamme ou fonde en étant à proximité du propulseur à poudre. En effet, le propulseur chauffe fortement lors du décollage. On vérifie bien grâce à la *figure 9* que sur la mini-fusée précédente, la case parachute se situait dans la partie haute, entre les deux bagues orange.

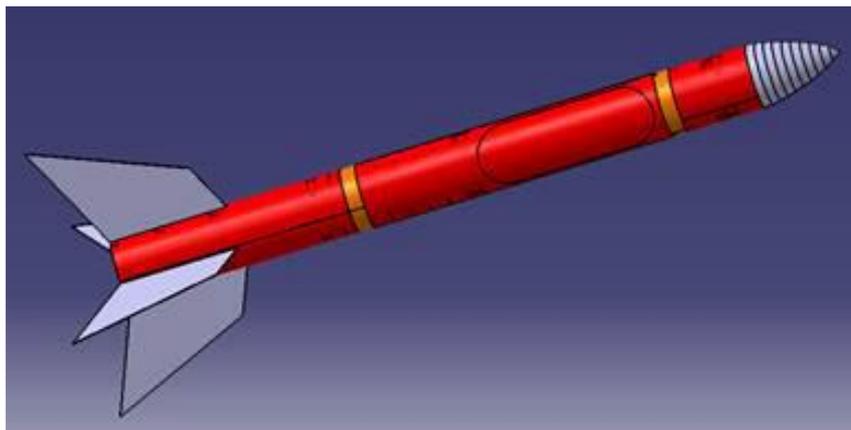


Figure 9 : Vue extérieure de la fusée du PE25 de 2015 (Source : Rapport du PE25 de la promo 2015E)

Ce positionnement du parachute posait un problème majeur. En effet, sa présence séparait les cartes électroniques, situées dans la partie inférieure de la fusée, et le servomoteur qui sert à libérer le parachute (situé au-dessus de la case parachute). Il était donc nécessaire d'installer une seconde carte alimentation dans le haut de la fusée, et cela alourdissait considérablement la fusée.

L'équipe de l'année dernière a testé en conditions réelles si l'échauffement du propulseur serait capable d'enflammer une feuille de papier située juste au-dessus de celui-ci. Le résultat s'est avéré négatif. Ainsi, il ne présente pas de risque de placer le parachute à cet endroit.

Cette année la case parachute est donc dans la partie inférieure de la fusée, en dessous des cartes électroniques, comme montré sur la *figure 6*.

III-2. La nouvelle conception de la bague mixte

Comme expliqué dans la deuxième partie, la bague mixte est le support de la carte électronique permettant l'affichage des informations à l'extérieur de la mini-fusée et le contrôle de l'alimentation.

L'année dernière, plusieurs problèmes sont apparus au niveau de cette bague :

- La carte électronique sur laquelle sont soudés à la DEL, la prise jack et à l'interrupteur n'était pas optimisée. Certains composants étaient inutiles et alourdissaient la fusée, en plus de rendre la compréhension du circuit plus difficile.
- La bague mixte s'était cassée à cause de ses parois trop fines. De plus, la conception n'avait pas tenu compte de l'épaisseur des composants électroniques sur la carte, ce qui causait du jeu et donc potentiellement des vibrations.

Ainsi, cette année il a fallu repenser la bague mixte et la carte électronique qu'elle contient. Cette conception a été réalisée grâce aux logiciels de CAO Catia et Kicad. La réalisation de la bague mixte se fait ensuite par usinage de plaques de médium. Quant à la carte, notre tuteur, M. Navarro, se charge de la fabrication. Ci-dessous, une photographie de la bague mixte et de sa carte une fois celles-ci réalisées :



Figure 10 : Photographie de la bague mixte et de sa carte électronique

III-3. Le déploiement du parachute par mesure de pression

La présence d'un tube de Pitot dans la coiffe de la mini-fusée n'est pas une innovation en soit. En effet, un projet précédent avait déjà essayé de récolter des données de mesure de la pression lors du vol. Cependant, cet enregistrement était totalement indépendant de la détection de l'apogée et de l'ouverture de la trappe du parachute. Ainsi, son but était uniquement de déduire la vitesse au cours du vol à partir des mesures de pression effectuées. Si on avait eu ces données à notre disposition, il aurait été possible de vérifier expérimentalement si cette détection est réalisable. Néanmoins, il est théoriquement possible de la faire puisque la différence entre la pression dynamique et la pression statique issues du tube de Pitot doit être minimale à l'apogée. En effet, la pression dynamique diminue quand la vitesse diminue, or l'apogée est caractérisée par une vitesse minimale pendant le vol. Ainsi, ECLYPSE est la première mini-fusée du CLC dont la réussite du vol sera conditionnée principalement par le succès de la mesure de pression et de son traitement.

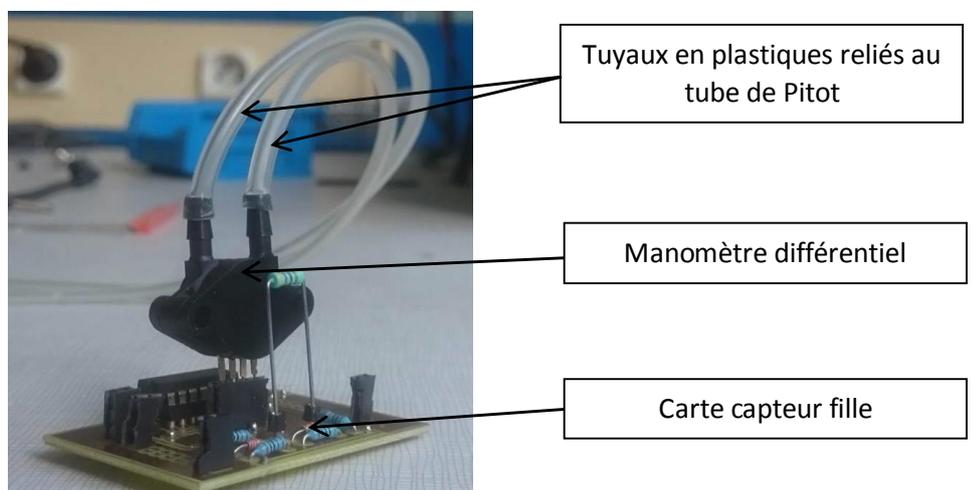


Figure 11 : Photographie du manomètre différentiel servant à la mesure de pression

4^{ème} partie : Conception technique d'ECLYPSE

IV-1. La partie mécanique

Comme cela a été présenté dans la partie deuxième partie, la structure mécanique de notre mini-fusée est composée des éléments ci-dessous :

- La coiffe
- L'enveloppe
- Les bagues supportant les cartes électroniques et notamment la bague mixte
- La case parachute
- Les bagues supportant le propulseur
- Les ailerons

Cette partie sera consacrée à détailler plus précisément chacun de ces éléments mécaniques.

IV-1.a) La coiffe

Afin de refermer la peau de manière aérodynamique, le haut de la mini-fusée est surmonté d'une coiffe. Le modèle de la coiffe reste le même que celui des années précédentes. Toutefois elle comporte des modifications permettant d'intégrer le tube de Pitot sans pour autant dégrader le coefficient de traînée.

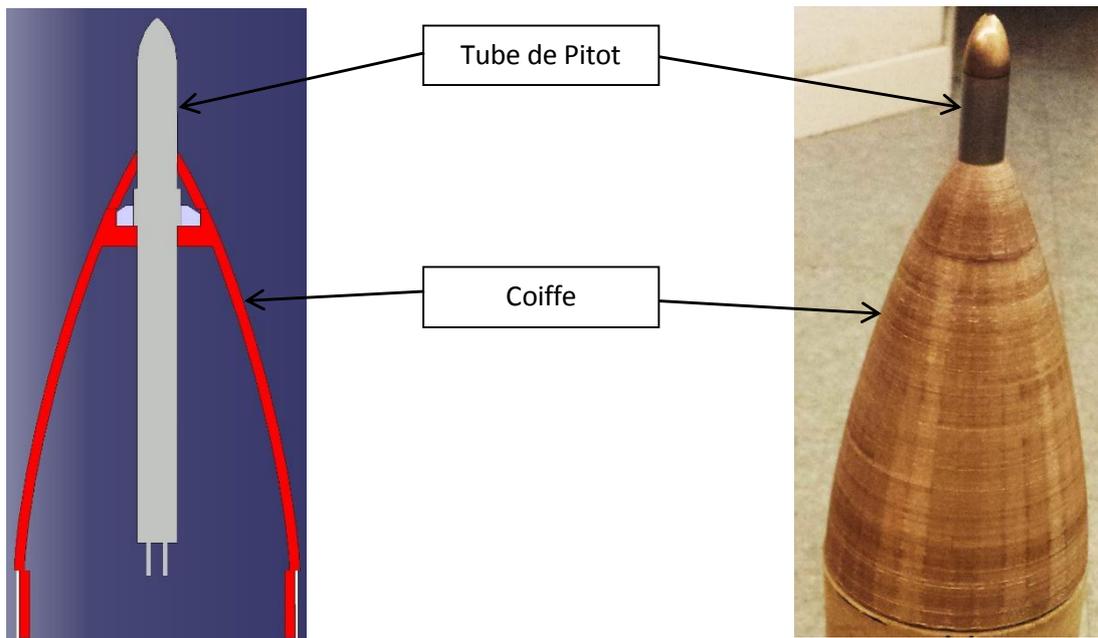


Figure 12 : Vue en coupe et photographie de la coiffe comportant le tube de Pitot

« Puisque la fusée est subsonique, il a été décidé de suivre le profil de LD-Haack qui présente justement de bonnes performances en régime subsonique. Ce profil est défini par l'équation, qui permet d'adapter la coiffe à tout rayon intérieur R de fusée et toute longueur L voulue.

$$y = \frac{R \sqrt{\theta - \frac{\sin(2\theta)}{2}}}{\sqrt{\pi}} \quad \text{où } \theta = \arccos\left(1 - \frac{2x}{L}\right)$$

Avec x et y les positions selon les axes cartésiens de la fusée »

A partir de ce modèle, un emplacement hexagonal pour accueillir le tube de Pitot a été rajouté. Il a été conçu sur Catia en s'inspirant du modèle d'une ancienne mini-fusée qui intégrait elle aussi un tube de Pitot. A ce propos, par soucis d'économie de temps et d'argent, le tube de Pitot de cette ancienne mini-fusée a été récupéré.

IV-1.b) L'enveloppe

L'enveloppe représente la plus grande surface en contact avec l'extérieure de la mini-fusée. Elle remplit deux rôles, elle protège les éléments intérieurs de la fusée, et dans le même temps elle remplit le rôle de squelette externe au sens où il s'agit d'une peau porteuse. C'est un tube de carton de 82mm de diamètre extérieur et de 1mm d'épaisseur. Comme mentionné précédemment, ce tube présente le meilleur rapport robustesse/légèreté/prix. Il a également fait ses preuves les années précédentes. Ce tube est scié précisément pour intégrer la bague mixte et la trappe du parachute. De plus, il est percé à certains endroits afin de boulonner les bagues qui doivent l'être.



Figure 13 : Photographie de la peau d'ECLYPSE à l'état brut

IV-1.c) Les bagues supportant les cartes électroniques

Les bagues sont des disques en médium, matériau robuste à faible coût. Tout d'abord elles sont conçues sous Catia puis elles sont exportées au format dxf afin d'être lues avec Galaad qui est le logiciel pilotant la fraiseuse numérique trois axes du bâtiment F7. C'est ensuite grâce à cette fraiseuse que l'on vient usiner des planches de médium de différentes épaisseurs.

