

Catherine SYLVESTRE
Vincent COULET
Jérôme DONNARD
Aaron LEPIERRES
Sofyann DUTERTRE
Anthony CHALON
Xavier GUACHIGNARD
Arnaud DRUART

Compte-rendu d'expérience : club Minespace

Campagne nationale 2003 – Sissones – **Projet Fuz'mines : reconstitution de la trajectoire de la fusée**

1) Nos impressions par rapport à notre premier projet avec Planète-Science

Pour commencer, toute l'équipe Fuzmines tient à remercier l'association Planète-Science ainsi que ses nombreux bénévoles qui nous ont aidé et soutenu durant toute une année ; on pense particulièrement à notre suiveur, zen ainsi qu'à manu pour l'électronique. Il s'agissait de notre premier projet de fusée et nous avons donc énormément travaillé tout au long de l'année afin de satisfaire aux exigences de Planète-Science et de pouvoir être présent cet été à Sissones.

La campagne de lancement fût une expérience extraordinairement intéressante et enrichissante : nous avons découvert beaucoup de choses dans des domaines variés. Nous avons encore travaillé d'arrache-pied pour qualifier la fusée la veille du lancement, tard dans la nuit ; nous remercions encore une fois l'association ainsi que toutes les membres présents : nous avons passé une semaine de folie, entourés de gens formidables qui n'ont pas hésité à passer du temps avec nous pour faire avancer notre projet. On remercie tout particulièrement Francis, qui n'a pas compté ses heures et qui nous a beaucoup, beaucoup aidé. Enfin, on termine par un grand bravo à l'organisation : cette semaine était magique, l'ambiance était très sympa et toute l'équipe est heureuse d'avoir partagé cette expérience.

2) Compte-rendu du vol

Après un an d'investissement et de réflexion, après quatre jours mémorables de travail acharné, après une qualification in extremis, après une nuit courte mais très agitée, le jour tant attendu du lancement s'est enfin levé. Nous étions tous extrêmement fiers et heureux de pouvoir assister à cet évènement, fruit de notre travail et de notre patience. Après tant de moments de doute, d'espoir, de fatigue, notre fusée allait enfin s'élever dans les airs. Nous n'allons pas raconter en détail toute cette journée mais ce fût avec une immense joie et un peu d'appréhension que nous avons plié le parachute dans sa case et que nous nous sommes dirigés vers le pas de tir. La tension est montée, montée, jusqu'au compte à

rebours final. A ce propos, n'oubliez pas de prévenir les membres de clubs qu'on dit « trois, deux, unité, mise à feu... » Car notre bien aimée chef de projet s'attendait à « trois, deux, un, zéro » et n'a donc pas appuyé sur le bouton au bon moment (« Faut que j'appuie là ? »).

Bref, notre cœur s'est arrêté de battre un instant puis fuzmines est monté haut et vite dans le ciel. Certain ont réussi à la suivre des yeux tandis que les autres étaient suspendus aux lèvres de l'homme au jumelle qui a finalement annoncé un vol balistique. On a espéré jusqu'au crash que le parachute se déploie mais il ne nous a pas fait ce plaisir.

Les débris de notre fusée ont été récupérés par zen et ont les a examinés à la rentrée à Nantes : malheureusement le choc a été très violent (crash à environ 100 m/s) et la fusée a été littéralement pulvérisée (les tubes de carbone de 3 mm d'épaisseur déchiquetés). Nous n'avons donc pas pu découvrir d'où vient le problème de parachute. Seule certitude, la prise jack rattachée à la rampe de lancement a bien été débranchée au décollage ; d'autre part, des restes de la porte ont été retrouvés dans les débris ce qui signifie qu'elle ne s'est pas ouverte. Plusieurs hypothèses peuvent donc être envisagées :

- La secousse lors du décollage a endommagé le circuit électronique commandant la mise en route du servomoteur
- Au décollage, le fil d'alimentation du servomoteur s'est débranché sous l'effet du choc.
- Le servomoteur n'a pas libéré la porte parce qu'il était bloqué.

Cette dernière hypothèse est à notre avis la plus plausible. En effet, notre mécanisme d'ouverture n'était pas très bien adapté : pour que le bras du servomoteur retienne fermement la porte tout en permettant son éjection, il fallait que la porte soit à la fois poussée par le parachute et retenue par le bras du moteur. Ce système était assez fragile et a nécessité un réglage minutieux. Il se peut cependant que lors du dernier pliage du parachute, celui-ci exerce une pression trop forte sur le bras du moteur, empêchant son ouverture. Nous retenons donc de cette expérience que le mécanisme d'ouverture de la porte doit être fiable, « solide » et permettre un maximum de test avec un minimum de complication.

3) Compte-rendu de la télémétrie

Commençons par les points positifs : la chaîne de télémétrie a fonctionné correctement (ce qui n'était pas gagné d'avance en arrivant à Sissonnes). La fusée a émis correctement pendant tout le vol (jusqu'au crash) et la réception et la démodulation étaient bonnes. Nous avons obtenus des trames conformes à ce que nous attendions (synchro OK : ff-00-ff) ce qui nous a permis de traiter les données.

Ce n'est pas nous qui avons réalisé l'interface Labview (merci zen) et nous avons donc eu quelques difficultés à analyser les résultats : les courbes fournies par l'appli (vitesse, trajectoire, inclinaison, altitude) étaient totalement incohérentes (courbe de trajectoire en forme de spirale). Nous avons essayé de comprendre d'où venaient ces erreurs. Avec l'aide de techniciens de l'école nous avons essayé de retrouver et d'analyser indépendamment les données de chaque capteur (les trois gyroscopes et les deux capteurs de pression). Il en est ressorti plusieurs anomalies :

- Les deux capteurs de pression ne donnent pas la même valeur avant le décollage (alors qu'ils mesurent tous les deux la même chose).
- Le gyroscope donnant la rotation propre de la fusée donne des valeurs incohérentes (changement brusque du sens de rotation)

- Les valeurs de la pression statique sont elles aussi incohérentes : celle-ci subit de nombreuses variations, y compris à la hausse, ce qui ne devrait pas être le cas.
- Les courbes de pression statique et du gyroscope 1 (rotation propre) se ressemblent étrangement.

Cependant, nous obtenons aussi des résultats conformes à ce qui était attendu :

- La courbe de pression d'arrêt (pression dynamique) suit une évolution proportionnelle à la vitesse théorique.
- Les deux autres gyroscopes semblent avoir fonctionné : ils suivent des évolutions plus ou moins périodique qui peuvent être reliées à la rotation propre de la fusée.

Après discussion avec nos professeurs, il en est ressorti que :

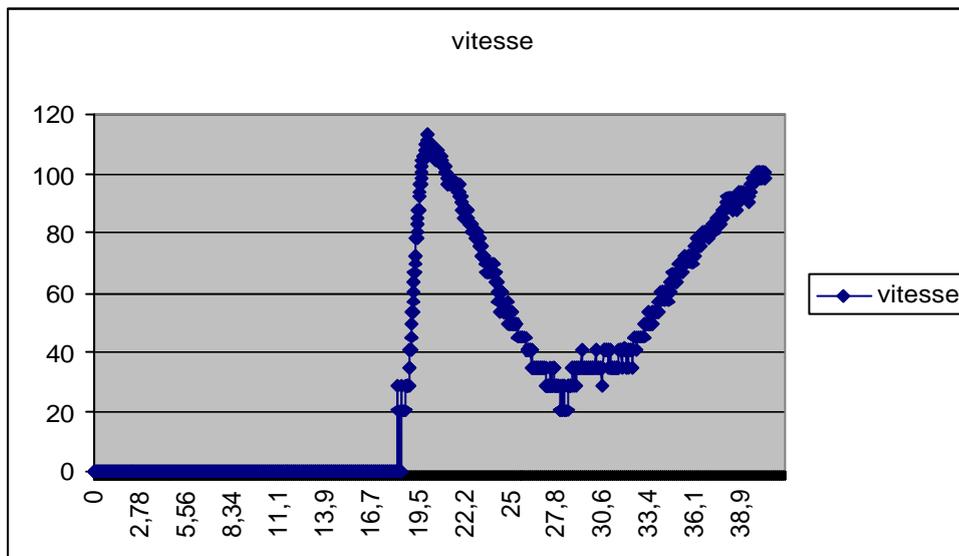
- Trois capteurs sur cinq ont a priori fonctionné correctement et leurs données sont exploitables.
- Le capteur de pression statique et le gyro 1 n'ont pas fonctionné ce qui peut être dû à un problème de la carte PIC (ou dans le programme PIC) ce qui pourrait expliquer la similarité des deux courbes.

Nous avons quand même pu tirer parti des ces données. Le capteur de pression statique n'ayant pas marché, nous ne pouvons pas retrouver l'altitude de la fusée (et donc la masse volumique de l'air). Cependant, nous avons pu estimer la vitesse de notre fusée en considérant la pression statique comme constante (ce qui entraîne une masse volumique constante) et égale à la valeur de la pression dynamique avant le décollage. Cette approximation peut être justifiée par le fait que la pression statique varie peu relativement à la pression dynamique (par rapport à nos estimations). De même la masse volumique de l'air varie peu sur 1000 mètres de dénivelé (moins de 10 %). En fait la pression et la masse volumique réelles sont légèrement inférieures à celle que nous avons pris ce qui entraîne une sous-estimation de la vitesse. Malgré tout, nous obtenons une magnifique courbe de vitesse sur laquelle on distingue parfaitement les différentes phases de vol : poussée, phase balistique, culmination, descente balistique. Les valeurs obtenues (vitesse maxi = 113 m/s) sont inférieures aux prévisions de Trajec ($V_{max} = 145$ m/s si je me souviens bien), conformément à nos approximations. Voilà donc un excellent point pour nous !

En ce qui concerne l'inclinaison de la fusée, l'un des gyroscopes n'ayant a priori pas marché, nous avons essayé de la retrouver à partir des valeurs des deux autres gyro (en théorie, deux gyro suffisent pour retrouver l'angle d'inclinaison i mais les valeurs seront en pratique plus ou moins précises suivant l'angle de rotation propre). Nous avons donc modifié nos formules de trigo dans l'espoir de retrouver la fameuse inclinaison. Cependant nous ne trouvons aucun résultat cohérent, malgré de nombreuses tentatives. Nous avons donc abandonné l'idée de retracer une belle courbe de trajectoire pour Fuzmines. L'expérience n'a donc qu'à moitié fonctionné.

Nous avons recherché les causes qui pourraient expliquer nos différentes déconvenues mais les mystères de la télémétrie numérique restent impénétrables. Cependant, nous savons que nous aurions dû utiliser des capteurs de pression plus précis (plage de mesure mieux centrée autour de notre gamme de valeur attendue) pour obtenir des résultats plus fins. D'autre part, le fonctionnement de nos gyroscopes est longtemps resté obscur et il faut absolument savoir ce qu'on mesure et comment on le mesure pour pouvoir ensuite traiter correctement les résultats. Enfin, à l'avenir, nous recommandons d'effectuer le maximum de test, le plus tôt possible pour appréhender correctement le traitement des données issues des capteurs.

D'autre part, le fait d'utiliser une télémétrie numérique nécessite d'avoir un traitement informatique pour pouvoir décrypter les données issues du PIC et du FSK. Comme nous n'étions pas en avance et que nous n'avions pas fait nous-même notre appli, nous n'avions jamais pu voir si les données codées dans le PIC et émises à travers la chaîne télem étaient correctes. Cette impossibilité de faire un test complet avant le décollage explique aussi qu'on ait eu du mal à retrouver des résultats.



4) Perspectives d'avenir

Cette première expérience avec Planète Science ayant été extrêmement intéressante et enrichissante, deux membres du projet fuz'mines envisagent de reprendre en main le club cette année. Le but est d'encadrer les nouveaux arrivants qui réaliseront leurs projets dans un cadre scolaire, comme nous l'année dernière. Les anciens du club assureront une mission de parrainage pour guider les nouveaux et leur éviter moult erreurs. Nous aurons donc l'occasion de nous re-contacter cette année.

L'équipe fuz'mines.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier vivement :

- ✚ Richard DALLIER, notre tuteur Ecole, pour la qualité de ses conseils, son suivi et sa grande disponibilité ;
- ✚ Eric MORTEAU et Manoël DIALINAS, Techniciens en électronique et en mécanique, pour leur grande disponibilité, leurs nombreux conseils éclairés et leur sympathie ;
- ✚ Patrick ROMMELUERE, notre suiveur *Planète Sciences*, pour son suivi et son aide précieuse à la fois sur le plan matériel et technique ;
- ✚ Tous les interlocuteurs avec qui nous avons été amenés à interagir au cours du projet, pour leur sympathie et leur grand professionnalisme ;
- ✚ Nos sponsors, notamment *Analog Devices*, *Tetras*, *Aéroforme* et *Kepler* pour leur soutien moral, financier et matériel au projet ;
- ✚ L'association *Planète Sciences* et le CNES, notamment pour leurs apports logistiques, matériels et pédagogiques.