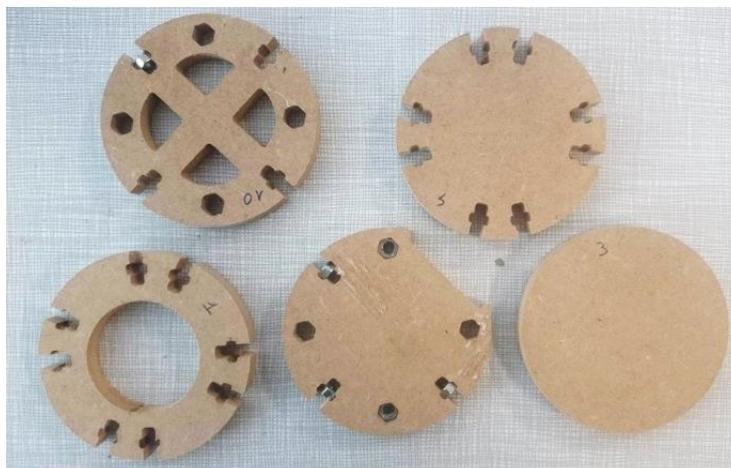


Figure 14 : Photographie de bagues de la mini-fusée avant montage

Les bagues font 80mm de diamètre extérieur, ce qui correspond exactement au diamètre intérieur de l'enveloppe. Elles sont donc montées légèrement en force à l'intérieur du fuselage. Les bagues sont optimisées pour la fixation des écrous, que ce soit ceux vissés sur les tiges filetées ou ceux vissés sur la peau de la mini-fusée.

IV-1.d) La case parachute

La case parachute est la partie de l'enveloppe chargée à la fois de contenir le parachute pendant la phase d'ascension, et de lui permettre de se déployer lors de l'ouverture de la trappe. Celle-ci est entraînée par la rotation du servomoteur qui libère alors le crochet maintenant la trappe fermée. La trappe est de fait poussée par deux ressorts situés sur la bague portant le servomoteur, puis par la résistance de l'air s'opposant au déplacement de la mini-fusée, puisqu'à l'apogée la vitesse n'est pas complètement nulle. Elle pivote alors autour de son extrémité basse jusqu'à se détacher totalement de la peau et entrainer avec elle le parachute.

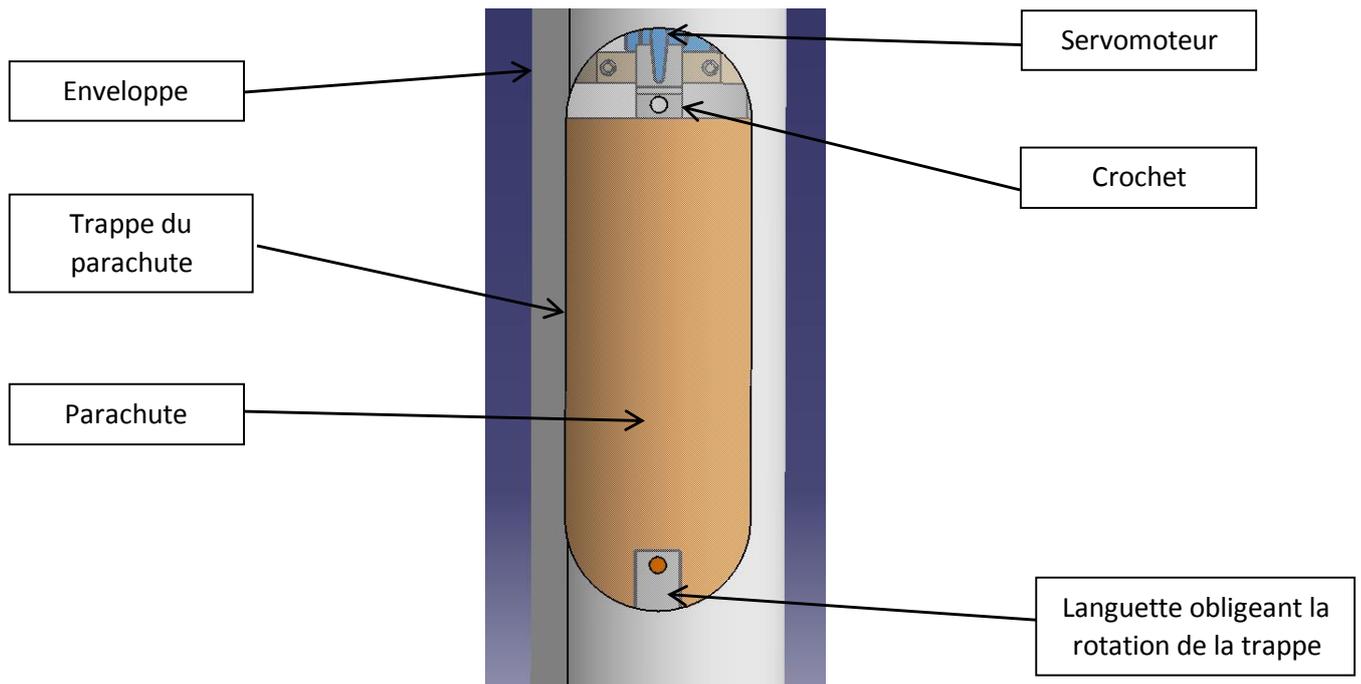


Figure 15 : Vue de la case parachute avec sa trappe transparente

IV-1.e) Les bagues supportant le propulseur

L'intégration du propulseur à l'intérieur de la mini-fusée se fait à l'aide de deux bagues de centrage et d'une bague de poussée, réalisées de la même manière que les bagues servant de support aux cartes électroniques. Celles-ci jouent également un rôle dans la fixation des ailerons sur la structure comme on peut le voir sur la *figure 16* ci-dessous.

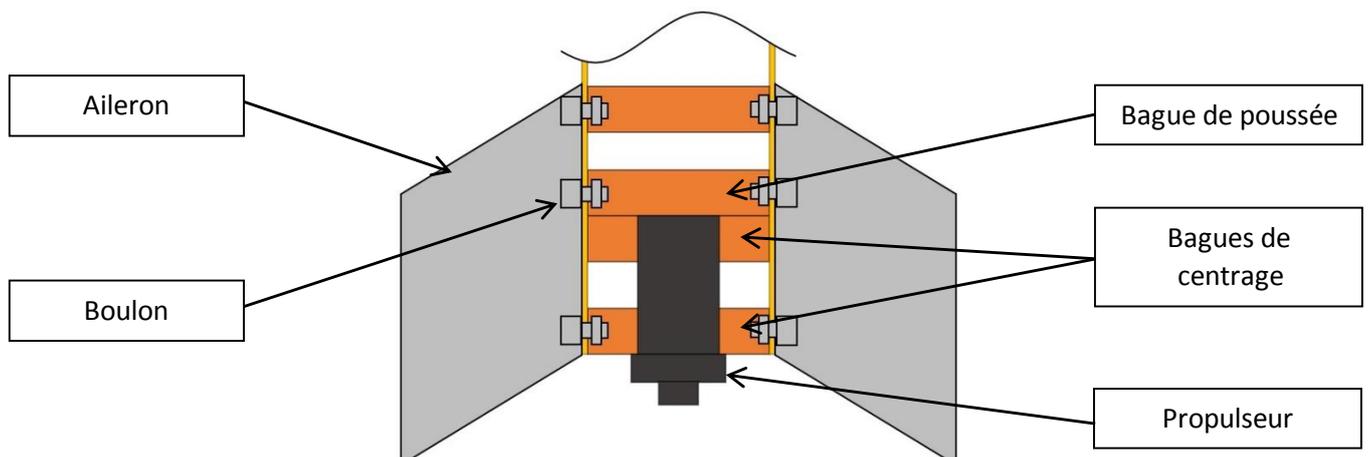


Figure 16 : Vue des bagues supportant le propulseur

Le propulseur Cariatou fourni par Planète Sciences est un propulseur à poudre, dont voici une photographie permettant de bien se rendre compte de sa taille.



Figure 17 : Photographie d'un propulseur Cariatou

IV-1.f) Les ailerons

Les ailerons sont les principaux éléments qui assurent la stabilité de la mini-fusée. Planète Sciences fournit une rampe de lancement qui a une géométrie particulière, ainsi le cahier des charges impose qu'il y ait 4 ailerons. Ils doivent répondre à trois critères : être légers, rigides pour ne pas être trop déformés lors de la phase d'accélération, et être solidement fixés à la fusée.

Ainsi, les ailerons sont en aluminium de 1mm d'épaisseur et sont fixés à l'aide d'équerres elles aussi en aluminium. Comme dit précédemment, leur géométrie est déterminée par les caractéristiques de masse et de position du centre de gravité de la mini-fusée et grâce à Stabtraj qui est une feuille de calcul Excel fournie par Planète Sciences. Ils sont réalisés à la découpeuse à guillotine, les équerres en découpant et en pliant un plat d'aluminium brut.

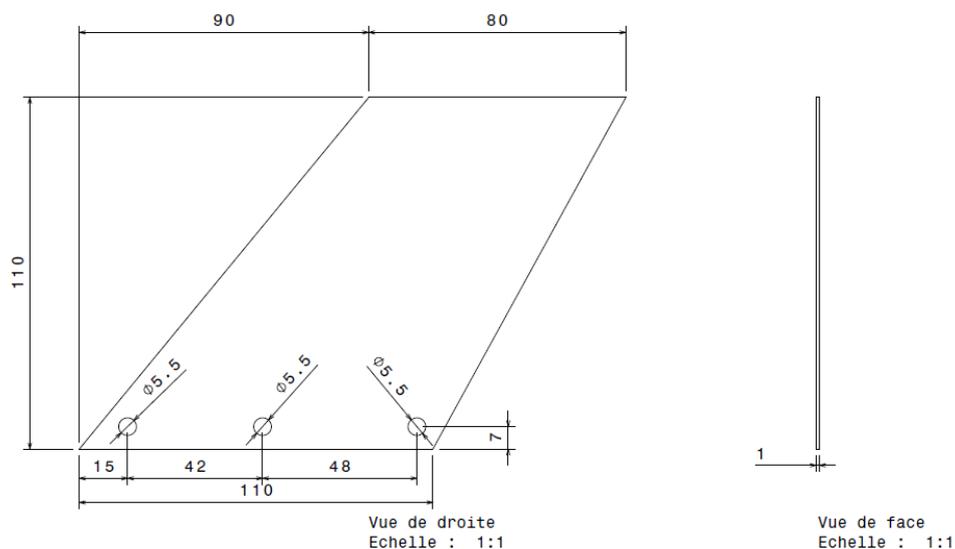


Figure 18 : Dessin de définition des ailerons

IV-2. La partie électronique

IV-2.a) Les composants électroniques

Partons de l'architecture du module électronique qui a été définie dans la deuxième partie à l'aide de la figure ci-dessous pour détailler par la suite le choix et les caractéristiques de chacun de ses composants.