Sommaire

Remerciements.....	2
Introduction.....	4

I. La gestion du projet.....6

1. L'équipe
2. Relations internes
 - 2.1 Importance de la communication et outils
 - 2.2 Rôle des chefs de projet, management de l'équipe et gestion au quotidien
3. Relations externes
 - 3.1 Démarche auprès de *Planète Sciences*
 - 3.2 Création du club et contacts BDE
 - 3.3 Contacts Ecole
 - 3.4 Sponsoring
4. Nouvelles connaissances acquises

II. La conception de Fuz'Mines.....12

1. Choix de l'expérience
 - 1.1 Des débuts à aujourd'hui
 - 1.2 Reconstitution de la trajectoire
2. L'expérience
 - 2.1 Choix des capteurs
 - 2.2 Choix numérique/analogique
 - 2.3 Choix des conditionneurs de signaux
 - 2.4 Systèmes d'alimentation
 - 2.5 Conception et réalisation des cartes électroniques
 - 2.6 Choix de la trame d'émission
 - 2.7 Choix du convertisseur analogique/numérique
 - 2.8 Logiciel de traitement des données : *Labview*
 - 2.9 Schéma électronique général
 - 2.10 Calculs d'incertitudes
 - 2.11 Programmation du PIC
 - 2.12 Emetteur
3. La mécanique
 - 3.1 Structure externe

- 3.2 Structure interne
- 3.3 Intégration
- 3.4 Tube de Pitot
- 3.5 Stabilité
- 3.6 Organisation des éléments dans la fusée
- 3.7 Ailerons
- 3.8 Ogive
- 3.9 Système de récupération
 - 3.9.1 Parachute
 - 3.9.2 Propulsion de la porte
 - 3.9.3 Minuterie

III. Synthèse, bilan et conseils pour les projets futurs.....52

- 1. Points importants à ne pas oublier
- 2. Erreurs à ne pas refaire ou idées à réitérer
 - 2.1 Mécanique
 - 2.2 Electronique

Conclusion..... 55

Annexes..... 56

Introduction

La vocation initiale des clubs aérospatiaux est de réaliser des fusées, dont le gabarit peut aller de la micro fusée, d'une taille d'environ 20 cm, à celui d'une fusée expérimentale, d'une taille maximum de 3 m. L'objectif est double : il est d'une part de mener à bien une expérience physique (mesures de pressions, vitesses, contraintes...), et d'autre part de réaliser une fusée respectant le cahier des charges axé sur la sécurité établi par *Planète Sciences* (<http://www.planete-sciences.org>).

Planète Sciences est une association de loi 1901 qui aide chaque club dans son projet en lui fournissant gratuitement un propulseur et un émetteur FM pour les fusées ou l'enveloppe et l'hélium pour les ballons. Elle organise la campagne nationale de lancement qui rassemble pendant une semaine les clubs ayant réalisés au cours de l'année des fusées expérimentales, mini fusées et ballons. Elle leur permet de procéder aux lancements dans les meilleures conditions de sécurité et en respectant le cadre législatif. *Planète Sciences* et le CNES prennent en charge l'organisation logistique de cet événement, apportent un soutien technique aux clubs et surtout, garantissent que le cadre législatif et les normes de sécurité soient bien respectés. Cette année, la Campagne Nationale de lancement aura lieu à Sissonnes entre le 29 Juillet et le 3 Août.

Le lancement d'une fusée expérimentale commence par la mise à feu de son propulseur, lorsque toutes les longues procédures de mise en fonctionnement ont été terminées. Les mesures décrivant l'expérience embarquée sont généralement retransmises en temps réel grâce à l'émetteur radio. Lorsque la fusée arrive à son apogée, un parachute est alors ouvert pour ralentir la descente. Le travail du club est de concevoir, réaliser, et tester l'ensemble de la fusée, que l'on peut décomposer en deux secteurs : l'électronique et la mécanique. La nécessité de mettre en forme les signaux issus des capteurs et d'effectuer des calculs en temps réels implique souvent l'utilisation de microprocesseurs. Il faut donc développer des cartes suffisamment souples pour répondre aux exigences attendues. La partie mécanique se compose essentiellement d'un cylindre creux (Duralumin ou carbone) formant le corps de la fusée, d'une coiffe dans laquelle est logé l'émetteur, et de 4 ailerons afin d'assurer la stabilité de l'engin.

Le projet réalisé cette année se nome «Fuz'MINES » et consiste à la réalisation d'une fusée expérimentale. Nous avons décidé d'inscrire ce projet dans le cadre d'un projet scolaire, projet OSE, afin de profiter du temps prévu pour ce projet et d'avoir un soutien technique et financier de la part de l'Ecole. Ce projet était pour les membres de l'équipe leur première expérience dans ce domaine. Peut-être un projet de cette dimension aurait-il dû seulement suivre la construction d'une mini fusée, moins complexe à mettre en œuvre ? Il est clair que se lancer dans la construction d'une fusée expérimentale sans aucune expérience préalable n'est pas à conseiller pour la suite.

L'objectif de ce rapport est double : il permet de faire la synthèse du projet afin que nos erreurs et nos succès puissent servir pour les projets futurs du club d'une part, et d'autre part il sert de support d'évaluation du projet. Nous allons faire état de tout le cheminement du projet, en mettant l'accent sur ce qui a motivé nos choix. Nous présenterons d'abord tout l'aspect gestion de projet en citant entre autres les contacts que nous avons pu avoir et qui pourront être réutilisés par les prochaines équipes. Nous détaillerons ensuite la conception de la fusée en justifiant les choix qui ont conditionné le projet.

I. La gestion du projet

1. L'équipe

Construire une fusée expérimentale comporte deux parties qui sont indissociables : d'une part la réalisation de la structure mécanique, et d'autre part la mise en place de l'expérience et de toute l'électronique qui entre en jeu. Ces deux parties ne peuvent pas être réalisées de façon indépendante car elles se conditionnent mutuellement.

Pour parvenir à réaliser notre projet, il a donc fallu constituer une équipe suffisamment nombreuse (mais pas trop) et motivée. Ainsi, nous avons rassemblé huit personnes réparties ainsi :

NOM	FONCTION DANS LE PROJET
Vincent COULET	Chef de projet expériences
Anthony CHALON	Equipe expérience, responsable du PIC
Aaron LE PIERRES	Equipe expérience, responsable circuits
Xavier GACHIGNARD	Equipe expérience, responsable calculs théoriques
Catherine SILVESTRE	Chef de projet général et mécanique
Arnaud DRUARD	Equipe mécanique
Jérôme DONNARD	Equipe mécanique
Sofyann DUTERTRE	Equipe mécanique, responsable du système de récupération

Tous les élèves étaient cette année issus de 2^e année. Cependant, un objectif pour l'année prochaine sera d'élargir les membres du club à toutes les promotions afin d'enrichir les projets et transmettre les connaissances acquises cette année.

2. Relations internes

2.1 Importance de la communication et outils

L'équipe s'étant divisée en deux, il était crucial d'avoir des temps de rencontre régulières afin de s'informer de l'avancement de chaque partie, d'échanger nos questions et de construire un projet unique et commun.

Pour favoriser la communication, plusieurs outils ont été utilisés. Premièrement, un alias mail, fuzmines@emn.fr, a été créé. Nous avons choisi de ne pas séparer cet alias en deux (un pour chaque partie du projet) pour renforcer les échanges et afin de s'assurer que tout le monde puisse être au courant des sujets de discussion sur le projet. Cet alias a très bien fonctionné et on comptait le 22 juin près de 700 mails échangés. Des le début du projet, tous les membres de l'équipe ont compris l'importance de l'alias, et la lecture des mails se faisait pour tous de façon quotidienne afin d'avancer au plus vite.

Le moyen le plus efficace de communication était sans aucun doute les réunions en sous-groupe et en groupe entier. Nous avons travaillé de façon régulière, et dès le début du projet, des réunions hebdomadaires ont été mises en place. Au début, toute l'équipe devait y participer afin de définir les orientations du projet. Une fois le projet lancé, les réunions

groupe entier se sont espacées à une réunion toutes les 2 semaines (ou tous les 10 jours) et des réunions hebdomadaires en sous équipes ont vu le jour. Chaque réunion comportait un ordre du jour qui définissait le temps des réunions mais surtout leur contenu. Chacun pouvait ainsi réfléchir à l'avance aux sujets qui devaient être abordés.

Après chaque réunion un compte-rendu était envoyé par mail à toute l'équipe afin que chacun possède un résumé des discussions. Ces comptes-rendus permettaient également de clarifier le travail que chacun avait à faire (nous utilisons pour cela un planning de répartition des tâches avec des échéances sur lesquelles nous nous étions entendus).

2.2 Rôle des chefs de projet, management de l'équipe et gestion au quotidien

Un projet sans chef de projet a du mal à avancer. En effet, le rôle principal d'un chef de projet est de motiver son équipe, de relancer continuellement ses équipiers pour s'assurer que le travail sera effectivement prêt à temps. Pour cela, il est important que les règles de fonctionnement soient claires pour tout le monde. Il faut permettre aux membres de l'équipe de réagir sur ce fonctionnement, et de proposer d'autres moyens de travail en leur laissant la possibilité de le faire pendant les réunions ou par suggestion dans les mails.

D'autre part, le chef de projet est chargé de préparer les réunions, et de s'assurer du bon avancement du projet. Il doit fournir les outils de gestion de projet si besoin. Par exemple, pour s'organiser et avoir une vision des tâches à accomplir et pour savoir qui les accomplit, il nous a semblé intéressant de s'appuyer sur un diagramme de Gantt et actualisé à chaque réunion. Il peut être nécessaire également (comme ça a été le cas pour nous fin avril) de faire un diagramme Pert afin d'estimer le temps qui devra forcément s'écouler avant la fin de certaines action (ou du projet).

Le chef de projet doit également avoir une vision de l'ensemble du projet. Il doit être capable de répondre à des questions sur chaque partie et savoir où trouver les informations techniques sur les détails du projet. Il doit s'efforcer de faire des comptes-rendus au suiveur de *Planète Sciences*, et à toute personne suivant le projet (comme le tuteur Ecole par exemple).

Enfin, si la structure n'a pas permis l'attribution de rôle tels que la gestion de la trésorerie ou des sponsors, le chef de projet devra intégrer ces fonctions. Ainsi, il est important de tenir à jour les dépenses et les recettes du projet pour s'assurer qu'au bilan sa réalisation sera réellement possible. Le projet dépendant d'un club au BDE (Bureau Des Elèves), il possède un compte dépendant de celui du BDE. Pour utiliser l'argent sur ce compte, le BDE demande soit une présentation d'un devis pour fournir le compte exact, soit rembourse les frais sur facture. Le projet a également pu disposer d'un montant réservé par l'Ecole pour les projets OSE. Cet argent a été utilisé sous forme de bons de commande délivrés par l'intermédiaire du tuteur sur devis.

Il est de même primordial de rechercher des partenaires financiers (c'est le mieux, mais aussi le plus difficile à trouver) ou fournisseurs de matériel. Les sponsors donneront au projet une nouvelle dimension et permettront aux idées les plus folles de se concrétiser. Ce point spécifique sur les sponsors sera développé dans la suite du rapport.

3. Relations externes

3.1 Démarche auprès de Planète Sciences

Afin de pouvoir lancer notre fusée, c'est-à-dire pour bénéficier du propulseur et de l'émetteur fournis par le CNES, nous avons dû faire plusieurs démarches auprès de *Planète Sciences*. D'abord nous nous sommes déclarés en temps que club de l'Ecole des Mines de Nantes, MineSpace, souhaitant construire une fusée expérimentale. Suite à cette déclaration, un suiveur, expérimenté dans la construction de telles fusées, nous a été attribué par *Planète Sciences*. D'abord des échanges par mails ont eu lieu. Puis notre suiveur, Patrick ROMELLUERE, est venu nous voir mi décembre. Le but de cette première visite était de présenter nos premières idées par rapport à l'expérience, à l'électronique qui serait utilisée et à la structure mécanique. Cette mise au point nous a permis de recadrer nos objectifs à court et moyen termes.

Notre suiveur est ensuite revenu à trois reprises. Chacune de ses visites nous a permis de mettre en évidence de nouveaux problèmes de conception. Il nous a également déchargé de la conception de la plateforme logicielle sous *Labview* pour le traitement au sol des données. Enfin, lors de sa dernière visite il était accompagné d'un expert en électronique avec qui il a pu tester toute notre chaîne de télémétrie en vue de la qualification de notre fusée.

Planète Sciences a également été une source d'information technique sans limite. En effet, le site du secteur espace regroupe les comptes rendus d'expériences des clubs qui reconduisent des projets espace. Ainsi, pendant la phase de définition du projet, du choix des expériences et pour certaines idées techniques, nous avons pu nous aider des ces rapports.