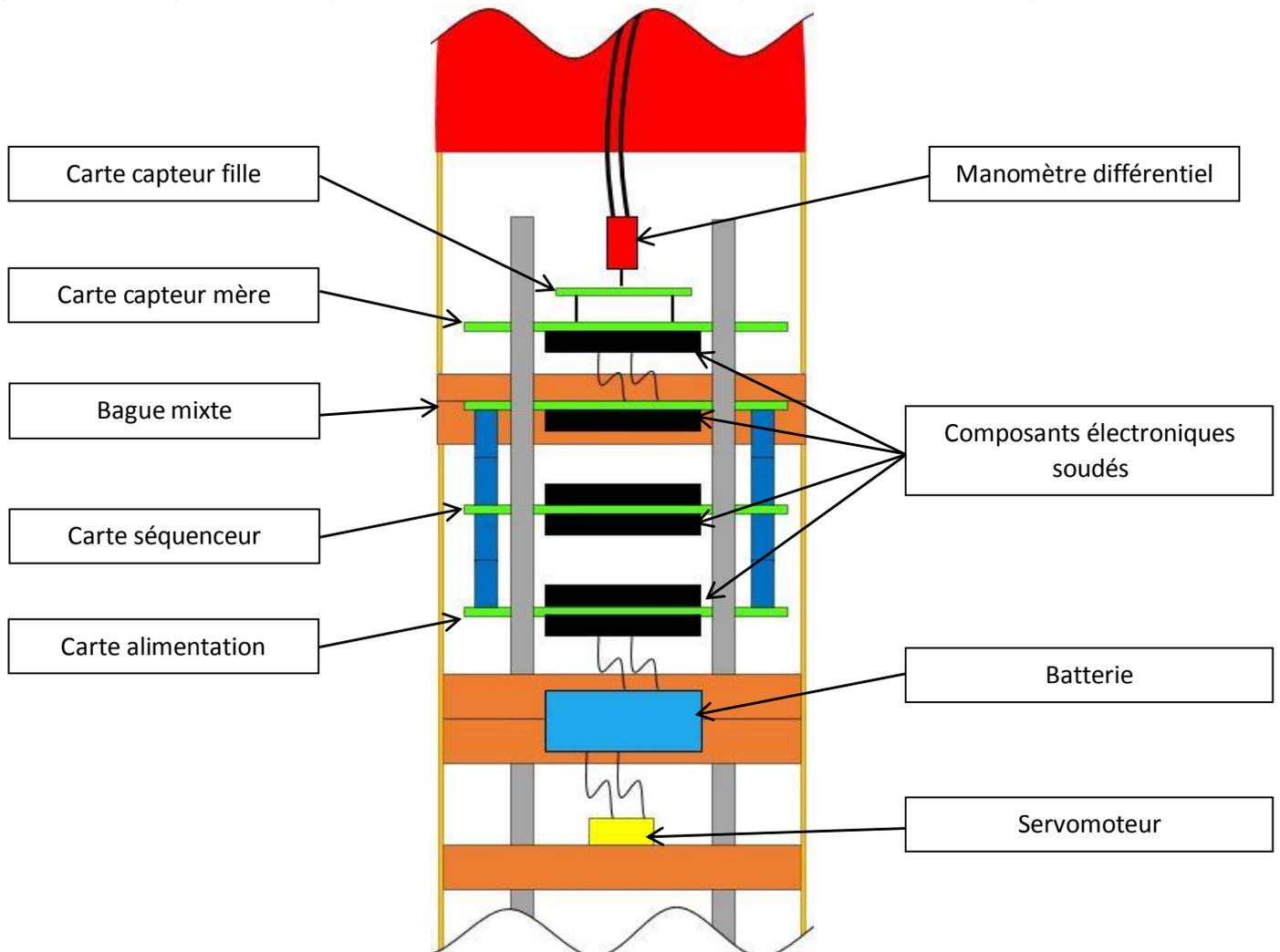


Figure 19 : Illustration de la structure électronique

La batterie

L'ensemble de l'électronique de la fusée est alimenté grâce à la batterie embarquée. Le cahier des charges que nous devons respecter en termes de masse, de puissance, de capacité et de temps de décharge est respecté par notre choix de batterie, qui est le même que les années précédentes.

Ci-dessous, le tableau comparatif du cahier des charges avec les caractéristiques de la batterie.

	Cahier des charges	Caractéristiques des batteries choisies
Masse	<50g	35g
Temps de décharge (Autonomie)	45 min	2h
Potentiel de sortie	7,4V	7,4V
Courant de sortie	0,1A	0,45A

Prix	<15€	6,91 €
Capacité	450 mAh	450 mAh

Une contrainte de dimensions est également à respecter, pour des raisons de place disponible à l'intérieur de la fusée. Mais ce point n'a pas été un problème du fait que la batterie utilisée est très peu encombrante.



Figure 20 : Photographie de la batterie utilisée

Le servomoteur

Le servomoteur est également un élément clé de la fusée, puisqu'il contrôle l'ouverture de la trappe du parachute. Comme pour la batterie, nous avons repris le même modèle que les années précédentes puisqu'il fonctionnait parfaitement et que son utilisation est la même. Voici le tableau comparatif du cahier des charges et des caractéristiques du servomoteur :

	Cahier des charges	Caractéristiques du servomoteur choisi
Masse	<50g	9,5g
Couple délivré	>1kg.cm	1,3kg.cm
Consommation	<1A	0,5A max
Commande	Faible fréquence potentiel 5V	Signal rectangle 1kHz 4,8V
Prix	<25€	21,40 €

Afin d'être sûr de ne pas avoir de problème d'encombrement ni de performance, le choix s'est donc porté sur le même servomoteur que les années précédentes : Le HITEC HS-5055MG.



Figure 21 : Photographie du servomoteur HITEC HS-5055MG

Le manomètre différentiel

La mesure de pression étant le point central de notre projet, élaborer un cahier des charges correct pour le manomètre différentiel est essentiel. Voici le tableau comparatif du cahier des charges et des caractéristiques de ce capteur de pression :

	Cahier des charges	Caractéristiques du manomètre différentiel choisi
Masse	<20g	5,05g
Plage de pression	0-100 hPa	0-2000 hPa
Tension d'alimentation	3,3V ou 5V ou 12V	10-16V
Prix	<15€	10,00 €

La tension de sortie étant amplifiée électroniquement, nous n'avons pas de contraintes dessus. Après études des différentes possibilités, c'est-à-dire l'établissement d'un modèle afin de déterminer la gamme de pressions rencontrées lors du vol, le choix s'est porté sur le manomètre différentiel MPX2200 DP.



Figure 22 : Photographie du manomètre différentiel MPX2200DP

Les connecteurs inter-cartes

Les connecteurs entre les cartes de la fusée se doivent d'être très abordables, car il y en a un certain nombre dans la mini-fusée. Ils doivent également présenter un nombre suffisant de connections différentes, pour pouvoir transmettre tous les signaux en simultané.

Les connecteurs DB9 sont des connecteurs électroniques à 9 pins qui permettent de communiquer entre les cartes. Les signaux transmis peuvent aussi bien être des signaux d'alimentation (3.3V ou 5V par exemple) ou des signaux d'informations (ceux transmis par les cartes capteurs par exemple). Ces connecteurs, très robustes, présentent aussi l'avantage de garantir l'intégrité mécanique de la fusée : Une vis est en effet intégrée de chaque côté de la connexion, permettant une cohésion renforcée de la partie électronique d'ECLYPSE. L'ensemble des connexions électroniques de la fusée est détaillé sur la *figure* de la quatrième partie

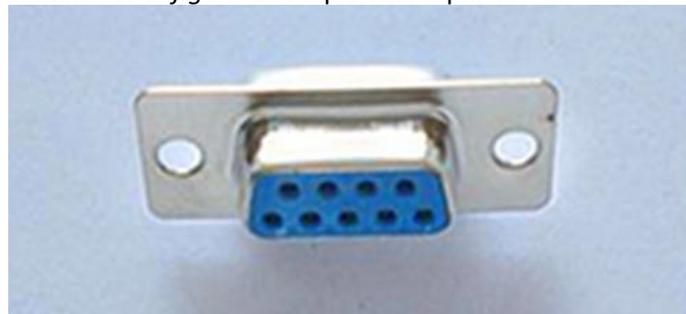


Figure 23 : Photographie du connecteur DB9

IV-2.b) Les cartes électroniques

Les cartes électroniques d'ECLYPSE sont les composants les plus chers. Dans le but de réduire les coûts de ses fusées, le CLC a conclu un partenariat de sponsoring avec l'entreprise Cirly, fabricant de circuits imprimés. Ainsi, les principales cartes électroniques (séquenceur, alimentation et capteur mère) ont été fournies par ce sponsor. Les cartes plus basiques (cartes mixte et capteur « fille ») ont été usinées à l'Ecole Centrale de Lyon, avec les machines à disposition de notre tuteur, M. Navarro.

La carte alimentation

La carte alimentation est celle au fonctionnement le plus simple. Elle fait le lien entre la batterie et les autres cartes électroniques. Elle récupère la sortie de la batterie et délivre plusieurs tensions : +3.3V, ±5V, ±12V. Ces tensions sont envoyées dans les pins des connecteurs DB9 pour être transmises aux autres cartes.



Figure 24 : Photographie de la carte alimentation

La carte séquenceur

La carte séquenceur est le cerveau d'ECLYPSE. C'est par elle que transitent et que sont analysées toutes les informations transmises par les cartes capteurs, et c'est d'elle que partent les informations d'affichage extérieur vers la carte mixte.

La carte séquenceur est également responsable de l'ouverture du parachute. Ce dernier s'ouvre dans deux cas distincts :

- Les informations transmises par la carte capteur de pression indiquent que l'apogée est atteinte.
- La mesure de pression ne fonctionne pas, ou n'est pas correctement traitée, et le chronomètre intégré à la carte séquenceur indique que le temps d'apogée déterminé par simulation numérique a été atteint depuis trop longtemps (1.5s après l'apogée).

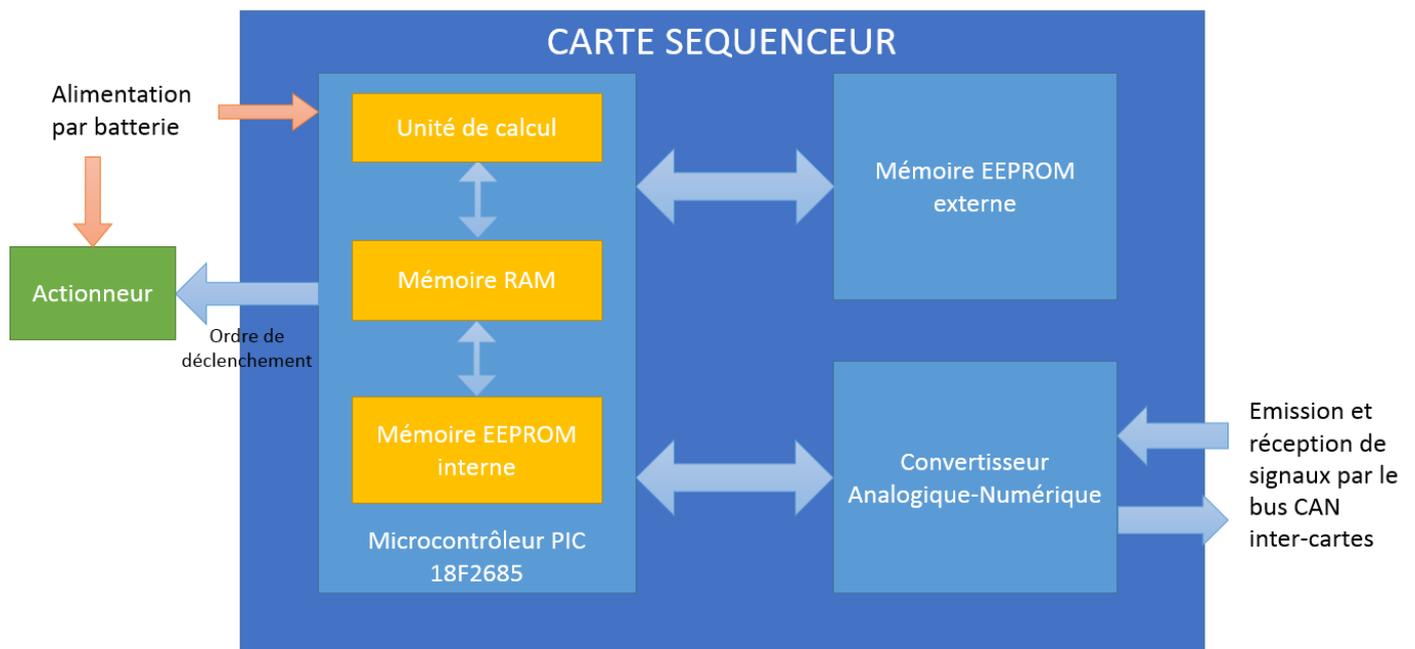


Figure 25 : Schéma explicatif du fonctionnement de la carte séquenceur

La qualité de la carte séquenceur étant déterminante pour la réussite du vol, c'est naturellement sur cette carte que va s'effectuer la majeure partie de la programmation. C'est pourquoi le pôle électronique se devait d'avoir fini le plus rapidement possible les soudures de la carte séquenceur : Afin que le pôle programmation puisse prendre le relais et rendre la carte opérationnelle.

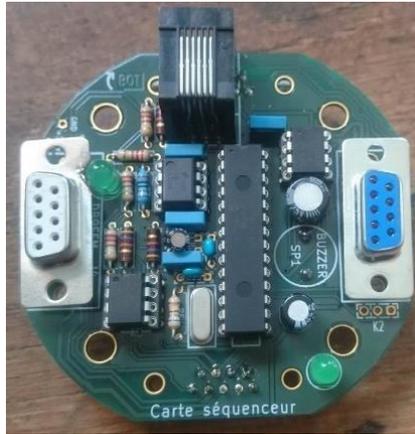


Figure 26 : Photographie de la carte séquenceur

La carte capteur « mère »

La carte capteur « mère », comme son nom le suggère, est le support électronique d'une carte capteur « fille ». Elle récupère et transmet les données que lui envoie la carte fille vers les pins des connecteurs DB9, afin que la carte séquenceur puisse les analyser et réagir en fonction.

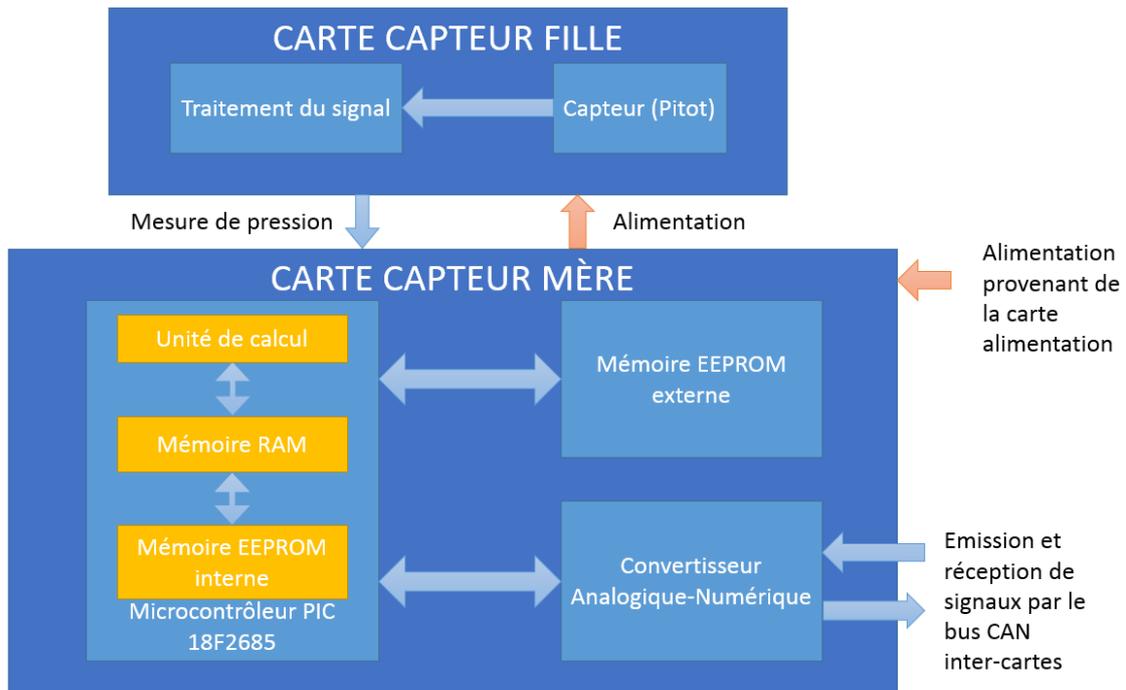


Figure 27 : Schéma explicatif du fonctionnement couplé des cartes capteurs

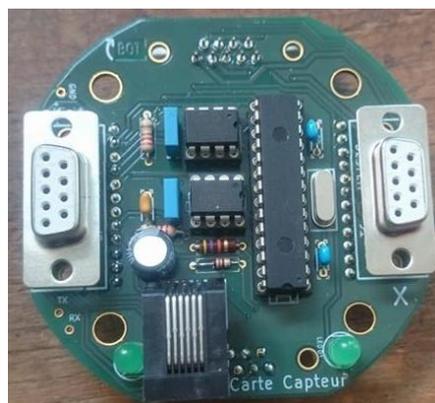


Figure 28 : Photographie de la carte capteur "mère"

La carte capteur « fille »

Comme mentionné précédemment, la carte capteur « fille » est fixée sur la carte capteur « mère ». C'est sur la fille que les capteurs et les amplificateurs vont être soudés directement.

Dans notre cas, par exemple, la carte capteur fille contient trois éléments principaux, le manomètre différentiel servant à capter la pression et deux amplificateurs AOP, afin que le signal électrique en sortie de la carte soit exploitable.

Pour que notre signal soit exploitable et intelligible par la carte capteur « mère », il fallait qu'il soit inférieur à 3.3V (tension de fonctionnement de la carte capteur « mère »). Il fallait également qu'il soit le plus fort possible, pour avoir les plus grandes différences de potentiel possible. Ainsi, il était nécessaire de calibrer la carte, en adaptant les résistances des amplificateurs.

Pour ce faire, des tests ont été effectués à l'aide des bancs de travaux pratiques de jet d'air, étudié durant l'Unité d'Enseignement Fluides et Energies.

La carte mixte

La carte mixte, comme la carte capteur « fille » a été entièrement conçue et usinée à l'école. Elle sert à afficher les informations concernant l'état de la fusée à l'extérieur de sa peau en carton. Elle a une structure électronique très simple, puisqu'elle ne traite aucune information. Elle reçoit simplement le signal de la carte séquenceur, et cela allume la LED.

Elle contient également un interrupteur qui permet d'ouvrir l'alimentation de la carte séquenceur.

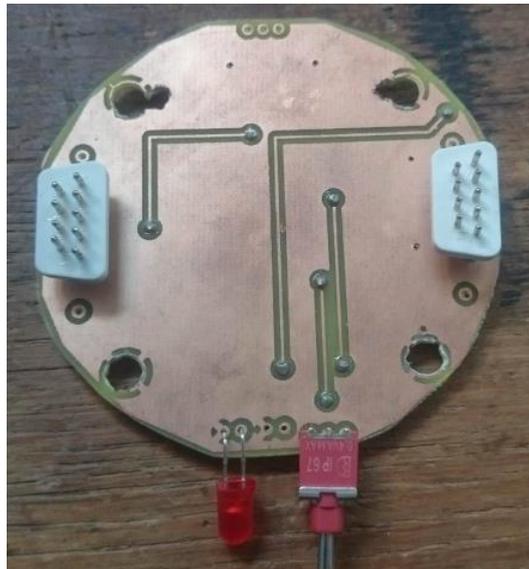


Figure 29 : Photographie de la carte mixte

IV-2.c) Connexions et liens entre les cartes électroniques

De nombreuses connexions sont présentes dans la fusée, elles assurent la bonne communication à la fois des informations et de l'alimentation électrique à l'intérieur d'ECLYPSE. Le schéma ci-dessous clarifie la structure des connexions filaires dans la mini-fusée.

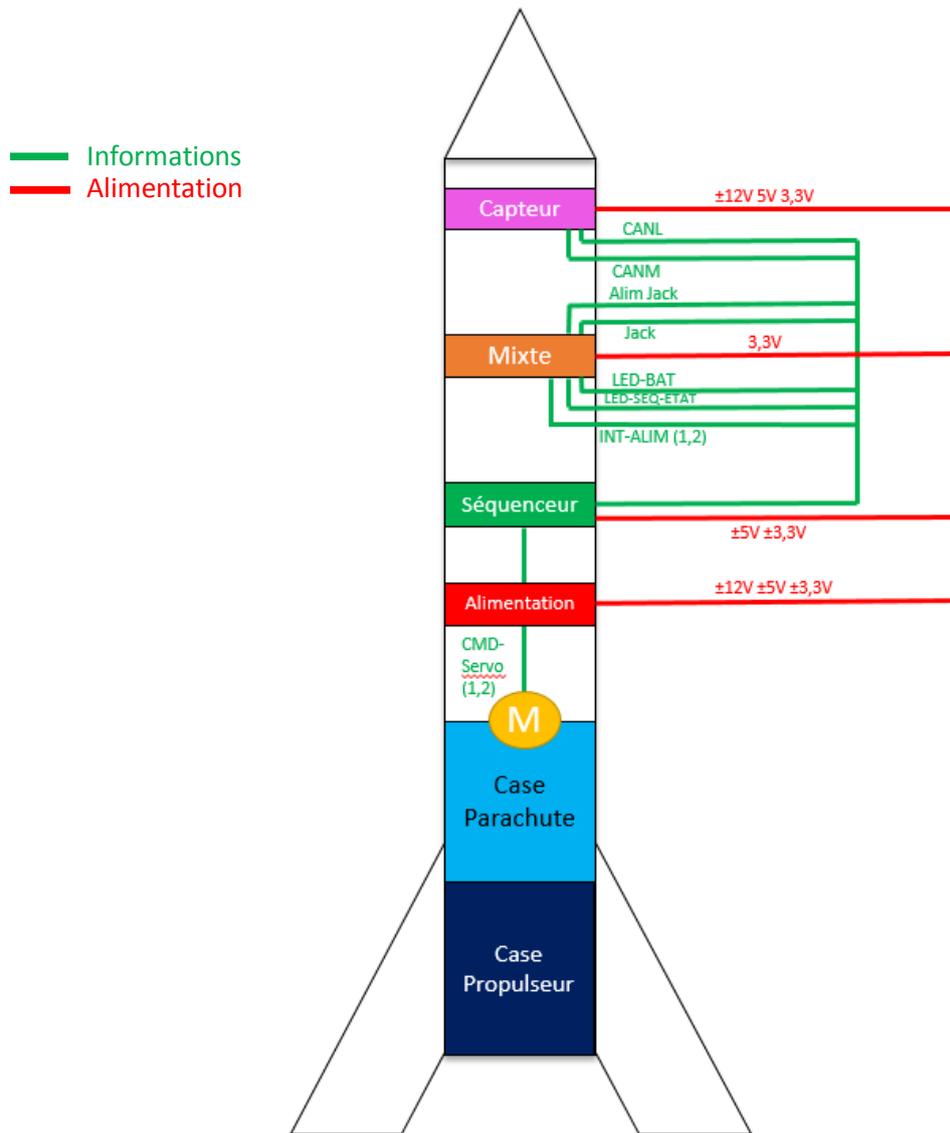


Figure 30 : Schéma explicatif des connexions entre les cartes électroniques

IV-3. La partie informatique

IV-3.a) Présentation générale

Nécessité de la programmation :

Une fois la fusée posée sur la rampe de lancement et allumée (interrupteur sur position « ON »), celle-ci évolue en parfaite autonomie. Elle doit donc d'elle-même communiquer son état, gérer les données provenant de la sonde Pitot et déclencher l'ouverture de la case parachute au bon moment et enfin enregistrer toutes les données du vol pour une analyse post-lancement. C'est ici qu'intervient le pôle programmation. Il est en effet nécessaire d'implémenter des algorithmes dans toutes les cartes à programmer afin d'automatiser toutes ces actions. Pour ce faire, nous utiliserons des microcontrôleurs PIC18. Ceux-ci sont léger et d'une puissance de calcul adaptée aux tâches requises.