De plus, le site comporte un espace «Forum » qui est très utilisé par les clubs. Ainsi, nous avons pu nous en servir pour demander de l'aide dans bien des domaines liés aux problèmes rencontrés. Dans la majeure partie des cas, nous avons obtenu des réponses complètes et détaillées.

Enfin, *Planète Sciences* possède un service d'aide téléphonique disponible tous les mercredis soirs. Nous avons donc pu dialoguer avec des bénévoles de l'association à plusieurs reprises.

Le site de *Planète Sciences* permet d'accéder également aux sites des clubs. Nous avons donc profité des ces contacts directs avec d'autres clubs pour échanger sur des problèmes ou nous procurer des informations quand nous avions des doutes.

Néanmoins, le temps d'échange le plus bénéfique a sans aucun doute été la participation pour cinq d'entre nous à un week-end de formation à la télémétrie proposé en Janvier par *Planète Sciences*. Ce week-end nous a permis de découvrir réellement ce qu'engageait la télémétrie, et nous a présenté les différents modules que nous avons dû intégrer dans notre fusée. Nous avons aussi abordé les problèmes de perturbations électromagnétiques dont nous n'avions préalablement aucune idée.

Pour répondre au cahier des charges et à la démarche *Planète Sciences*, nous avons dû respecter différentes étapes dans la gestion de l'avancée de notre projet. Ainsi, nous avons progressé de la façon suivante :

- Novembre :** Déclaration de projet, création d'un club
- Décembre :** définition des objectifs et déclaration de projet ; Revue de début de projet (1 mois et demi)
- Février :** avant-projet et document d'avant-projet ; Revue de définition (2 mois)

Avril :	définition de toutes les parties du projet et document de projet ; Revue de conception (2.5 mois)
Mai :	réalisation du projet et dossier de réalisation ; Revue de qualification (6 mois)
Juillet :	lancement de la fusée

3.2 Création du club et contacts BDE

Nous avons créé un club au Bureau des Elèves de l'Ecole des Mines de Nantes pour plusieurs raisons. Premièrement, le projet nécessitait une structure vis-à-vis de *Planète Sciences*. Deuxièmement, un club au BDE était l'occasion de pouvoir recevoir de l'argent sur un compte (affilié à celui du BDE) le cas échéant. De plus créer un club nous permettait de profiter de la subvention délivrée par le BDE pour aider les nouvelles structures à se lancer. Enfin, une telle structure pouvait laisser envisager une éventuelle pérennité dans les activités liées à l'espace. Avec une structure existante, il sera plus facile de lancer de nouveaux projets l'année prochaine se basant sur les éléments déjà réunis cette année.

3.3 Contacts Ecole

Nos quelques connaissances en mécanique et en électronique ne nous ont pas permis d'être totalement autonomes. Il nous a donc fallu demander de l'aide à différentes personnes de l'Ecole pour nous éclaircir sur certaines questions, et parfois pour nous aider également dans les phases de réalisation. Voici une liste non exhaustive des personnes qui nous ont aidé cette année avec leur position par rapport au projet :

- Richard DALLIER : tuteur Ecole du projet
- Manoël DIALINAS (Subatech) : aide à la conception mécanique de la fusée
- Eric MORTEAU : aide à la réalisation des circuits électroniques, logiciel *Eagle*
- Hervé CARDUNER (Subatech)^o: transcription informatique des dessins techniques des pièces à usiner
- Noël SERVAGENT : aide à l'usinage des pièces
- Michael CANU : aide au choix du PIC et à sa programmation
- Yvan GOURIOU : aide logistique et technique à l'étalonnage des capteurs
- Arnaud CADIOU (Subatech) : bureau d'étude, souvent disponible
- Carle RAUCH : souvent disponible pour des questions diverses
- L'atelier mécanique de l'Ecole à Subatech

3.4 Sponsoring

Au bilan financier, notre projet a vraisemblablement coûté plus de 2 000 euros. Autant dire que sans l'aide de l'Ecole et de nos partenaires, rien n'aurait pu être construit. Ainsi une démarche sponsoring n'est en aucun cas à oublier et doit commencer dès la phase de définition du projet.

Toutes les entreprises sont intéressantes à démarcher car elles sont susceptibles de délivrer des taxes d'apprentissage (argent que *Planète Sciences* est autorisé à recevoir). Ainsi, nous avons pu bénéficier de l'aide financière de l'entreprise TETRAS (contact :

jclp@tetras.fr). D'autres entreprises peuvent choisir de sponsoriser simplement un club. Ainsi, l'entreprise KEPLER (contact : KEPLERFRA@aol.com) nous a également aidé financièrement.

Enfin, la majeure partie des entreprises préfèrent aider les projets en nature soit en fournissant des échantillons, soient en proposant leurs services. Ainsi, l'entreprise ANALOG DEVICES (16, rue Georges Besse, 92182 ANTONY CEDEX ; <http://www.analog.com>, contact : eric.poidevin@analog.com) nous a fourni un gyroscope sur evalboard, et l'entreprise AEROFORME (Parc d'activité de Pont Béranger, 44680 St Hilaire de Chaléons, tél : 02.40.02.69.38, contact : François Lemoine) a fabriqué les tubes de carbone pour l'enveloppe de la fusée.

Le démarchage des sponsors se fait dans l'idéal avec une plaquette de présentation à disposition. Dans tous les cas il est important d'avoir réfléchi aux apports que nous pouvons proposer aux entreprises. La campagne étant ouverte au public, il est possible d'y inviter les entreprises partenaires en leur permettant d'avoir un stand et de pouvoir faire de la publicité face à des dizaines d'ingénieurs. Quoi qu'il en soit, un minimum est la promotion de l'entreprise via le site Web (<http://minespace.free.fr>) et à l'aide de logos sur la fusée. Un des objectifs du club pour l'année prochaine pourrait être de faire une plaquette sponsoring avec les premiers projets qui ont abouti afin d'avoir plus d'impact.

4. Nouvelles connaissances acquises

S'investir dans le projet Fuz'MINES a été pour chaque membre de l'équipe l'occasion de vivre pleinement les contraintes de la gestion d'un projet conséquent. Ainsi beaucoup de problèmes de gestion des délais, des coûts, et des tâches ont été gérés par tous.

D'autre part, des compétences ont été acquises à travers un contact permanent avec les enseignants-chercheurs et les techniciens de l'Ecole des Mines, contact qui se révéla aussi intéressant du point de vue technique que du point de vue humain. Beaucoup d'entre nous ignoraient un tel potentiel présent autour d'eux.

Partie électronique-expérimentation :

D'une part, concernant la partie expérimentation, le projet nous a permis de consolider nos connaissances concernant certaines notions de thermodynamique, notamment à travers les différentes formules relatives à la vitesse et liées à l'utilisation d'un tube de Pitot. La compréhension des différentes caractéristiques des capteurs (gammes de mesure, précisions, mode d'alimentation, etc.), ainsi que leur choix ont été très enrichissants du point de vue technique. L'élaboration de circuits, à la fois au niveau de leur conception que de leur réalisation, a apporté à l'ensemble de l'équipe électronique de solides connaissances théoriques et pratiques en électronique. D'autre part, le week-end de formation télémétrie proposé par *Planète Sciences* en janvier nous a permis de découvrir les notions de base en traitement du signal.

Ensuite, la conception et la mise en œuvre du programme inséré dans le PIC, ainsi que toute l'élaboration de l'envoi des trames de données a induit une certaine maîtrise de la télémétrie numérique sous un angle plus pratique.

Enfin, les différentes cartes électroniques que nous avons assemblées ont permis de mettre en pratique les compétences acquises durant le module d'APA, récent pour certains et davantage un souvenir pour d'autres.

Partie mécanique :

La conception et réalisation de la partie mécanique de la fusée nous a permis d'apprendre sur différents domaines. D'abord, nous avons acquis de nouvelles connaissances en mécanique des fluides pour comprendre l'utilisation d'un tube de Pitot et pour s'approprier les formules données par *Planète Sciences*.

D'autre part, nous avons complété nos connaissances en structures des matériaux autant par rapport aux aspects résistance que par rapport aux aspects diffusion des efforts.

Nous avons dû également apprendre à réaliser des dessins techniques de qualité pour qu'ils puissent être lus et bien interprétés par les techniciens de mécanique pour la réalisation des pièces. Cependant, nous n'avons pas réussi à maîtriser suffisamment vite et bien le logiciel *Autocad* spécialement conçu pour le dessin technique pour pouvoir réaliser les plans à l'aide de ce logiciel.

Enfin, nous avons expérimenté l'usinage pour la réalisation de la fusée. Nous avons appris à utiliser les différents outils mis à notre disposition en toute sécurité.

II. La conception de Fuz'Mines

1. Choix de l'expérience

1.1 Des débuts à aujourd'hui

A l'amorce du projet, plusieurs alternatives s'offraient quant au choix des expériences à mener en vol. De plus, comme nous ignorions la complexité de chacune des expériences potentielles, nous avons imaginé toutes sortes de possibilités. Ainsi, nous avons songé à mesurer la pression atmosphérique durant l'ascension, la vitesse de la fusée (par le biais d'un accéléromètre ou d'un tube de Pitot), son altitude, son inclinaison, la concentration de l'air en O₂, CO₂, CH₄ et autres gaz, à mesurer le champ magnétique terrestre, et même à prendre des photos ou à filmer en altitude.

Presque toutes ces expériences ont été abandonnées, et ce pour les causes suivantes :

- Les photos et la vidéo n'ont pas été réalisées car il aurait été difficile d'acheminer l'information au sol, le flux de données étant trop important. De plus, il aurait été complexe de prendre des images intéressantes et nettes en raison de la rotation de la fusée sur elle-même. Enfin, cette expérience avait déjà été menée et nous cherchions à justifier le vol de notre fusée par le choix d'une expérience originale...
- La mesure du champ magnétique terrestre n'a pas été poursuivie car les interférences électromagnétiques inhérentes au fonctionnement de la télémétrie auraient sans doute fortement perturbées la sonde de Hall, capteur du champ magnétique. Nous n'avons pas en tous cas trouvé des réponses à ces problèmes assez rapidement.
- Quant aux concentrations des gaz, ne constituant pas un intérêt particulier vu que leur variations n'étaient pas suffisamment importantes, elles ont rapidement été laissées de côté.

Nous avons donc opté pour la mesure de la pression qui permet celle de la vitesse et de l'altitude. Il nous a ensuite paru intéressant de reconstituer la trajectoire de la fusée. Cette expérience est en effet relativement simple puisqu'elle ne nécessite pas beaucoup de capteurs. De plus, on peut simuler la trajectoire à l'aide d'un logiciel (*Trajec*). On aura donc l'occasion de vérifier nos mesures avec une référence fiable.

Cependant, reconstituer la trajectoire nécessite la connaissance, non seulement de la vitesse, mais aussi de l'inclinaison de la fusée.

Ainsi, en mesurant la vitesse avec un tube de Pitot, qui est composé de capteurs de pression, et l'inclinaison de la fusée avec des gyroscopes, nous voulions reconstituer la course de la fusée en 2 dimensions (sa reconstitution en 3 dimensions a même été envisagée mais elle ne présentait pas grand intérêt car la fusée ne dévie que très peu dans la direction orthogonale au plan d'évolution).

De surcroît, à l'origine, notre ambition était d'opérer cette reconstitution en temps réel. Mais cette idée sera vraisemblablement abandonnée et ceci malgré l'avancée du projet. En effet, le temps réel nécessite l'adaptation d'un ordinateur personnel dans le camion de réception des données, ce qui ne sera peut-être pas possible ou en tout cas déconseillé si on souhaite garder l'enregistrement des données à bord de ce camion.

1.2 Reconstitution de la trajectoire

A. MESURE DE L'INCLINAISON

La trajectoire est donnée par :

$$x(t) = v(t) * t * \cos(i(t))$$

$$y(t) = v(t) * t * \sin(i(t))$$

avec i défini plus loin (cf schéma) et v la vitesse. Notre but est de connaître i .