Figure 31 : Photographie du microcontrôleur PIC 18F2685

L'implémentation des programmes se fait en C (langage de programmation), que le pôle programmation a dû apprendre à utiliser. Dans cette optique, il s'est exercé sur des programmes simples, visant à faire clignoter une LED, ou faire sonner un buzzer et ainsi appréhender les fonctions de base de ce langage. Les fonctions sont codées sur ordinateur puis implémentées sur les PICs par connectique USB et interface ICD-U64 branché aux cartes à l'aide d'un câble RJ12.



Figure 32 : Photographie du branchement des cartes à l'ordinateur

Sur l'ordinateur, nous utilisons le logiciel de programmation PIC C Compiler, spécialement dédié à ce type de microcontrôleurs.

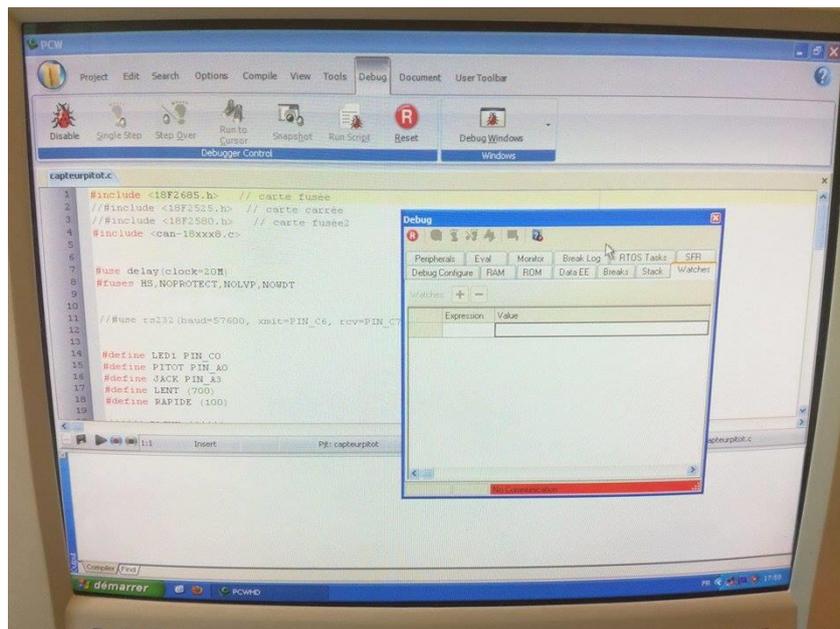


Figure 33 : Photographie de l'Interface PIC C Compiler

Démarche adoptée :

Après réception de chaque carte en provenance du pôle électronique, le rôle du pôle programmation a été de tester le bon fonctionnement de ladite carte à l'aide de programmes simples (clignotement de LEDs, tintements de buzzers, écritures de données sur la mémoire...). Une fois la carte testée, l'écriture des codes peut commencer. Etant donné les nombreux problèmes de bugs rencontrés par les pôles programmation des années précédentes ainsi que le fait que l'équipe soit débutante en programmation C, il a été décidé d'adopter « une démarche du plus simple au plus complexe ». Cela signifie qu'un compromis a été réalisé entre parallélisation des tâches pour favoriser l'avancement, et progressivité dans la complexité des tâches exécutées.

L'équipe a donc en premier lieu réalisé la programmation de la carte séquenceur, brique de base d'ECLYPSE. En effet, celle-ci est nécessaire et suffisante pour l'ouverture de la case parachute et la réalisation d'un vol nominal. Elle dispose d'un compteur qui peut déclencher l'ouverture, qu'on aurait au préalable réglé en accord avec le temps à l'apogée attendu, calculé à l'aide de nos simulations de vol. En second lieu, l'équipe a programmé la carte capteur, nécessaire à la détection d'apogée (objectif principal du PE). Elle permet normalement d'avoir une détection d'apogée plus précise si elle est bien menée. En effet, les simulations souffrent de fortes incertitudes liées à la variabilité de la météo, de la masse finale de la fusée mais surtout des propulseurs Cariatou fournis par Planète Sciences dont la propulsion est malheureusement très variable. Une détection par capteur est donc plus fiable qu'une prévision par simulation. Enfin, l'équipe s'est penchée sur la problématique du stockage des données de vol. Celle-ci est non-nécessaire au vol de la fusée, mais permet, après dépouillement des données, de discuter de la fiabilité des mesures de pressions pour la détection d'apogée.

Problèmes rencontrés :

L'équipe a été confrontée à de nombreux problèmes de bugs et de mauvaise connectique. Il n'est en effet pas évident de déterminer la cause d'un bug. Celui-ci peut provenir d'une connexion caduque. Il faut alors tester les tensions et résistances aux bornes de chaque composant et vérifier leur adéquation avec le schéma de la carte. Cela est très couteux en temps et se révèle parfois compliqué lorsque l'on ne connaît pas encore bien la carte.



Figure 34 : Photographie d'un message d'erreur du logiciel

Par ailleurs, le problème peut provenir d'un bug logiciel sur l'ordinateur ou interne au microcontrôleur PIC. Un simple « débrancher, rebrancher » est parfois suffisant. Sinon, il faut déterminer ce qui entrave le bon fonctionnement du PIC ou du logiciel.

Afin de pallier ces difficultés, l'équipe a eu largement recours à l'aide de Monsieur Navarro qui connaît très bien l'interface. Le pôle programmation a ainsi décidé de réaliser un fichier texte compilant toutes les astuces et pièges de l'interface. Ce fichier sera d'une grande aide aux futurs projets. Il décrit, pour chaque erreur s'affichant à l'écran, la procédure à adopter afin de régler le problème.

IV-3.b) Cartes programmables

Les cartes programmables sont au nombre de deux : la carte séquenceur, et la carte capteur « mère ». La première est le cerveau de la fusée, c'est elle qui contrôle le servomoteur qui ouvre la trappe parachute. La seconde est chargée de récupérer et de traiter les informations provenant du manomètre différentiel.

Carte Séquenceur

La carte séquenceur a pour but de gérer l'horloge interne de la fusée durant sa phase de vol. En effet le cahier des charges stipule que pour des raisons de sécurité le parachute ne peut être déployé durant les 2 premières secondes du vol car le propulseur sera toujours allumé.

Pour gérer cette horloge, la carte séquenceur a besoin de connaître l'instant où la fusée décolle afin de « compter » 2 secondes avant de pouvoir autoriser le déploiement du parachute. Cette détection de décollage se fait grâce à un Rapport PE n°32

câble Jack relié entre le pas de tir et la carte mixte, lors du décollage, la prise jack est arrachée de son port ce qui génère un changement de tension qui indique à la carte qu'il faut lancer l'horloge interne.

De plus, dans l'éventualité où le système de détection d'apogée ne fonctionnerait pas, la carte séquenceur est chargée de déclencher le parachute. Pour estimer cette durée critique à partir de laquelle on considère que le système de détection d'apogée n'a pas fonctionné on se réfère à la simulation du vol, ce qui nous donne un temps de critique de 7 secondes (1.5 s après le temps d'apogée déterminé grâce au StabTraj – voir partie V).

Entre 2 secondes et 7 secondes après le lancement, la carte séquenceur est en attente d'un signal provenant le carte capteur, qui indiquerait la détection de l'apogée. Si ce signal est reçu, la carte déclenchera le parachute.

Enfin, cette carte gère l'affichage extérieur de la fusée. Pour cela elle gère la vitesse de clignotement de la LED soudée sur la carte mixte, chaque vitesse étant représentative d'un état différent de la fusée (en attente de décollage, en vol...). En plus de la LED, la carte gère aussi un buzzer qu'elle allume au décollage et qui sera utile pour retrouver la fusée une fois son retour au sol effectué.

Un schéma de l'architecture du programme est disponible sur la figure suivante.

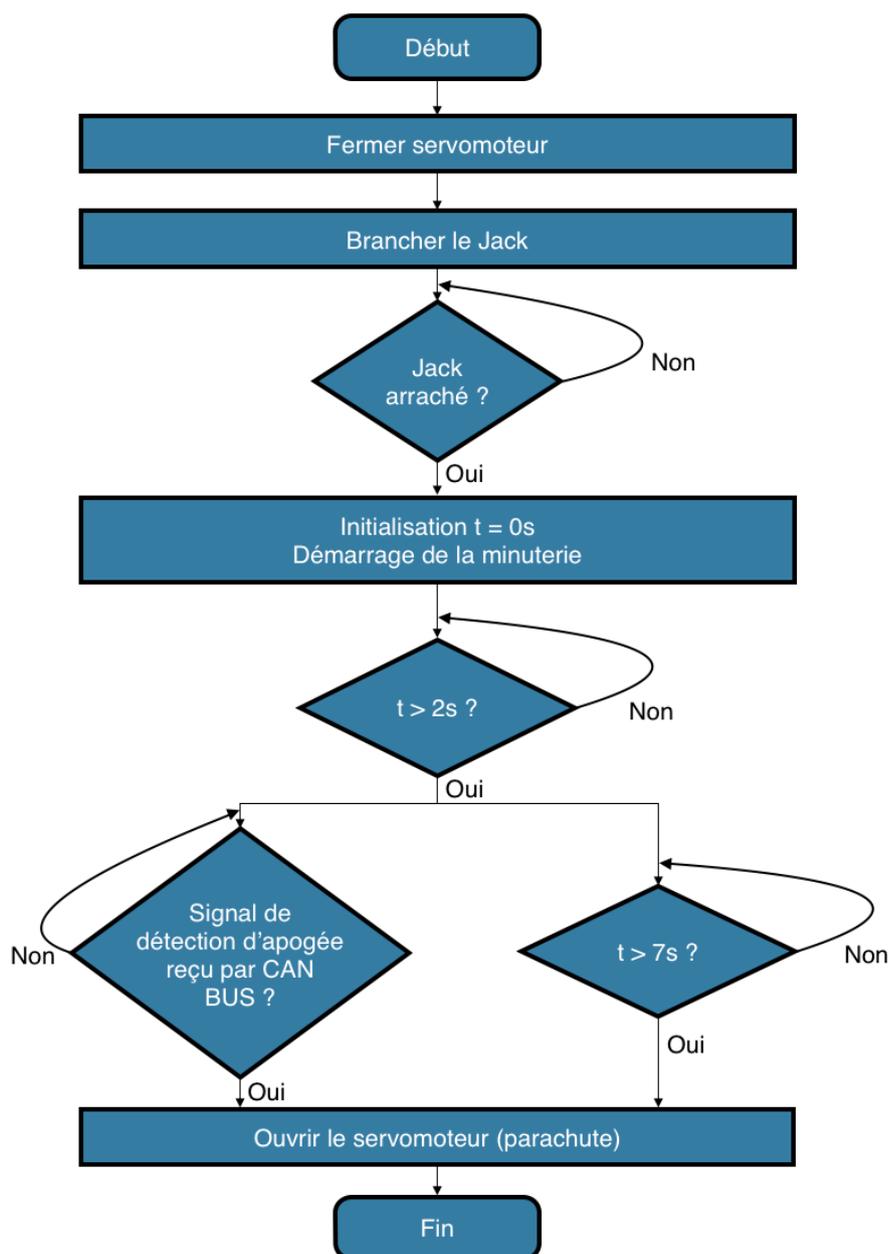


Figure 35 : Schéma de l'architecture du programme de la carte séquenceur

Ensemble Capteur

L'ensemble capteur est constitué de 2 cartes : la carte capteur mère (appelée carte capteur) et la carte capteur fille (appelée carte fille). Leurs photos sont disponibles ci-dessus dans la partie IV-2.b).

La carte fille ne possède pas d'intelligence embarquée, elle n'est donc pas programmable. Son rôle est d'amplifier le signal en sortie du capteur afin qu'il soit compris entre 0 et 3,3V qui est la plage de lecture de la carte capteur qui est chargée de traiter le signal.

La carte capteur reçoit donc de la carte fille un signal analogique compris entre 0 et 3,3V. Ce signal représente physiquement une différence de pression, le rôle de la carte capteur est de transformer ce signal en une représentation de la vitesse, puis déterminer quand cette vitesse passe par un minimum et ainsi avertir la carte séquenceur qu'il faut déclencher le parachute. Pour détecter ce minimum, le programme réalise en continu des moyennes de la vitesse de la fusée sur 255 échantillons (ce qui représente 0,1 seconde) et compare cette vitesse à celle de l'échantillon précédent. Lorsque l'apogée vient juste d'être dépassée, la fusée commence à accélérer vers le sol et sa vitesse se met à augmenter, à ce moment la vitesse moyenne de l'échantillon sera donc plus importante que celle de l'échantillon précédent ce qui fera envoyer la carte capteur un signal à la carte séquenceur qui déclenchera le parachute. Ainsi on estime que le parachute sera déclenché entre 0,2s et 0,5s après que la fusée ait atteint son apogée, sa vitesse sera alors encore assez faible pour que le parachute ne soit pas arraché.

De plus la carte capteur est programmée pour stocker les données de vitesse durant le vol afin que ces données puissent être analysées une fois la fusée retournée au sol. Cependant il a fallu réfléchir à la façon dont les données vont être enregistrées dans la mémoire. En effet, l'écriture dans la mémoire prend un certain temps, qui devient du temps perdu pour traiter les données et détecter l'apogée. Ainsi, pour que la détection de l'apogée soit la plus précise possible il a été décidé de garder les données de vitesse dans la mémoire vive du microcontrôleur PIC jusqu'à ce que le parachute soit déclenché et de profiter du temps de descente de la fusée pour transférer les données de vitesse dans la mémoire. De plus, il est inutile de continuer à collecter des données lors de la descente car la sonde Pitot ne sera plus dans l'axe de l'écoulement d'air comme c'est le cas durant la montée.

Un schéma de l'architecture du programme est représenté sur la figure suivante :

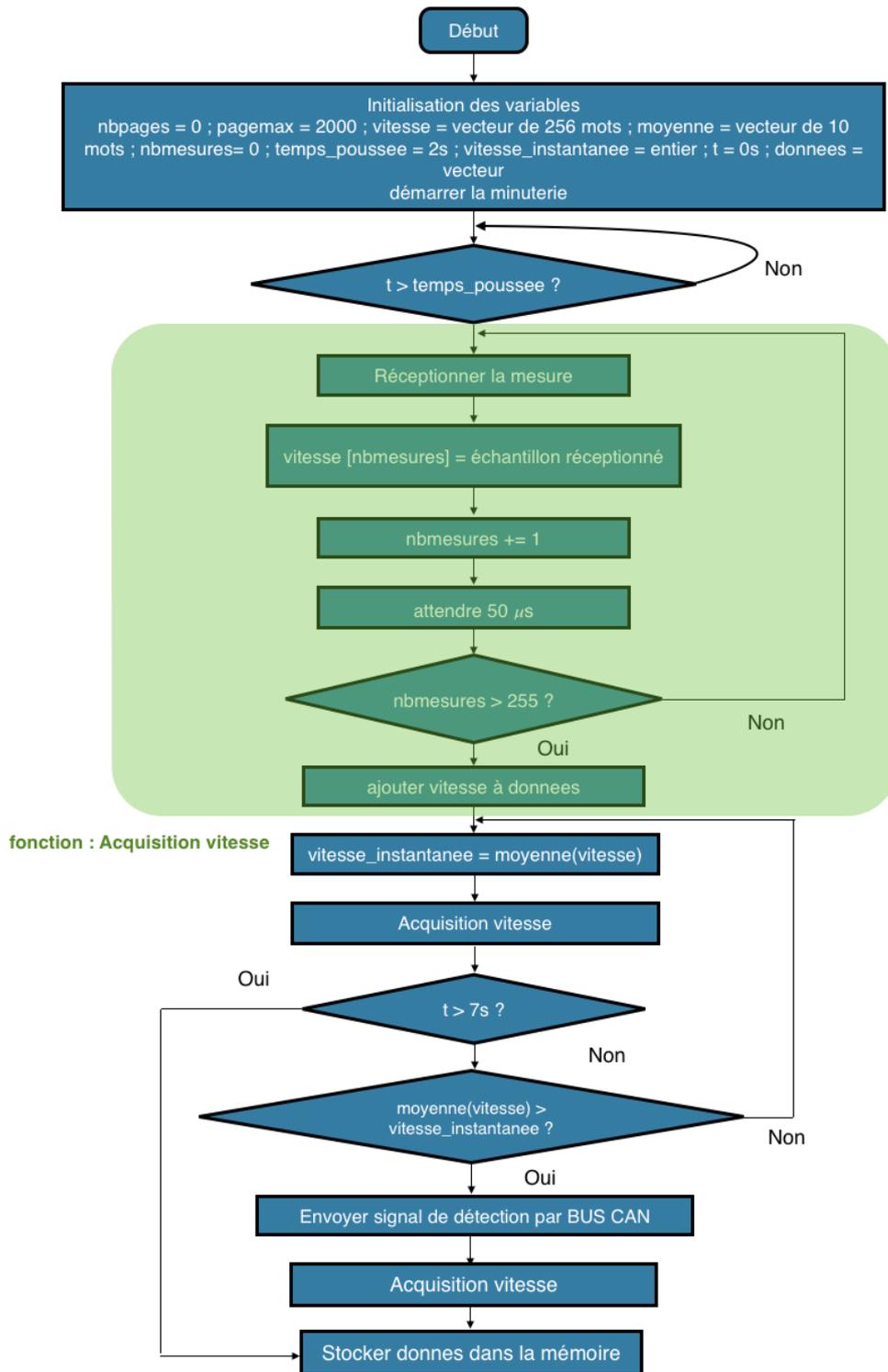


Figure 36 : Schéma du fonctionnement du programme de l'ensemble capteur

5^{ème} Partie : Résultats obtenus à la date du 9 Juin 2017

Ce rapport étant dû pour une date de 5 semaines antérieure à celle du lancement prévu de la fusée, il n'est possible de faire qu'un état des lieux partiel des résultats obtenus.

V-1. L'avancement actuel d'ECLYPSE

V-1.a) Vue globale de l'avancement

Comme on peut le constater sur les figures ci-dessous, le montage de la fusée a été réalisé avec la quasi-totalité de sa structure mécanique. Il comporte également le module des cartes électroniques testées et programmées. L'avancement actuel est évalué par Planète Sciences à environ 85% de la totalité de la mini-fusée. Celle-ci sera donc achevée dans les semaines à venir.



Figure 37 : Photographie d'ECLYPSE une fois le montage terminé

V-1.b) Eléments manquants

De fait, lors des cinq semaines qui nous séparent de la campagne de lancement, il reste encore quelques tâches à réaliser. Pour le pôle mécanique il s'agit d'intégrer le parachute et sa trappe à l'intérieur de la peau. Il faudra également adapter la mini-fusée actuelle aux modifications issues de la dernière RCE. Et enfin s'occuper de l'habillage de la fusée qui consiste à la peindre aux couleurs de l'Ecole Centrale de Lyon et à placer les autocollants des différents partenaires. Quant au pôle informatique il règle les derniers ajustements et va supporter le pôle électronique pour s'assurer du bon fonctionnement de toute la chaîne d'acquisition et de traitement des mesures de pression. En effet, des simulations de vol permettant de vérifier que la mini-fusée se comportera comme prévu lors du lancement seront réalisées prochainement.

Par ailleurs, il sera très utile de finir de commenter les codes informatiques et de rédiger le fichier texte « conseils et astuces » qui concerne la résolution des bugs informatiques lors de la programmation.

Finalement, les semaines à venir vont être consacrées à l'aboutissement du projet, c'est-à-dire à la finalisation de la fusée, à la préparation à la semaine de lancement, à l'analyse des résultats, à la préparation de la présentation orale et à la pérennisation des connaissances acquises cette année.

V-2. Les informations relatives au vol

Un des outils qui est fourni par Planète Sciences pour notre projet est un simulateur de vol sur Microsoft Office Excel nommé Trajecto.

Pour réaliser une simulation de la trajectoire du vol, il suffit de rentrer les éléments suivants :

- Masse
- Coordonnées du centre de masse
- Dimensions des ailerons
- Dimensions de la fusée (longueur, diamètre)
- Dimensions du parachute

Le programme nous indique alors les éléments suivants :

- Une trajectoire graphique, présentée ci-dessous :

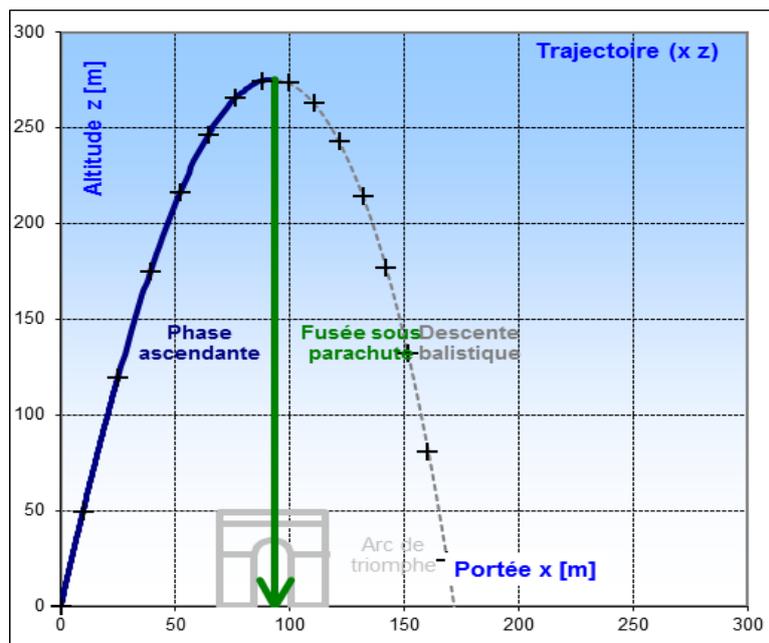


Figure 38 : Trajectoire théorique d'ECLYPSE d'après le logiciel de simulation Trajecto

- La vitesse en sortie de rampe de la fusée
- Le temps entre le début du lancement et l'apogée de la trajectoire (utile pour la programmation du timer de la carte séquenceur)
- Les caractéristiques principales lors du vol (vitesses, durées...)
- Les efforts à l'ouverture du parachute



TRAJECTO

Trajectographie de fusée

Remplir les cases jaunes

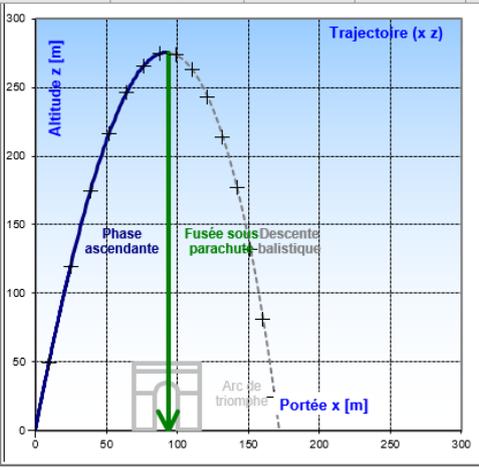
Nom	Fusée
Club	ECLYPSE
Masse totale	1,57 kg
Propulseur	Cariacou