On suppose que la trajectoire est plane, et qu'il y a donc 4 degrés de liberté :

- l'altitude
- l'abscisse
- l'inclinaison
- la rotation propre

- Soit R_0 le repère lié à la terre, noté $R_0 = (\underline{X}, \underline{Z}, \underline{Y})$

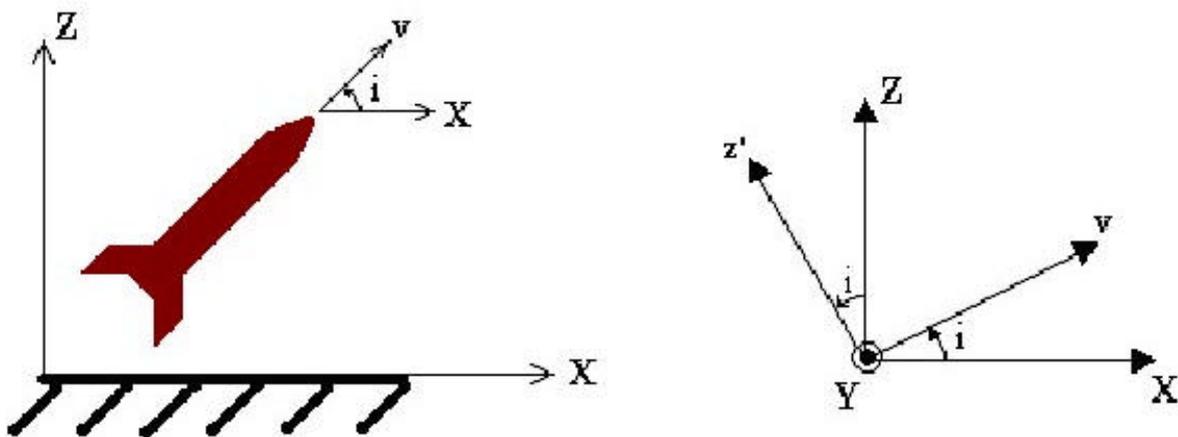
- Soit R' le repère qui s'incline avec la fusée, noté $R' = (\underline{v}, \underline{z}', \underline{Y})$.

On note i l'inclinaison, alors $i = (\underline{X}; \underline{v}) = (\underline{Z}; \underline{z}')$.

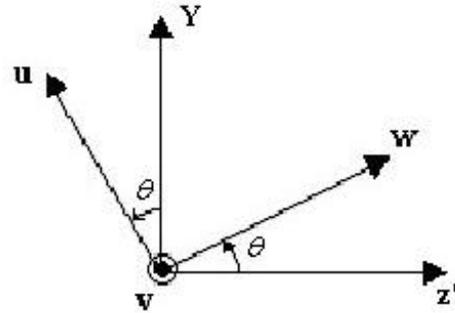
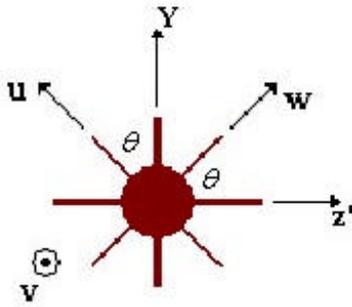
- Soit R_F le repère lié à la fusée, noté $R_F = (\underline{u}, \underline{v}, \underline{w})$.

On note q l'angle de rotation de la fusée sur elle-même, alors $q = (\underline{z}'; \underline{w}) = (\underline{Y}; \underline{u})$.

INCLINAISON DE LA FUSEE PAR RAPPORT A L'HORIZONTALE



ROTATION DE LA FUSEE SUR ELLE-MEME



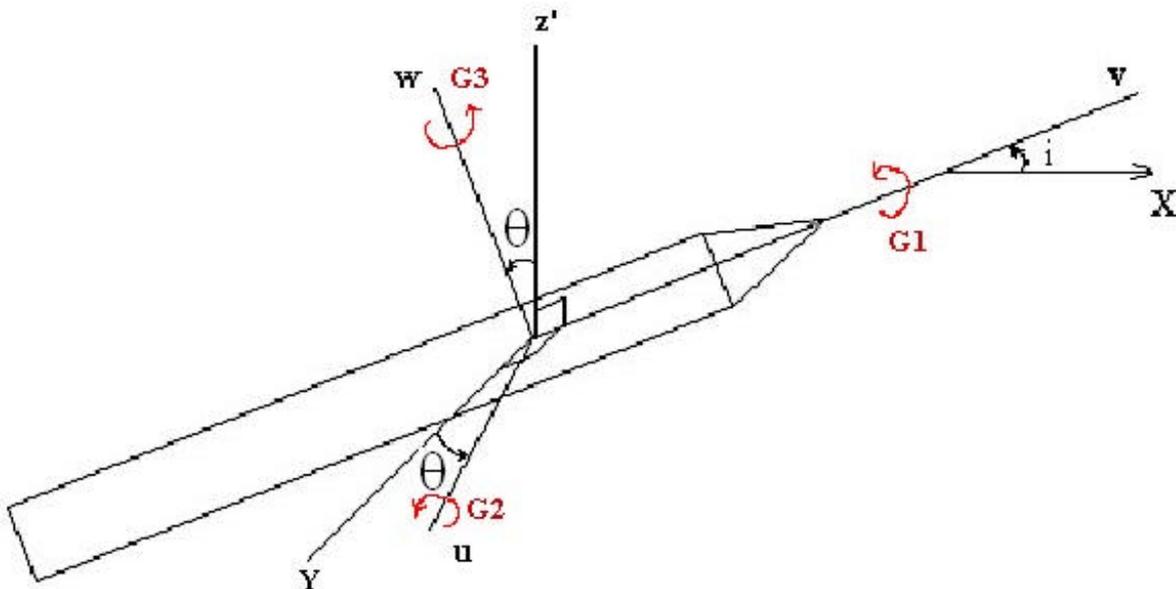
$$\underline{\Omega}(R_F / R_0) = \underline{\Omega}(R_F / R') + \underline{\Omega}(R' / R_0) = q' \underline{v} + i' \underline{Y}$$

Or $\underline{Y} = \cos(\theta) \underline{u} + \sin(\theta) \underline{w}$, donc :

$$\underline{\Omega}(R_F / R_0) = i' \cos(\theta) \underline{u} + i' \sin(\theta) \underline{w} + \theta' \underline{v}$$

Les gyroscopes ne permettent que de mesurer des rotations par rapport à des axes fixes de la fusée (\underline{u} , \underline{v} , \underline{w}), donc :

- Un premier gyroscope G1 placé autour de l'axe \underline{v} de la fusée permet d'obtenir le terme q' .
- Un second gyroscope G2 placé autour de l'axe \underline{u} de la fusée permet d'obtenir le terme $i' \cos(q)$.
- Un troisième gyroscope G3 placé autour de l'axe \underline{w} de la fusée permet d'obtenir le terme $i' \sin(q)$.



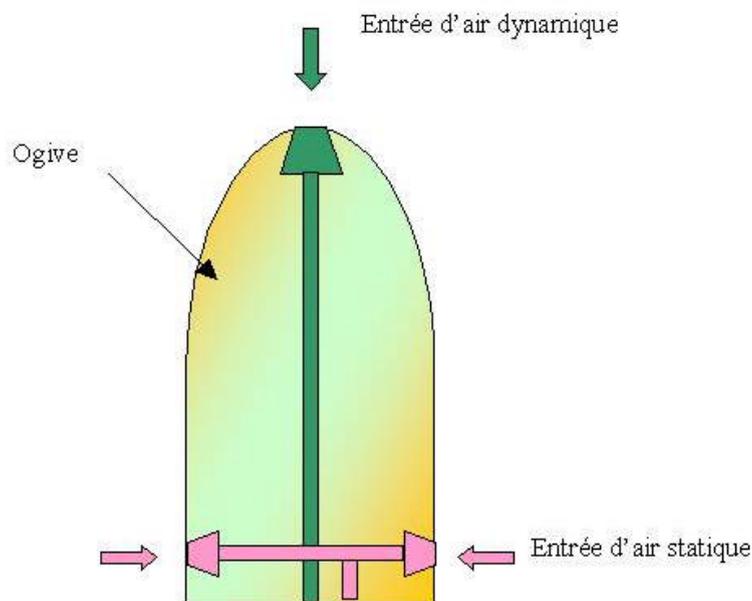
On pourrait utiliser seulement deux gyroscopes mais la précision serait moindre :

- La mesure de la rotation autour du vecteur \underline{v} est la plus évidente. Elle donne θ' , que l'on peut intégrer pour avoir θ .
- L'autre mesure est forcément plus délicate, car les 2 inconnues sont couplées (i et θ interviennent en même temps). Nous pouvons faire la mesure sur le vecteur \underline{u} ou sur le vecteur \underline{w} . Cela revient strictement au même. Le problème, c'est que si par exemple nous choisissons de faire la mesure sur \underline{u} , alors on mesure en fait $i' \cos(\theta)$, et non pas simplement i' . Nous n'avons pas de problème pour $\cos(\theta)$ assez grand, mais par contre si $\cos(\theta)$ est petit, nous perdons beaucoup en précision. Or on remarque que quand $\cos(\theta)$ est petit, c'est $\sin(\theta)$ qui est grand. Donc en faisant la mesure à la fois sur le vecteur \underline{u} et \underline{w} , nous calculerons i' en prenant la mesure la plus significative. En l'occurrence, on choisira de prendre l'une des deux valeurs dès que celle-ci devient supérieure à l'autre.

B. MESURE DE LA NORME DE LA VITESSE : UTILISATION D'UN TUBE DE PITOT

Le tube de Pitot est un système qui permet de mesurer la vitesse de la fusée en fonction de la pression d'arrêt P_a , pression au niveau du nez de la fusée, qui dépend de la vitesse de celle-ci. La pression statique P_s qui correspond à la pression ambiante à l'altitude où se trouve la fusée, est mesurée grâce à un moyeneur pneumatique, ensemble de plusieurs tubes en étoiles qui relient l'air extérieur (trous dans la peau de la fusée) au centre de la fusée où on place notre capteur).

Schéma de principe d'un tube de Pitot :



Tube de Pitot : exploitation des données

On part de l'hypothèse que l'on mesure les deux pressions indépendamment avec deux capteurs de pressions différentiels. Ces capteurs différentiels sont étalonnés en les bouchant d'un côté de manière hermétique et si possible sans échange de chaleur entre l'enceinte fermée et le milieu extérieur : cela permet d'obtenir une pression de référence $P_{\text{réf}}$ constante d'un côté du capteur.

P_a = Pression d'arrêt (au niveau du nez de la fusée)

P_s = Pression statique (pression ambiante)

$P_{\text{réf}}$ = constante = Pression de référence (côté bouché du capteur ; on suppose ici que $P_{\text{réf}}$ est le même pour les deux capteurs mais on pourrait utiliser $P_{\text{réf}1}$ et $P_{\text{réf}2}$ en cas de différence)

z = altitude à partir du niveau de la mer

ρ = masse volumique de l'air

$\gamma = 1.4$ = coeff de compressibilité de l'air (enfin je crois)

x = valeur mesurée par le capteur 1 (capteur de P_a)

y = valeur mesurée par le capteur 2 (capteur de P_s)

v = vitesse de la fusée

Les capteurs 1 et 2 mesurent : $x = P_a - P_{\text{réf}}$ et $y = P_s - P_{\text{réf}}$

On mesure $P_{\text{réf}} = P_s(l) - y(l)$ où $P_s(l)$ est la pression atmosphérique sur l'aire de lancement, mesurée avec un baromètre et $y(l)$ la valeur mesurée sur l'aire de lancement par le capteur 2.

On cherche à connaître la vitesse v de notre fusée. Celle-ci est donnée par 2 formules :

$$v = \sqrt{\frac{2(P_a - P_s)}{\rho}} \quad \text{Si } v < 80 \text{ m/s}$$

$$v = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{P_s}{\rho} \left[\left(\frac{P_a}{P_s} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad \text{Pour } 80 \text{ m/s} < v < 290 \text{ m/s}$$

On remarque également qu'il nous faut calculer la masse volumique ρ pour retrouver la vitesse de la fusée. ρ dépend de l'altitude z . Or z dépend de la pression ambiante P_s comme le montre la formule :

$$z = \frac{10^5}{2,256} \left[1 - \left(\frac{P_s(z)}{P_0} \right)^{\frac{2,256}{\gamma}} \right]$$

Où P_0 désigne la pression atmosphérique = pression statique au niveau de la mer.

P_0 dépend de la météo (plus grand si il fait beau et plus faible en cas de dépression). Comme on connaît l'altitude de l'aire de lancement $z(l)$ et la pression sur l'aire de lancement $P_s(l)$, on peut retrouver le P_0 qui correspond à la situation météo du jour :

$z(l) \simeq 100 \text{ m}$ et $P_s(l) = y(\text{départ}) + P_{\text{réf}}$

$$P_0 = P_s(l) \left[1 - \frac{2,256}{10^5} z(l) \right]^{-5,256}$$

Maintenant que l'on connaît l'altitude z en fonction de P_s , il nous faut déterminer la masse volumique ρ en fonction de z . L'ANSTJ fournit une formule simplifiée de $\rho(z)$:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{20\,000 - z}{20\,000 + z}$$

Où ρ_0 désigne la masse volumique de l'air au niveau de la mer : $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$

Cette fois-ci, on a toutes les indications nécessaires pour retrouver la vitesse de la fusée. Voici les étapes pour y parvenir :

- 1) On connaît : x à chaque instant, y à chaque instant, $P_s(l)$ grâce à un baromètre et $z(l)$.
- 2) $\text{Préf} = P_s(l) - y(l)$
- 3) $P_s = y + \text{Préf}$
- 4) $P_0 = \text{fonction} (z(l), P_s(l))$
- 5) $z = \text{fonction} (P_s, P_0)$
- 6) $\rho = \text{fonction} (\rho_0, z)$
- 7) $P_a = x + \text{Préf}$
- 8) $v = \text{fonction} (P_a, P_s, \rho)$

Les calculs plus détaillés sont disponibles en annexes.