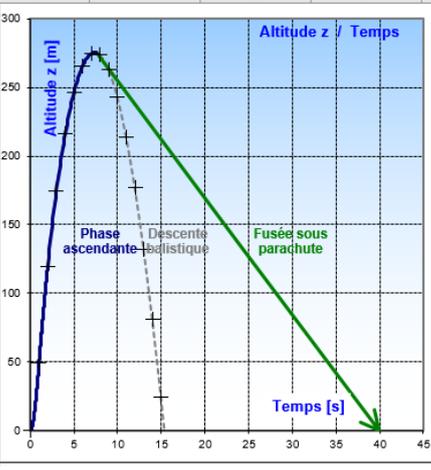
Trainée Aérodynamique	
Surface Réf.	0,005721 m ²
Cx	0,6

Rampe de Lancement	
Longueur	2,5 m
Élévation	80 °
Altitude	0 m

Descente Sous Parachute	
Fusée	0 satellite

Masse	1,5 kg
Dépotage	N/A
Ouverture para	7,5 s
Surface para	0,33 m ²
Cx parachute	1
Vitesse du vent	5 m/s
Vitesse descente	8,5 m/s
Durée descente	32 s
Durée du vol	40 s
Déport latéral	± 162 m





07/06/2017	Temps	Altitude z	Portée x	Vitesse	Accélération	Efforts
Sortie de Rampe				24,3 m/s		
Vit max & Acc max				82 m/s	171 m/s ²	
Culmination, Apogée	7,4 s	275 m	92 m	11 m/s		
Ouverture parachute fusée	7,5 s	275 m	94 m	11 m/s		26,6 N
Impact balistique	15,4 s		172 m	61,9 m/s		2872 J

Pour localiser la fusée	
Couleur fuselage/coiffe	Brun/Orange...
Couleur parachute fusée	Rouge...

Commentaire libre :

propu OK
v3.3

Figure 39 : Allure du logiciel Trajecto après simulation

6^{ème} Partie : Perspectives et avenir du projet

VI-1. Bilan et innovations du projet

Au final, bien que notre PE s'inscrive dans une lignée de projets de mini-fusées et reprenne donc une structure générale comparable, elle a aussi été le résultat d'innovations pertinentes et d'optimisation. Ce sont ces dernières qui constituent la valeur ajoutée apportée par notre travail. D'autant plus que ses spécificités sont tout de même importantes, en particulier la mesure de pression qui permettra de détecter l'apogée et de déclencher l'ouverture du parachute. Mais il y a également la nouvelle bague mixte, repensée de façon à être plus aérodynamique et plus solide, et la position de parachute. Nous sommes assez satisfaits de la conception que nous avons faite de ces éléments nouveaux. Bien entendu nous espérons qu'ils démontreront leurs fiabilités et leurs performances lors du lancement de notre mini-fusée.

VI-2. Améliorations et perspectives possibles

Des améliorations nous ont été suggérées lors de la RCE 3, par exemple concernant la prise jack. En effet, idéalement la prise jack doit former un angle entre 5 et 30° avec l'axe de la fusée. Toutes ces modifications ont d'ores et déjà été prises en compte dans la conception des pièces, et nous allons les réaliser à nouveau prochainement. Un des axes d'amélioration qu'il serait intéressant d'étudier pour les mini-fusées est une transition vers des matériaux plus légers mais aussi un peu plus chers afin de gagner en performances étant donné que la structure actuelle est globalement bien maîtrisée. Toutefois, en s'orientant vers de nouvelles solutions, cela augmenterait sans doute le risque de faire des vols balistiques. Par conséquent cette stratégie ne semble pas être envisagée par le CLC pour le moment.

VI-3. Transmission de connaissance

Il est très important de transmettre nos connaissances vers les projets similaires futurs. « Effectivement, le CLC possède une certaine expérience, une hérédité, qui accroit au fil des années et dont il faut profiter. C'est un avantage indéniable, qu'il est important d'utiliser pour progresser et toujours aller de l'avant. Les projets sur les mini-fusées sont conséquents, il n'est pas possible de repartir chaque année de zéro, d'autant plus que ceci aurait peu d'intérêt. Les équipes du CLC profitent de ce qui a été fait précédemment pour apporter leur innovation, leur valeur ajoutée. »

Pour faire profiter les prochains de l'expérience accumulée, Ce rapport sera présent sur le site du CLC:

<http://centrale-lyon-cosmos.eclair.ec-lyon.fr/>

Par ailleurs nous allons transmettre aux prochaines équipes travaillant sur des PE mini-fusées des documents afin de les aider dans leur projet à partir des expériences que nous avons pu avoir. De plus existe également une page Facebook et une mailing List pour favoriser l'échange entre tous les membres du CLC.

Conclusion

A la date de la finalisation de ce rapport, le projet arrive peu à peu à son terme. Mise à part la communication sans fil courte portée que nous avons dû mettre de côté, les principaux objectifs fixés en début de projet seront très bientôt concrétisés. Pour preuve, l'avancement de notre mini-fusée a été évalué à 85% lors de la dernière rencontre avec Planète Sciences le 3 juillet 2017 et les modifications qui en sont issues ont déjà été réalisées. Rappelons que la spécificité de la mini-fusée ECLYPSE est la détection de l'apogée grâce à une mesure de pression, permettant ainsi de déclencher l'ouverture de la trappe de parachute. Par conséquent la réussite du vol repose en grande partie sur la mesure de pression.

Le projet a rencontré de nombreuses difficultés diverses et variées durant cette année. On peut notamment citer des problèmes de logiciels, des complications lors du montage de la mini-fusée, ou encore des cartes électroniques défectueuses. Ce dernier point est celui qui nous a le plus pénalisé à cause des nombreuses heures que nous avons passées à essayer de réparer la carte capteur fille. Mais finalement, grâce au travail conjoint de l'intégralité de l'équipe, le problème est en passe d'être résolu.

Les connaissances techniques issues des précédents projets du CLC et de notre tuteur ont été d'une grande aide tout au long du projet. Elles ont notamment permis à l'équipe de gagner du temps en début d'année quand il s'agissait de s'approprier le projet et de débiter les premières tâches de conception.

Ce projet d'études s'est révélé bénéfique à tous les membres de l'équipe. En effet, chacun a gagné en autonomie d'un point de vue technique en développant ses compétences, mais également en ce qui concerne la gestion de projet et les échanges avec les autres qui sont indispensables lorsqu'on travaille en mode projet. De plus, ce PE nous a permis de découvrir puis de nous familiariser avec une multitude d'outils et de logiciels. Il a également développé nos capacités d'appréhension d'un système complexe pluridisciplinaire dans sa globalité. En ce sens, ce modeste aperçu du travail que peut être amené à faire un ingénieur généraliste Centralien est d'un grand intérêt.

Néanmoins, le projet ECLYPSE n'est pas encore terminé. En effet, l'objectif final est le lancement et la récupération de la mini-fusée. Nous allons donc finir sa réalisation de afin qu'elle soit lancée dans des conditions optimales pour que le vol soit une réussite. Pour finir, il restera à analyser les résultats obtenus et chose essentielle, à pérenniser les informations et les connaissances que l'équipe a acquis durant cette année.

Bibliographie

Compte rendu final de PE – Fuseyyyy – Ecole Centrale Lyon – PE 19 – Borgobello, Trizac, Quaegebeur, Garrait, Seilly

CNES – Planète Science. Cahier des charges pour mini-fusée CARIACOU. 2005.

Dossier de définition de la carte standard CLC Séquenceur. CLCL-TEC-049-009. S.I. : CLC, 21 06 2013

Planète Sciences. StabTraj v3.2 Stabilité de la fusée à ailerons

Glénat, Lucas. Dossier de définition de la carte standard CLC Capteur. CLC-TEC-049-008. s.l. : CLC, 15 06 2013

Annexe

Annexe 1 : étalonnage du capteur de pression

Pour rappel, le manomètre différentiel produit une tension proportionnelle à la différence de pression entre ses deux entrées. Cette tension est très faible (de l'ordre de quelques mV), il est donc nécessaire de l'amplifier. Le convertisseur analogique-numérique du microcontrôleur PIC présent sur la carte capteur mère ne peut lire les valeurs de tension qu'entre 0 et 3.3V qu'il convertit en un nombre binaire codé sur 8 bit soit 255 valeurs possibles. Afin que la précision des mesures soit maximale, on souhaite que la carte fille renvoie une tension de 3.3V lorsque la vitesse maximale est atteinte. En effet, si elle renvoie moins, on n'utilise pas toute la plage disponible et on perd donc de l'information et si elle renvoie plus, alors à partir d'une certaine vitesse, la carte renvoie toujours 3.3V et l'on perd aussi de l'information.

Afin d'amplifier le signal en sortie du manomètre, on utilise de montages amplificateurs à base d'AO. On cherche alors les résistances adéquates afin d'obtenir le gain de l'amplificateur respectant la condition susmentionnée. Pour ce faire, l'équipe a utilisé les bancs de jet d'air du laboratoire de mécanique des fluides. Ceux-ci ont permis de vérifier la relation entre valeur de résistance et variation de tension en sortie du manomètre différentiel.

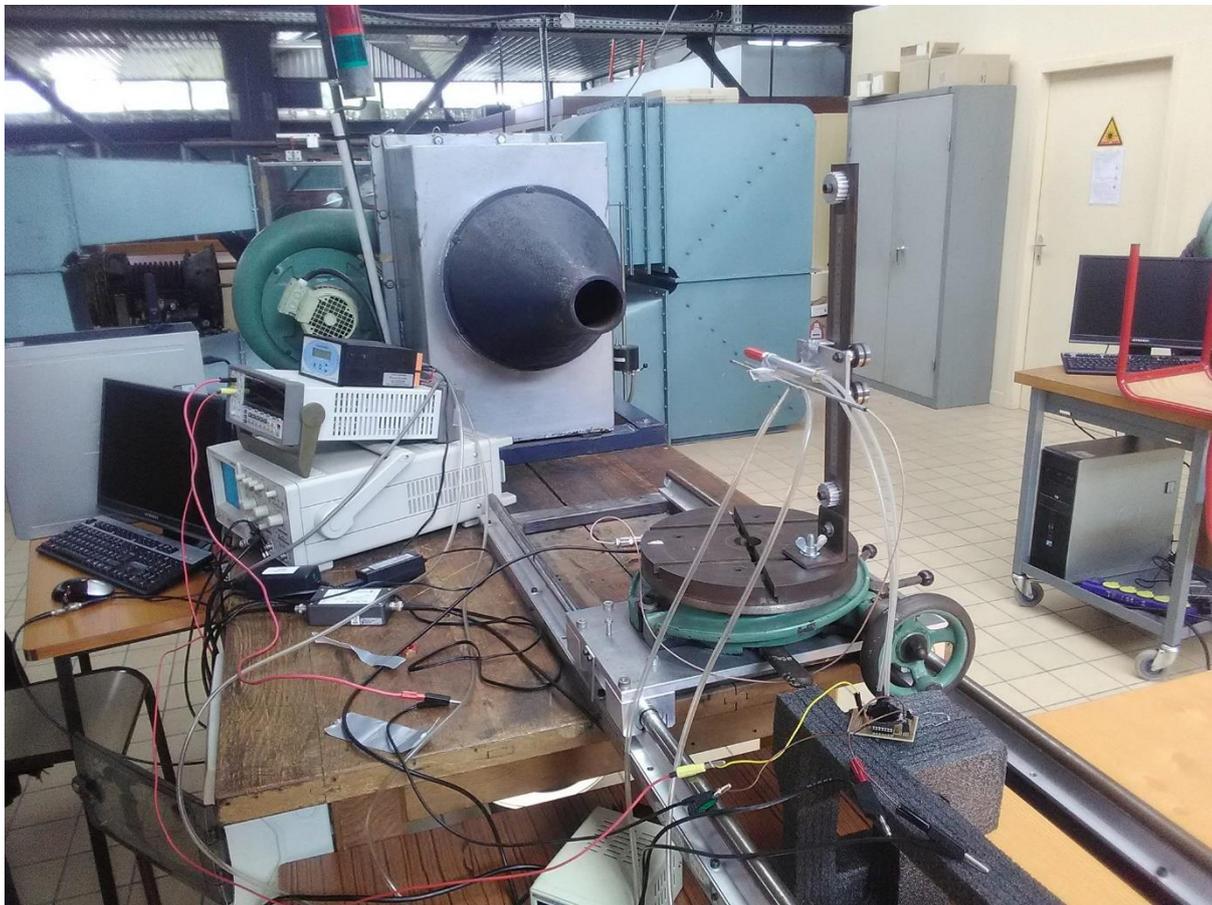


Figure 40-Notre montage sur le banc du jet d'air du laboratoire de mécanique des fluides