2. L'expérience

2.1 Choix des capteurs

Capteurs de pression :

Dans un premier temps, des calculs théoriques pour déterminer la gamme de mesure de ces 2 capteurs ont été nécessaires.

Ces calculs présents en annexe ont été menés de manière à maximiser les conditions, c'est-à-dire que nous avons pris un domaine de mesure de la pression atmosphérique au sol sur le lieu de lancement (Reims) dans le cas d'une dépression et d'un anticyclone. Nous avons étudié ces chiffres à partir du site de météo France sur deux années. Ensuite, des approximations ont été faites pour donner une fourchette de mesures vis-à-vis de la vitesse de notre fusée (déterminée grâce aux statistiques présentes sur le site de *Planète Sciences*) et aussi pour le point de culmination évalué entre 1200 et 2300 m d'altitude. Ces chiffres ont pu être revus de façon plus précise grâce à la simulation sous *Trajec*.

Les calculs, issus des formules théoriques mises à notre disposition par M. SOLLIEC en négligeant les variations de masse volumique et de compressibilité de l'air, nous ont

permis d'établir les conclusions suivantes et de mettre en évidence des détails de précision pour le choix des capteurs :

**Pa : pression entre 88 742 Pa et 152 037 Pa
Soit entre 12.87 Psi et 22.05 Psi**

**Ps : pression entre 75 865 Pa et 104 432 Pa
Soit entre 11.00 Psi et 15.14 Psi**

A noter également que la pression devait être exprimée en PSI qui n'est pas une unité internationale mais qui est présente sur tous les catalogues et datasheets.

*Pour rappel : 1 PSI = 6.8948*10³Pa*

A ce stade, des recherches sur Internet ont permis de dégager une demi-douzaine de capteurs acceptables. La commande a finalement été passée chez *Radiospares* (avec qui l'Ecole travaille beaucoup) et nous a également conforté dans l'idée de choisir des capteurs de pression absolue plutôt que des capteurs différentiels pour des raisons liées aux formules de vitesse. Face à un contre-temps (rupture de stocks concernant les 2 capteurs choisis d'une gamme 0-30 psi), nous nous sommes rabattus sur 2 capteurs 142PC15A.

A la suite d'une erreur d'inattention, nous nous sommes rendus compte que l'un des deux capteurs 0-15 psi ne convenait pas à notre gamme de mesure. Nous avons donc commandé un nouveau capteur 0-30 psi (pour la pression Pa) dans la série XCA

Gyroscopes :

Dès que nous avons su qu'il fallait nous procurer 3 gyroscopes pour la trajectoire, nous avons commencé par rechercher des distributeurs pour ce type d'appareil.

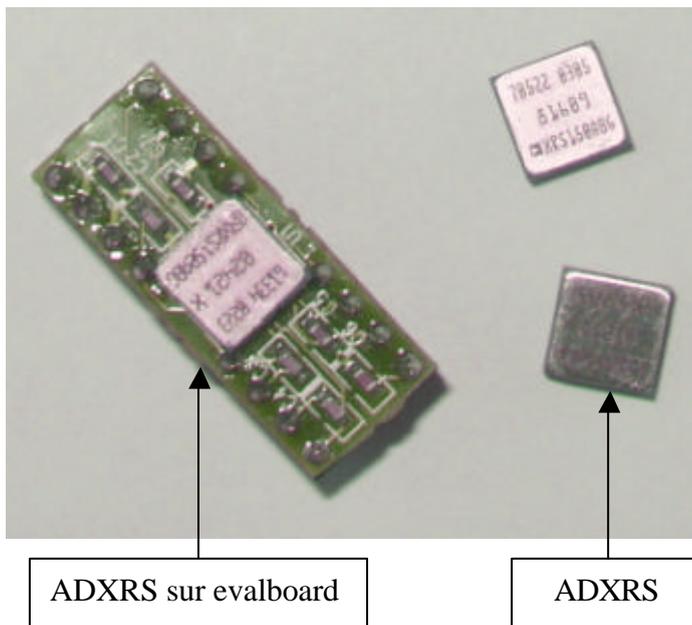
Tout est parti d'une brochure de journal où figurait un article sur une nouvelle gamme de gyroscopes créés par Analog Devices. Après avoir téléphoné aux six distributeurs des produits Analog Devices, nous n'avons que très partiellement atteint nos objectifs.

D'une part, nous ne savions pas à ce stade de projet quel budget nous aurions à notre disposition et il s'agissait essentiellement à ce niveau d'obtenir les gyroscopes par la voie d'un sponsoring ou bien à un très bas prix. Aucun des distributeurs contactés ne voulait engager de partenariat. De plus, même si le prix à l'unité d'un gyroscope n'était pas très élevé (environ 50 euros), aucun de ces contacts n'était disposé à nous vendre un appareil à l'unité mais seulement par lot de cinq minimum.

Cependant, nous avons acquis des connaissances très importantes et même indispensables. Cette recherche a attiré notre attention sur plusieurs critères que les gyroscopes devaient vérifier : ils devaient être résistants à une forte accélération, résistants aux vibrations (critère qui éliminait de nombreux gyroscopes utilisant des liquides), et surtout devaient avoir des gammes de mesure sur lesquelles nous avons dû nous pencher. En effet, il nous a été difficile de comprendre selon quel référentiel les gyroscopes allaient effectuer leurs mesures de vitesse angulaire, d'autant plus que ce sujet a même été débattu par des membres de *Planète Sciences*. Nous avons conclu qu'il fallait utiliser (cf. partie reconstitution de la trajectoire) un gyroscope avec une grande gamme de mesure (environ 1000°/s) puisque la fusée risquait d'effectuer près de 3 tours par seconde sur elle-même, et deux autres avec une gamme de mesure plus restreinte.

Bref, nous savions désormais quel type d'appareil nous procurer mais nous ne savions pas où. Nous avons donc appelé directement chez le fabricant Analog Devices à Paris. Là, un contact par mail nous a été donné, en l'occurrence M. POIDEVIN. Nous lui avons donc

envoyé un mail qui s'est révélé décisif par la suite et qui exposait notre motivation à acquérir un gyroscope par le biais d'un sponsoring. Il nous a vite répondu en confirmant que sa société serait prête à nous fournir des échantillons de gyroscopes via un partenariat avec le club Fuz'Mines (consistant à mettre le logo d'Analog Devices sur notre site Web et sur la fusée). Par téléphone, nous avons porté notre choix sur un ADXRS300 qui offre une gamme dynamique de 300°/s et deux ADXRS150 qui offrent une gamme de 150°/s. Un récent procédé de micro-usinage rend ces appareils très petits et très peu nécessitent en énergie (5 mA sous 5V). De plus, la gamme ADXRS offre un signal de sortie stable même en présence de bruit mécanique et ce en allant jusqu'à 2000g d'accélération. Enfin, il a été possible d'ajouter une résistance externe au circuit de l'appareil afin d'augmenter sa gamme de mesure (surtout utile pour le gyroscope mesurant la rotation de la fusée sur elle-même). Tous ces critères rendent ces gyroscopes complètement adaptés l'utilisation que nous en avons faite.



En Mai, nous avons reçu un ADXRS150 monté sur evalboard, un ADXRS300 et deux ADXRS150. Une evalboard est un support qui permet de souder le gyroscope sur une carte électronique et qui permet de tester le capteur. En effet, ces capteurs de vitesse angulaire sont des composants à billes qui ne se soudent pas directement sur une carte électronique et donc inutilisable pour nous. Or, le seul échantillon sur evalboard qu'Analog Devices avait à disposition était entre nos mains. Nous avons donc dû nous résoudre à acheter un ADXRS150 et un ADXRS300 sur evalboard (66 euros l'un) à un

distributeur que nous a donné M. POIDEVIN.

2.2 Choix numérique/analogique

Pour la réalisation de l'électronique embarquée à bord d'une fusée expérimentale, deux modes de traitement des données à la sortie des capteurs sont possibles : une chaîne entièrement analogique ou bien une chaîne numérique.

Les chaînes analogiques sont beaucoup plus simples à mettre en place puisqu'il suffit de répliquer sous forme électrique la variation continue de paramètres physiques. Lorsque l'on souhaite transmettre simultanément plusieurs de ces paramètres, un multiplexage est nécessaire. Une des solutions possibles en analogique consiste à associer à chacun d'eux une tension sinusoïdale dont la fréquence est fonction du paramètre mesuré. Ces tensions sont alors additionnées et transmises sur le même support.

Dans un procédé de transmission numérique, les informations ne sont plus associées à des tensions variables et continues, mais à des tensions que l'on échantillonne à intervalles de temps définis, et auxquelles on fait correspondre des nombres binaires caractéristiques. Ces nombres (suites de 0 ou de 1) sont alors représentés par des suites de deux états de tensions.

L'intérêt des transmissions numériques ne repose pas essentiellement sur leurs caractéristiques électriques. En effet, leur mise en oeuvre est souvent plus complexe que pour

les transmissions analogiques. En revanche, elles offrent de grandes possibilités de standardisation des transmissions et de traitements directs par ordinateurs. Tous les paramètres mesurés sont codés sur un modèle identique. Quand il s'agit de transmettre plusieurs paramètres simultanément, on opte pour une sérialisation des données : on transmet un bout d'un premier paramètre, un bout d'un second etc., puis on transmet la suite du premier paramètre et ainsi de suite¹.

Nous avons donc choisi d'intégrer une chaîne numérique permettant de gérer une exploitation initialement prévue en temps réel et présentant en plus les avantages précédemment évoqués.

2.3 Choix des conditionneurs de signaux

Le choix des conditionneurs de signaux recouvre trois éléments essentiels : les filtres, les amplificateurs et les offsets. Ces trois éléments sont placés à la sortie des capteurs et avant le convertisseur analogique/numérique, et servent à faire en sorte que les signaux qui sortent des capteurs soient adaptés au convertisseur.

Concernant le projet Fuz'Mines, le choix des conditionneurs a été relativement simple. En effet, les signaux émis par les capteurs sont d'ores et déjà amplifiés et ont une gamme de signal de sortie entre 0 et 5V, ce qui correspond parfaitement aux contraintes du PIC, qui a joué le rôle de notre convertisseur. Nous n'avons donc pas conçu de système d'offset ni d'étage d'amplification. En revanche, nous avons installé des filtres à la sortie des capteurs de façon à diminuer sensiblement le bruit dû à leur fonctionnement, et donc diminuer les perturbations du signal émis.

Pour les détails du choix des filtres, nous avons procédé comme suit : les signaux sont tous quasiment apériodiques ; nous n'avons donc presque aucune contrainte pour le choix de la fréquence de coupure (f_c). Son choix a donc été déterminé par la fréquence d'échantillonnage du PIC (cf. Théorème de Shannon). L'émission se fait à 4800 bauds, soit 4800 bits/seconde et on a cinq capteurs, chacun codé sur deux octets. On peut donc envoyer 300 octets par seconde

2.4 Systèmes d'alimentation

L'alimentation de l'ensemble des cartes embarquées dans la fusée se fait grâce à deux blocs de piles séparés :

- deux jeux de blocs de piles 2CR5 de 6V chacun, soit 12V au total pour l'alimentation de l'émetteur seul ;
- une alimentation strictement identique (12V) pour alimenter toutes les autres cartes.

Nous avons fait ce choix pour plusieurs raisons : tout d'abord, le cahier des charges impose une alimentation de l'émetteur séparée du reste de l'électronique pour éviter des perturbations éventuelles qui pourraient se propager par les fils d'alimentation ; par ailleurs, nous avons choisi ce type de piles pour leur propension à disposer d'une longue autonomie et d'une grande stabilité malgré des appels de courant importants. Néanmoins, les différents sous-ensembles présents dans la fusée sont alimentés en 8V ou 5V. C'est pourquoi nous avons placé sur la carte PIC deux régulateurs délivrant ces tensions régulées et permettant d'alimenter l'ensemble des composants qui le nécessitent.

¹ Ces explications sont basées sur la publication « Télémessure numérique » disponible sur le site web de *Planète Sciences* : <http://www.planete-sciences.org/espace>

2.5 Conception et réalisation des cartes électroniques

Nous avons commencé à nous intéresser au routage de nos cartes électroniques fin mars début mai. Dès lors, nous avons décidé de nommer une personne responsable de ce domaine de façon à centraliser l'ensemble des connaissances requises et pour éviter la dispersion et le manque de temps.

Après en avoir discuté avec Richard DALLIER, nous avons choisi d'utiliser le logiciel *Eagle* pour réaliser des schémas de circuits « propres » et directement exploitables. Le responsable du routage a donc été amené à se familiariser à l'interface de ce logiciel.

Début mai, nous avons rencontré Eric MORTEAU, technicien en électronique, qui semblait être la personne la mieux appropriée à l'Ecole pour nous aider à ce sujet. Nous avons négocié avec lui la réalisation de nos cartes à condition de lui fournir le schéma électronique et le dessin du routage de chaque plaque sous *Eagle*. Nous n'avions initialement aucune connaissance dans ce domaine (nous ne connaissions même pas le terme de routage au départ...) et il s'est avéré relativement difficile d'apprendre à maîtriser ce logiciel sans manuel. Cette étape d'appropriation du logiciel a pu être menée à bien grâce à plusieurs conseils données sur divers sites Web mais aussi grâce aux conseils d'Eric MORTEAU. Outre la méconnaissance complète de ce logiciel et les nombreux problèmes rencontrés (réalisation du routage, disposition des pistes de connexion en fonction du schéma principe et des impératifs de la mécanique, compréhension très précise de toute la chaîne, etc...), une difficulté récurrente a été de trouver le nom du composant physique dans la bibliothèque *Eagle* ou à défaut de le créer quand il n'existait pas (cas des capteurs). Cependant, après quelques semaines d'apprentissage, le responsable « circuits » a réussi à utiliser le logiciel *Eagle* de façon très efficace et professionnelle.

Au bout d'un mois, nous avons réalisé les schémas de principe et le routage des cartes du FSK, des 3 gyroscopes, des 2 capteurs de pression, de la carte de visualisation et enfin 4 cartes relais. La carte PIC a été réalisée par Eric MORTEAU du fait de la complexité du routage. Toutes les cartes composant la chaîne ont dû être réalisées en étroite collaboration avec l'équipe mécanique pour tenir compte de toutes les contraintes d'intégration (restriction sur les dimensions des cartes, création des nombreuses cartes relais facilitant l'intégration, etc.). Nous allons maintenant décrire sommairement la conception de chaque carte.

a) Généralité sur toutes les cartes

Il peut être utile de se référer au schéma général d'interconnexion. En effet, les cartes sont toutes dépendantes entre elles par le biais de nappes (que nous avons préféré aux fils pour limiter les perturbations électromagnétiques). Ainsi, chaque carte est équipée d'un connecteur, dans la plupart des cas arrangés selon un même schéma, la ligne paire des plots du connecteur étant reliée à la masse et la ligne impaire possédant des plots utilisés pour faire passer les alimentations et les signaux des capteurs.

Voici une correspondance entre le nom des ports les plus utilisés et leurs fonctions :

- +8V ou +5V : port d'entrée de l'alimentation respectivement de 8V ou de 5V.
- AN : port analogique. C'est par-là que passe le signal de sortie de tous les capteurs.

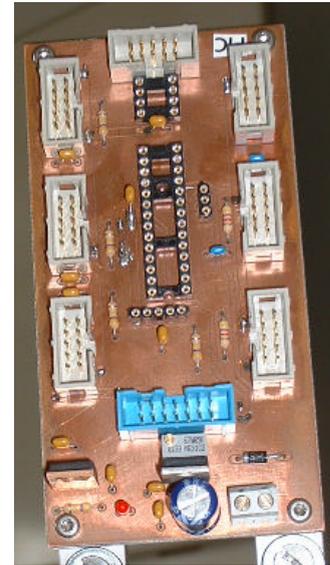
D'autre part, il convient de préciser qu'un condensateur de découplage est présent sur chaque carte en parallèle avec la piste d'alimentation. Elle n'est pas présente sur les schémas des circuits car elle a été soudée par la suite directement sur la plaque.

Enfin, chaque carte dispose d'un plan de masse. Cela signifie que l'on utilise une plaque de cuivre qui fait office de masse commune et que toutes les pistes sont gravées en démarcation de ce plan de masse.

Carte PIC

Comme nous l'avons dit, c'est Eric MORTEAU qui a réalisé le routage de cette carte mais c'est bien nous qui avons spécifié tout ce que nous voulions : le nombre de connecteurs de sortie et la façon dont ils étaient liés au PIC (selon leurs rôles). Nous avons dû nous y référer sans cesse pour connaître les ports appropriés (entrée des signaux capteurs, sortie des régulateurs, etc...).

Au-delà de la réalisation même de la carte, elle a été très utile par la suite puisqu'elle a été réalisée en premier. Elle a ainsi permis au responsable « circuits » de l'équipe de servir de modèle et donc d'acquérir à partir de celle-ci de nombreuses connaissances concernant la méthode à adopter pour router.



Cartes gyroscopes

Malgré leurs similarités, les cartes gyroscopes se révèlent toutes différentes. Comme il a été précisé, il existe deux ADXRS150 et un ADXRS300 (à sensibilité respective de 150 °/s et de 300°/s). Ces composants n'étaient bien sûr pas présents dans la bibliothèque des composants *Eagle* mais il a été simple de les remplacer par un composant qui avait des dimensions et plots identiques aux evalboard.

Tous les circuits des gyroscopes disposent d'un filtre. La fréquence de coupure de ce filtre est de $\frac{1}{2 \cdot R_{out} \cdot C_{out}}$. Par défaut, R_{out} est fixe, il suffit donc seulement de déterminer la valeur de C_{out} . Je rappelle que nous avons décidé de couper à 20 Hz.

Pour l'ADXRS300, nous avons augmenté sa gamme de mesure jusqu'à 1200 °/s en y ajoutant une résistance externe R_{ext} de 59kO (déterminée en étudiant la datasheet). Le calcul de la valeur de C_{out} a donc été modifié puisque la résistance de filtrage était désormais de $R_{eq} = \frac{R_{eq} \cdot R_{out}}{R_{eq} + R_{out}}$.

Carte gyro 1 (ADXRS150)

Cette carte est la plus simple des trois. Comme nous n'avons pas besoin d'augmenter sa gamme de mesure, elle ne dispose pas de résistance externe.

Carte gyro 2 (ADXRS150 + servomoteur)

Elle dispose de connecteurs supplémentaires pour plusieurs raisons.

D'une part, nous avons utilisé le port logique RB1 du connecteur du gyroscope pour faire passer le signal du servomoteur (correspondant à l'ouverture du parachute) afin de faciliter l'intégration. De plus, la nappe 3 plots du servomoteur part du connecteur 10 plots présent sur cette carte.



D'autre part, le second connecteur fait partie du processus de simulation de la fusée. Ce processus est finalisé sur la carte visu où un interrupteur guide le signal de l'ouverture du parachute venant du PIC soit vers une led (mode simulation) soit vers le servomoteur (mode vol).

Carte gyro 3 (ADXRS300)

Comme nous l'avons précisé dans la partie dédiée au choix des capteurs, ce gyroscope dispose d'un moyen facile d'augmenter sa gamme de mesure en ajoutant une résistance aux bornes des plots 3 (SUMJ) et 2 (RATEOUT) de l'evalboard d'où la présence d'une résistance extérieure R_{ext} .

Cartes pressions

Nous disposons donc de deux capteurs de pression : l'un mesurant la pression d'arrêt P_a et l'autre la pression statique (P_s).

La grande difficulté de cette carte est qu'il a fallu créer les 2 composants dans la bibliothèque *Eagle*. Cette tâche a été très difficile car il n'a pas été aisé de savoir comment procéder. L'apprentissage nous été dispensé par plusieurs pages Web. Il s'agissait d'abord de créer le schéma «dessin » puis le schéma «physique » (en utilisant les dimensions données sur datasheet) pour enfin faire la correspondance entre les plots du dessin et ceux physiques selon leurs fonctions (sortie signal ou alimentation ou masse etc...).

Ensuite, il s'agit simplement d'un filtre RC passe-bas avec un potentiomètre permettant d'étalonner le capteur par la suite.

Carte FSK

Ce circuit a été défini lors du week-end « apprentissage à la télémétrie » proposé par *Planète Sciences*. Il est constitué seulement du XR2206 (présent dans la bibliothèque *Eagle*) et de composants nécessaires à son fonctionnement. Les valeurs de la plupart des composants nous avaient été également expliquées lors de ce week-end. Nous avons étudié la datasheet du XR2206 pour connaître le rôle de la capacité C1 et des résistances R1 et R2. Il s'avère qu'ils sont liés à la valeur des fréquences qui vont coder nos bits d'information. Nos bits de fréquence



sont f_1 (9kHz) et f_2 (15kHz) et sont donnés par la relation : $f_1 = \frac{1}{R_1.C}$ et $f_2 = \frac{1}{R_2.C}$.

Nous avons également eu des difficultés à connaître par quel type de port rentrait le signal provenant du FSK sur l'émetteur étant donné que nous ne disposons pas encore de ce dernier. Nous avons longtemps prévu une prise jack mais il s'agit en fait du plot 10 d'un connecteur de type 14 plots.

Cartes Relais

C'est courant mai que l'équipe mécanique nous a imposé la création de ces cartes pour des impératifs d'intégration. En effet, celle-ci nécessitait des relais à chaque fois qu'une nappe était destinée à « franchir » une longueur supérieure à celle du mât où elle était fixée. Ainsi, les cartes ne sont pas difficiles à visualiser (une piste relie le plot n°1 d'un connecteur à son homologue sur le second connecteur, etc...) mais difficile à réaliser physiquement. En effet, même en posant le problème sur papier, il est impossible de relier les mêmes plots de deux connecteurs sur une même face sans croiser des pistes. Il a fallu réaliser cette connexion en soudant des fils au fer sur la carte finie.

Cette situation se rencontrait pour la carte émetteur dont l'alimentation devait être contrôlée par un interrupteur sur la carte visu. Comme nous tenions à utiliser seulement des nappes (au détriment des fils), il a fallu router une première carte relais « piles-emmetteur » liant l'alimentation venant du fil provenant de la pile à un fil de la nappe. Celle-ci passait par une première carte "relais 1" puis par une seconde "relais 2" pour enfin aller sur la carte visu.

Une dernière carte relais fait la connexion entre les 3 cartes gyroscopes et la carte PIC et rassemble donc 6 connecteurs.

Carte visualisation



Elle a été sans conteste la plus difficile à réaliser du point de vue de la conception du schéma de principe. Concernant le routage proprement dit, il était certes compliqué mais il a été facilité par le fait que cette carte a été la dernière à être réalisée et nous maîtrisons à ce moment davantage le logiciel *Eagle*.

Après de nombreuses réflexions, il a été décidé de faire apparaître 4 fonctions de la fusée sur la carte visu.

➤ Programmation du PIC :

Un port permettant de modifier le code du PIC en branchant le PC sur la carte visu et non sur la carte PIC déjà fixée dans la fusée est présent. Ainsi, nous pouvons faire des modifications sur le code du PIC même la fusée assemblée (il s'agissait là d'une requête formulée par notre tuteur de *Planète Sciences*).

➤ Mode simulation :

Nous avons placé un interrupteur permettant de transmettre le signal d'ouverture du parachute soit vers le servomoteur même (mode vol) et donc ordonner l'ouverture de la porte parachute soit vers une led qui simule l'ouverture de la porte quand elle s'allume.

➤ Alimentation émetteur :

La pile de l'émetteur alimenté en 12V passe par un fil qui joint la carte visu via des relais. Une fois sur cette carte, un interrupteur dirige ce courant soit vers l'émetteur auquel cas elle alimente l'émetteur soit vers la led auquel cas celle-ci s'allume indiquant que l'émetteur n'est pas alimenté. Cependant, ce processus ne remplissait que partiellement ses objectifs puisqu'il s'agissait également de ne pas user la pile. Pour parvenir à nos fins, nous avons ajouté un interrupteur à ce mécanisme permettant d'éteindre la led après s'être assuré qu'elle témoignait de l'alimentation ou non de l'émetteur.

➤ Alimentation PIC + support prise jack:

Le dispositif de la carte visu associé au PIC est le plus compliqué. La dernière visite de notre tuteur de *Planète Sciences* a révélé qu'il fallait prévoir un bornier sur la carte visu nous permettant d'alimenter l'électronique de façon externe. C'est notamment ce qui a partiellement complexifié ce mécanisme. Nous avons inséré un interrupteur 3 positions (S1 sur le schéma) pour pouvoir soit alimenter le PIC, soit ne rien faire ou soit permettre l'alimentation du PIC par une pile extérieure. Un second interrupteur permet comme dans le cas précédent d'éviter que la pile alimentant le PIC ne se décharge dans la pile.

Enfin, une troisième led vérifie que la prise jack (qui s'arrachera au décollage) est bien connectée. En effet, il est indispensable de le vérifier puisque si ce n'est pas le cas, la minuterie se met en route pour déclencher le parachute.

Bien sûr, il ne fallait pas oublier de souder les composants que nous voulions apparents sur la carte visu «à l'envers».