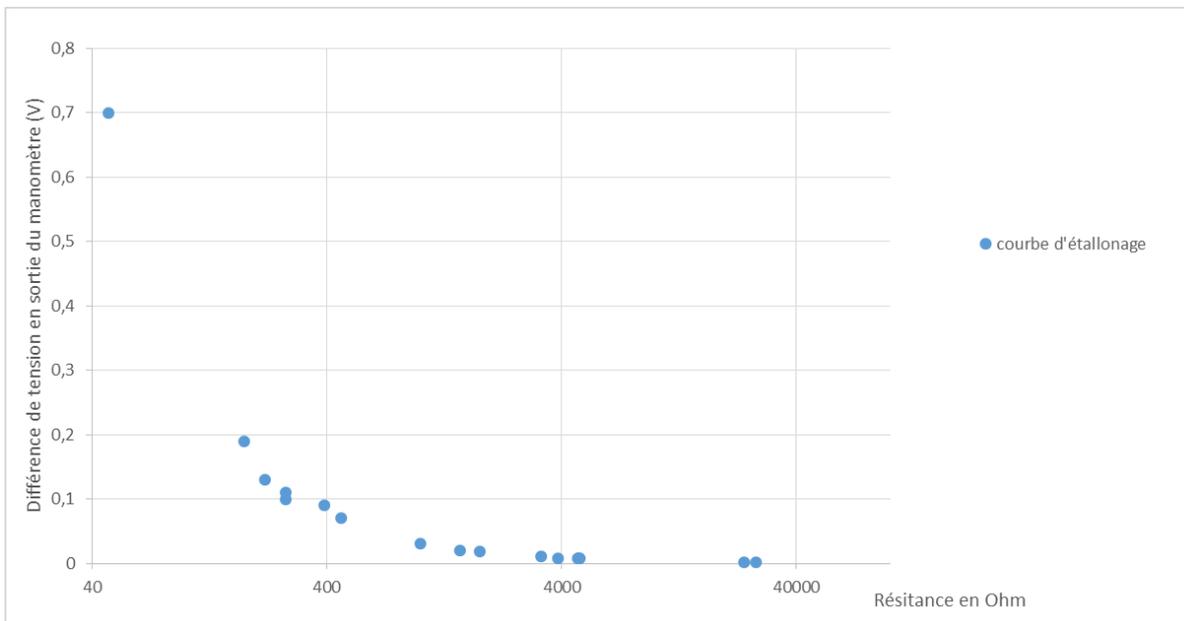
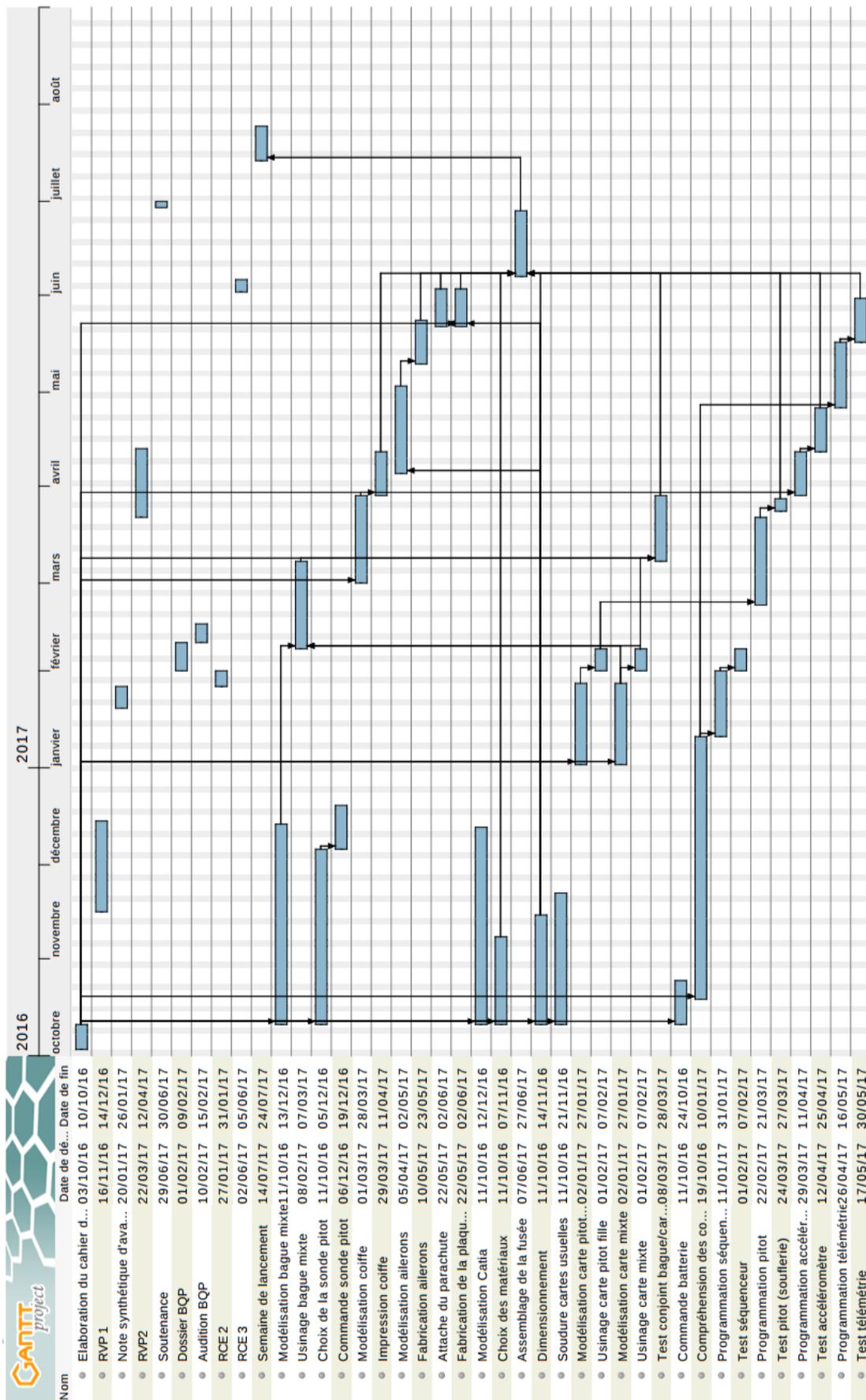


Figure 41-Courbe d'étalonnage du manomètre différentiel: relation entre la résistance d'un résistor de l'amplificateur 1 et la différence de tension en sortie du manomètre

Cette première étude nous a permis de déterminer la résistance nécessaire. Cependant, sa faible valeur a généré un offset de -1.4V en sortie empêchant toute mesure car le PIC ne lit que les valeurs comprises entre 0 et 3.3V. Nous avons donc placé une forte résistance ne générant pas d'offset mais ne permettant pas la variation de tension désirée et modifié la valeur d'une résistance, en réalisant la même étude, sur le deuxième montage amplificateur, afin d'obtenir le gain adéquat du montage.

Appendice de gestion de projet

GdP 1 : Diagramme de Gantt



GdP 2 : Budget du projet

	Quantité	Coût unitaire	Total	Temps de production
Mécanique :				
Carton pour le corps de la fusée	1	2.50 €	2,5 €	ST
Médium pour les bagues	1	54 €	54 €	14h
Plaque d'aluminium pour les ailerons	4	6 €	24 €	4h
Tiges filetées	4	1.50 €	6 €	ST
Tube d'aluminium pour le capteur Pitot	1	3 €	3 €	1h
Coiffe imprimée en 3D	1	35 € (inclue le temps de travail de M. Navarro)	35 €	2h
Parachute	1	60 €	60 €	ST
Electronique :				
Circuits imprimés	7	100 €	700€	4h
<u>AccumulateurLipoConrad</u>	1	7.32 €	7,32€	ST
Composants RS	1	100 €	100€	ST
Servomoteur	1	25 €	25€	ST
25 g d'étain (soudures)	1	0,38€	0,38€	ST
Fils cuivre	2m	1,47€	2,94€	ST
Autre :				
Inscription à la campagne lancement unitaire	5 élèves	340,25€	1701,25€	1h
Frais de dossier	1 dossier	7,55€	7,55€	-
Frais de dossier hébergement	1 dossier	3,5€	3,5€	-
Hébergement	7 nuits	3,7€	25,9€	-
Repas de la journée	7 jours	21,9€	153,3€	ST
Petit déjeuner	1	3,90€	3,90€	ST
Dejeuner	1	9€	9€	ST
Diner	1	9€	9€	ST
Transport (train)	2 trajets	75€ (estimation au 18/01/17)	150€	7h
Autocollants Sponsors	1	10 €	10 €	2h
Salaire David Navarro	36	40€	900€	
Salaire Chargé TD PE	27	40€	1080€	
Salaire Philippe Timonier	2	40€	80€	
Cours PE 1 et 2	4 heures	40€	160€	4h
Coût élève théorique	5 élèves	37,9€ (Smic net)	9133,9€	1205h
Heures de travail du PE	160	7,58 € (Smic net)	1212,8€	160h
Heures de TD PE	27	7,58 € (Smic net)	204,66€	27h
Heures RVP	2	7,58 € (Smic net)	15,16€	2h
Heures BQP	1	7,58 € (Smic net)	7,58€	1h
Heures Restitution	1	7,58 € (Smic net)	7,58€	1h
Heures RCE	10	7,58 € (Smic net)	75,8€	10h
Heures semaine de lancement	40	7,58 € (Smic net)	303,2€	40h
RCE 2	5 élèves		250€	20h
Frais d'alimentation	1			
Frais de déplacement	1			
Frais d'hébergement	1			
TOTAL			14335,29€	

Check-list

Check-list de rapport de Projet d'Etudes

A remplir par les rédacteurs (élèves)

et à insérer en dernière page du rapport

A développer

Renseigner la case par le nom du responsable, ou la date ou une simple croix lorsque la vérification a été faite.

Vérification présence	Vérification qualité
-----------------------	----------------------

Contenu

Table des matières	X	X
Introduction	X	X
Conclusion générale	X	X
Bibliographie	X	X
Résumé	X	X
Table des figures	X	X

Forme

Vérification orthographe		X
Pagination		X
Homogénéité de la mise en page		X