Le routage de toutes les cartes terminé, Eric MORTEAU a eu l'amabilité de les réaliser. Il convient par ailleurs de le remercier puisqu'il a grandement contribué à la conception des cartes et nous a accordé beaucoup de temps pour cela.

Pour conclure sur cette partie, il faut ajouter que cette phase de conception nous apporté beaucoup de connaissances puisque nous partions de zéro dans ce domaine.

De plus, la conception des cartes a généré beaucoup de questions puisqu'il a fallu comprendre le fonctionnement de chaque composant de la chaîne pour mettre en œuvre la réalisation des cartes. Cette étape a finalisé en quelque sorte le travail de l'équipe électronique (avant de réaliser les tests). C'était la première fois pour cette équipe que nous touchions du concret après toute la théorie que nécessite la conception des circuits électroniques. Cette étape a de plus nécessité une grande coopération avec l'équipe mécanique pour les impératifs de place et d'organisation dans la fusée.

2.6 Choix de la trame d'émission

Le choix de la structure de la transmission a dû être fait assez tôt par rapport à notre avancement (vers la mi-avril) étant donné que nous ne faisons pas le traitement informatique au sol et que la personne implémentant le programme sous Labview nous réclamait cette fameuse trame.

Dans un premier temps nous avons codé les informations sur 8 bits de données avec un bit de start et un bit de stop. Un bit de parité pour contrôler la validité des informations a été envisagé. Egalement un octet permettant de visualiser l'état de la porte parachute est inclus dans cette première version :

FF	Pression1	Pression2	Gyro1	Gyro2	Gyro3	Para	FF
----	-----------	-----------	-------	-------	-------	------	----

Notons que « FF » (= 255) est un mot de synchronisation imposé par *Planète Sciences* donc chaque valeur est ensuite codée de 0 à 254.

Chaque mot se subdivise de la manière suivante :

Bit de start (0)	8 bits de données	Bit de stop (1)
--------------------	-------------------	-------------------

Cette première vision de la trame a dû être revue durant la programmation du PIC. Ainsi un mot pour la porte parachute nous a semblé inutile, surtout que dans notre programme la porte parachute se déclenche automatiquement en sortant de la boucle lorsque la fusée arrive à culmination. Nous n'avions pas de minuterie à décrémenteur où il aurait pu être pertinent de la visualiser durant le vol.

Ensuite pour une meilleure précision dans les mesures récupérées au sol en vue de faire des calculs concernant la trajectoire, il nous a semblé utile d'avoir la meilleure précision possible. Soit le codage s'effectuait en 10 bits complets de données (impossible en plus puisque le PIC ne peut travailler en plus de 10 bits), soit il fallait différencier la taille des mots (par exemple 8 bits pour les pressions et 10 pour les gyroscopes), soit il fallait coder une valeur sur 2 octet de 8 bits. Les deux premières solutions se sont révélées impossibles du point de vue de la démodulation au sol par *Planète Sciences*.

D'où la trame finale (protocole SNR) :

FF	Press1	Press1	Press2	Press2	Gyro1	Gyro1	Gyro2	Gyro2	Gyro3	Gyro3	FF
----	--------	--------	--------	--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	----

Donc le 1^{er} mot code les 8 bits de poids fort et le 2^{ème} donne les 2 bits de poids faibles restants et comble avec 6 zéros.

2.7 Choix du convertisseur analogique/numérique

Partant de compétences quasi nulle en PIC, notre démarche a donc commencé par de la documentation pour se fixer sur le choix du modèle. Après consultation de MM. CANU et MORTEAU, nous avons appris, en se limitant aux modèles disponibles à l'Ecole, que tout dépendait de nos contraintes de transmission. Ainsi, si nous voulions faire les calculs à bord, nous devions choisir la série 18FXXX. Programmer en C avec un adaptateur (nous maîtrisons mieux ce langage que l'assembleur) nous a effleuré l'esprit pendant quelques jours. Mais le temps nous pressant, nous nous sommes donnés comme hypothèse que les calculs de trajectoire seraient faits ensuite, une fois les données recueillies au sol ; en revanche un problème de vitesse de transmission nous a imposé un PIC de la série 16F87X.

Nous avons finalement pris le 16F876 qui possède une fréquence de 20MHz, peut coder sur 10 bits et présente assez de voies analogiques et logiques pour répondre à notre demande.

2.8 Logiciel de traitement des données : Labview

Labview est le logiciel à l'aide duquel la trajectoire sera reconstituée. Il recueille les informations depuis l'un des ports parallèles du PC d'exploitation.

On trouvera par la suite les différentes formules, puis les « algorithmes » permettant la reconstruction de la trajectoire par le logiciel.

1- Formules générales

Soit $A(t)$ l'avancement suivant l'axe des abscisses au temps t par rapport au temps $t-1$;

Soit $B(t)$ l'avancement suivant l'axe des ordonnées au temps t par rapport au temps $t-1$.

Il va donc s'agir de tracer une courbe paramétrée, de paramètre t , dans un plan (O,X,Z) .

Chacune des étapes de calcul qui suivent sont à réitérer pour tous les temps t , suivant un pas d'itération p de 20 ms.

On a :

$$A(t) = v(t) p \cos i(t)$$

$$B(t) = v(t) p \sin i(t)$$

1- 1- Calcul de $v(t)$

Si $v(t) < 80 \text{ m/s}$:

$$v(t) = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(t)}}$$

avec P_1 la pression d'arrêt au nez de la fusée, P_2 la pression statique (pression atmosphérique) et $\rho(t)$ la masse volumique au temps t

Si $80 \text{ m/s} < v(t) < 290 \text{ m/s}$:

$$v(t) = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_2}{\rho(t)} \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]}$$

avec $\gamma = 1,4$: coefficient de compressibilité de l'air

1- 2- Calcul de $r(t)$:

$$r(t) = r_0 \frac{20000 - z(t)}{20000 + z(t)}$$

avec $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$ et $z(t)$ l'altitude de la fusée au temps t .

1- 3- Calcul de $z(t)$

$$z(t) = \frac{10^5}{2,256} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{1}{5,256}} \right]$$

$$p_0 = p_{sol} \left[1 - \frac{2,25}{10} z(\text{sissonnes}) \right]^{-5,256}$$

avec $z(\text{Sissonnes}) = 100 \text{ m}$

2- Algorithmes

2- 1- Algorithme de calcul de la vitesse au temps t : $v(t)$

A faire une seule fois :

- relever P_{sol} avec un baromètre le jour J sur le pas de tir
- en déduire la valeur de P_0 à l'aide de la formule (7)

A faire à chaque temps t :

- calculer $z(t)$ à l'aide de la formule (6)
- calculer $\rho(t)$ à l'aide de la formule (5)
- tester si $v(t) < 80 \text{ m/s}$ à l'aide de la formule (3)
- si test vrai, calculer $v(t)$ à l'aide de la formule (3)
- si test faux, calculer $v(t)$ à l'aide de la formule (4)

2- 2- Algorithme de calcul de l'angle i au temps t : $i(t)$

- faire le zéro de l'angle θ initial, noté $\theta_{ini} = \theta_0$, selon le positionnement de la fusée en rampe
- au temps t :
 - après avoir acquis les valeurs successives de θ' , que l'on peut appeler θ'_i , avec $G1$,
 - on en déduit la valeur θ_t de la manière suivante :

$$\theta_t = \theta_0 + p \sum_{i=1}^t \theta'_i$$

- calculer numériquement $\text{Cos}(\theta_t)$ et $\text{Sin}(\theta_t)$ (*)

- comparer leur valeur et retenir la plus grande des 2
- acquérir les valeurs données par G2 et G3, i. e. respectivement les valeurs de $i' \cos(\theta_t)$ et $i' \sin(\theta_t)$
- Si lors de l'étape (*), c'est $\cos(\theta_t)$ qui a été choisi, diviser la valeur de $i' \cos(\theta_t)$ donnée par G2 par la valeur de $\cos(\theta_t)$ pour avoir finalement la valeur de i' ; Si lors de l'étape (*), c'est $\sin(\theta_t)$ qui a été choisi, diviser la valeur de $i' \sin(\theta_t)$ donnée par G3 par la valeur de $\sin(\theta_t)$ pour avoir finalement la valeur de i'
- Pour trouver $i(t)$, on opère de la même manière que pour θ_t , i.e. :

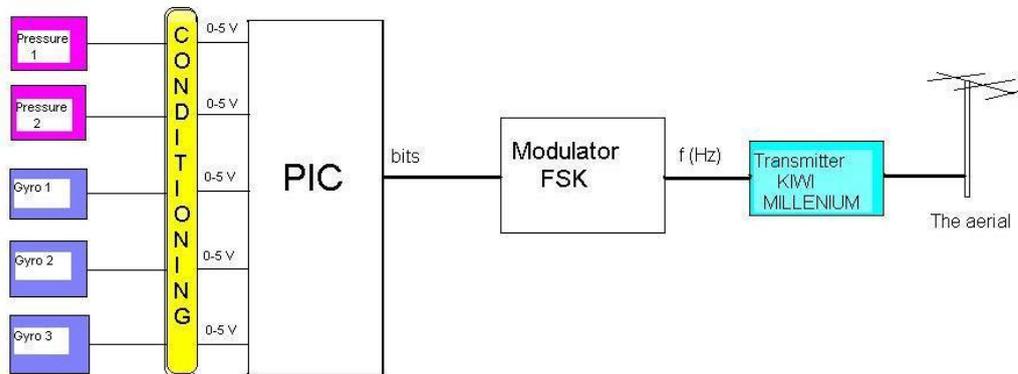
$$I(t) = i(0) + p \int_{u=1}^t i'(u)$$

- répéter ce procédé pour tous les temps t

2- 3- Algorithme de reconstitution de la trajectoire

- à chaque temps t :
 - calculer la vitesse $v(t)$ grâce au 1^{er} algorithme donné ci-dessus
 - calculer l'angle $i(t)$ grâce au 2nd algorithme donné ci-dessus
 - calculer $\cos[i(t)]$ et $\sin [i(t)]$ numériquement
 - multiplier $v(t)$ par p et par $\cos[i(t)]$ selon la formule (1) donnée sur la première page de ce document pour avoir à l'issue de ce calcul la valeur de $A(t)$
 - multiplier $v(t)$ par p et par $\sin [i(t)]$ selon la formule (2) donnée sur la première page de ce document pour avoir à l'issue de ce calcul la valeur de $B(t)$
 - afficher sur l'écran le point de coordonnées $(A(t) ; B(t))$ dans le plan (O,X,Z) et tracer le segment joignant ce point au point correspondant au temps $t-1$

2.9 Schéma électronique général



Dans la fusée

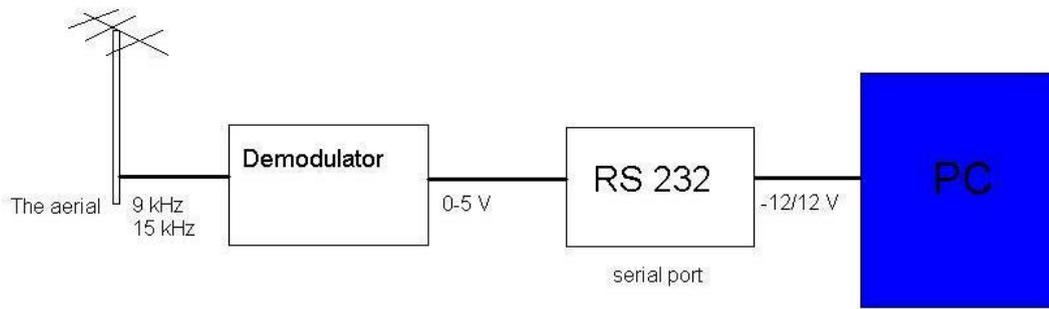
Une fois la télémessure numérique décidée, il nous a fallu mettre en place la chaîne électronique adéquate correspondante à ce type de transmission.

Nous disposons donc de 5 capteurs (3 gyroscopes et 2 capteurs de pression) qui délivrent un signal analogique sous la forme d'une tension comprise entre 0 et 4V DC par exemple.

Après les étapes de conditionnement du signal, le PIC prend le relais. Il a pour fonction de faire la conversion analogique-numérique et d'organiser la trame en accord avec ce que nous avons défini préalablement (cf paragraphe correspondant). Le PIC envoie finalement ces données numérisées au modulateur FSK sous la forme de trames bien définies.

Le rôle du modulateur est de coder ces séries de 0 et de 1 en fréquences pour être transmises de manière hertzienne. Ainsi 0 est défini par 9000 Hz et 1 par 15 000 Hz.

Enfin l'émetteur prêté par *Planète Sciences* muni de son antenne permet la transmission de données durant le vol.



Au sol, dans le camion de Planète Sciences

Pour le traitement du signal au sol, on réalise le protocole inverse : ainsi grâce à une antenne et à un démodulateur présents dans le camion de *Planète Sciences* sur le site de lancement, on récupère des bits de fréquence que l'on convertit en bits de tension et que l'on adapte (en -12/+12V) pour l'injecter sur le port série d'un PC. Par la suite, dans notre cas, un logiciel implémenté sous Labview permet d'aller chercher les données sur ce port série et de retracer la trajectoire avec les calculs sous un environnement graphique.

2.10 Calculs d'incertitudes

Calculs :

L'expression de l'abscisse A à l'instant t est la suivante :

$$A(t) = v(t).p.\cos(i(t))$$

Donc :

$$dA = \frac{\partial A}{\partial v}dv + \frac{\partial A}{\partial p}dp + \frac{\partial A}{\partial \cos i}d\cos i = \frac{\partial A}{\partial v}dv + \frac{\partial A}{\partial \cos i}d\cos i, \text{ car } dp = 0.$$

$$dA = p(\cos(i(t))dv + v(t)d(\cos(i(t))))$$

d'où :

$$\Delta A = p(\cos i(t)\Delta v + v(t)\Delta(\cos i(t)))$$

Calcul de dv :

Nous ne ferons de calcul d'incertitudes que pour $v < 80 \text{ m.s}^{-1}$. La vitesse a en effet une expression différente passé ce seuil. Cela donnera déjà une bonne idée de l'ampleur des erreurs des résultats.

pour $v < 80 \text{ m.s}^{-1}$:

$$v(t) = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{r(t)}}$$

donc :

$$dv = \frac{\partial v}{\partial p_1} dp_1 + \frac{\partial v}{\partial p_2} dp_2 + \frac{\partial v}{\partial r} dr$$

$$\frac{\partial v}{\partial p_1} = \sqrt{\frac{2}{r(t)}} \frac{1}{2} (p_1 - p_2)^{-1/2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial p_2} = \sqrt{\frac{2}{r(t)}} \left(\frac{-1}{2}\right) (p_1 - p_2)^{-1/2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial r} = \sqrt{2(p_1 - p_2)} \left(\frac{-1}{2}\right) r(t)^{-1/2}$$

donc :

$$dv = \frac{-1}{2} \sqrt{2(p_1 - p_2)} r(t)^{-3/2} dr + \sqrt{\frac{2}{r(t)}} \frac{1}{2} (p_1 - p_2)^{-1/2} dp_1 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{r(t)}} (p_1 - p_2)^{-1/2} dp_2$$

Calcul de dr :

On sait que :

$$r(t) = \frac{20000 - z(t)}{20000 + z(t)} r_0$$

or,

$$dr = \frac{\partial r}{\partial z} dz$$

donc :

$$dr = r_0 \frac{-(20000 + z(t)) - (20000 - z(t))}{(20000 + z(t))^2}$$

$$dr = -r_0 \frac{40000}{(20000 + z(t))^2} dz$$

Calcul de dz :

On sait que :

$$z(t) = \frac{10}{2,256} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{1/5,256}\right)$$

or,

$$dz = \frac{\partial z}{\partial p_2} dp_2$$

donc :

$$dz = -\frac{10^5}{2,256 \cdot 5,256 \cdot p_0} p_2^{\frac{1}{5,256}-1} dp_2$$

d'où dv :

$$dv = \frac{-1}{2} \sqrt{2(p_1 - p_2)} \left(\frac{20000 - z(t)}{20000 + z(t)} r_0 \right)^{-3/2} r_0 \frac{40000}{(20000 + z(t))^2} \frac{10^5}{2,256 \cdot 5,256 \cdot p_0} p_2^{\frac{1}{5,256}-1} dp_2 + \frac{1}{2} \left(\frac{2}{r_0} \frac{20000 + z(t)}{20000 - z(t)} \right)^{1/2} [(p_1 - p_2)^{-1/2} (dp_1 - dp_2)]$$

$$\Delta v = \frac{\sqrt{2(p_1 - p_2)}}{2} \left(\frac{20000 - z(t)}{20000 + z(t)} r_0 \right)^{-3/2} r_0 \frac{40000}{(20000 + z(t))^2} \frac{10^5}{2,256 \cdot 5,256 \cdot p_0} p_2^{\frac{1}{5,256}-1} dp_2 + \frac{1}{2} \left(\frac{2}{r_0} \frac{20000 + z(t)}{20000 - z(t)} \right)^{1/2} [(p_1 - p_2)^{-1/2} (dp_1 + dp_2)]$$

Calcul de $d(\cos i(t))$:

$$d \cos i(t) = \frac{\partial \cos i(t)}{\partial i(t)} di(t) = -\sin i(t) di(t)$$

Calcul de $di(t)$:

$$i(t) = i(0) + \sum_{u=1}^{n_t} p_i'(u),$$

où n_t est le nombre de pas d'itérations jusqu'au temps t

$$di(t) = \sum_{u=1}^{n_t} \frac{\partial i(t)}{\partial i'(u)} di'(u)$$

$$di(t) = \sum_{u=1}^{n_t} p di'(u) = p \sum_u di'(u)$$

Or, on sait que la fusée passera relativement tôt le seuil des $80 m \cdot s^{-1}$ (environ 1s), on peut donc raisonnablement penser que l'angle i variera très peu sur cet intervalle de temps. On fait donc l'approximation que les $di'(u)$ sont égaux quelque soit u .

Donc :

$$di(t) = p n_t di'(t)$$

Calcul de $di'(t)$:

Les informations données par les gyroscopes 1 et 2 sont respectivement notées $g'1$ et $g'2$.

On sait que :

$$g'1(t) = i'(t) \cos q(t)$$

donc :

$$i'(t) = \frac{g'1(t)}{\cos q(t)}$$

Or, on utilise le gyroscope 1 quand sa donnée est la plus précise, ie quand $|\cos q(t)| \geq \frac{\sqrt{2}}{2}$:

*1^{er} cas : $|\cos q(t)| \geq \frac{\sqrt{2}}{2}$:

$$di'(t) = \frac{\partial i'}{\partial g'1} dg'1 + \frac{\partial i'}{\partial \cos q} d \cos q(t)$$

$$di'(t) = \frac{1}{\cos q(t)} dg'1 - \frac{g'1}{\cos^2 q(t)} d \cos q(t)$$

$$d \cos q(t) = \frac{\partial \cos q(t)}{\partial q(t)} dq(t) = -\sin q(t) dq(t)$$

donc :

$$di' = \frac{1}{\cos q(t)} dg'1 + \frac{g'1}{\cos^2 q(t)} \sin q(t) dq(t)$$

donc :

$$d \cos(i(t)) = -\sin i(t) p n_i \left(\frac{1}{\cos q(t)} dg'1 + \frac{g'1}{\cos^2 q(t)} \sin q(t) dq(t) \right)$$

donc :

$$\Delta(\cos i(t)) = \sin i(t) n_i p \left(\frac{1}{|\cos q(t)|} dg'1 + \frac{g'1}{\cos^2 q(t)} dq(t) \right)$$

donc :

$$\Delta(\cos i(t)) = \sin i(t) n_i p \left(\sqrt{2} dg'1 + 2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot dq(t) \right)$$

$$\Delta(\cos i(t)) = \sqrt{2} \sin i(t) n_i p (dg'1 + g'1 dq(t))$$

2^{ème} cas : $|\cos q(t)| < \frac{\sqrt{2}}{2}$:

$$g'2(t) = i'(t) \sin q(t)$$

donc :

$$i'(t) = \frac{g'2(t)}{\sin q(t)}$$

donc :

$$di' = \frac{1}{\sin q(t)} dg'2 - \frac{g'2}{\sin^2 q(t)} \cos q(t) dq(t)$$

d'où :

$$d(\cos i(t)) = -\sin i(t) n_i p \left[\frac{1}{\sin q(t)} dg'2 - \frac{g'2}{\sin^2 q(t)} \cos q(t) dq(t) \right]$$

donc :

$$\Delta(\cos i(t)) = \sqrt{2} \sin i(t) n_i p (dg'2 + g'2 dq(t))$$

Nous avons ainsi toutes les données pour calculer l'incertitude sur A, ΔA . Le calcul s'effectue de la même manière sur l'ordonnée B :

$$B(t) = v(t) p \sin(i(t))$$

donc :

$$\Delta B = p(\sin i(t) \Delta v + v(t) \Delta(\sin i(t)))$$

Calcul de $d(\sin(i(t)))$:

$$d \sin i(t) = \frac{\partial \sin i(t)}{\partial i(t)} di(t) = \cos i(t) di(t) = \cos i(t) p n_i di'(t)$$

*1^{er} cas : $|\cos q(t)| \geq \frac{\sqrt{2}}{2}$:

$$di' = \frac{1}{\cos q(t)} dg'1 + \frac{g'1}{\cos^2 q(t)} dq(t)$$

donc :

$$d \sin i(t) = \cos i(t) p n_i \left(\frac{1}{\cos q(t)} dg'1 + \frac{g'1}{\cos^2 q(t)} \sin q(t) dq(t) \right)$$

$$\Delta(\sin i(t)) = \cos i(t) p n_i \left(\frac{1}{\cos q(t)} dg'1 + \frac{g'1}{\cos^2 q(t)} \sin q(t) dq(t) \right)$$

donc :

$$\Delta(\sin i(t)) = \sqrt{2} \cos i(t) n_i p (dg'1 + g'1 dq(t))$$

2^{ème} cas : $|\cos q(t)| < \frac{\sqrt{2}}{2}$:

$$di' = \frac{1}{\sin q(t)} dg'2 - \frac{g'2}{\sin^2 q(t)} \cos q(t) dq(t)$$

donc :

$$d \sin i(t) = \cos i(t) p n_i \left(\frac{1}{\sin q(t)} dg'2 - \frac{g'2}{\sin^2 q(t)} \cos q(t) dq(t) \right)$$

donc :

$$\Delta(\sin i(t)) = \cos i(t) p n_i \left(\frac{1}{\sin q(t)} dg'2 + \frac{g'2}{\sin^2 q(t)} \cos q(t) dq(t) \right)$$

donc :

$$\Delta(\sin i(t)) = \sqrt{2} \cos i(t) n_i p (dg'2 + g'2 dq(t))$$

d'où la connaissance de ΔB .

Exploitation :

L'on peut se servir de ces résultats pour déterminer l'erreur totale que l'on obtiendra sur A et B. Cependant, cela nécessiterait l'approximation de Δv , et donc de la différence $(p1-p2)$, très difficile à évaluer puisque faisant entrer en jeu des grandeurs exprimées en Pa que nous n'avons évidemment pas encore. Ainsi, une erreur minime sur son approximation en induirait une autre sur l'incertitude finale.

Nous n'avons pour l'instant donc pas prétendu à donner une incertitude globale sur A et B mais nous sommes servis de ce calcul pour vérifier que certains de nos choix pratiques n'entraînaient pas des imprécisions trop importantes sur les résultats finaux.

Par exemple, se posait la question de calibrer le gyroscope de rotation propre. Nous avons en effet à déterminer s'il devait être capable de mesurer jusqu'à 4 ou 5 tours par seconde. Il s'est finalement trouvé que nous ne pouvions le faire mesurer que jusqu'à 1200°/s, soit 3.33 tours par seconde. Nous avons donc vérifié l'erreur induite sur dq et consécutivement sur A :

$$\Delta A_{5\text{tours}} - \Delta A_{3.33\text{tours}} = pv(t)(\Delta(\cos i(t))_{5\text{tours}} - \Delta(\cos i(t))_{3.33\text{tours}})$$

Pour $|\cos q(t)| \geq \frac{\sqrt{2}}{2}$ par exemple :

$$\Delta A_{5\text{tours}} - \Delta A_{3.33\text{tours}} = pv(t)\sqrt{2}\sin i(t)n_t pg'1(dq_{5\text{tours}} - dq_{3.33\text{tours}})$$

$$\text{or, } dq_{5\text{tours}} = \frac{5 \times 360}{10} = \frac{1800}{1024} = 1,75 \quad \text{et} \quad dq_{3.33\text{tours}} = \frac{1200}{1024} = 1,17$$

en prenant $v = 80m.s^{-1}$, $p = 20ms$, $\sin i(t) = 1$, $n_t = 50$ et $g'1 = 10^\circ/s$, on a :

$$\Delta A_{5\text{tours}} - \Delta A_{3.33\text{tours}} = 13m$$

Cette différence de codage n'entraîne qu'une erreur supplémentaire de 13m en abscisse. Cela ne pose pas grand problème sur cet axe. Vérifions maintenant pour l'axe des ordonnées :

$$\Delta B_{5\text{tours}} - \Delta B_{3.33\text{tours}} = pv(t)(\Delta(\sin i(t))_{5\text{tours}} - \Delta(\sin i(t))_{3.33\text{tours}})$$

Pour $|\cos q(t)| \geq \frac{\sqrt{2}}{2}$ par exemple :

$$\Delta B_{5\text{tours}} - \Delta B_{3.33\text{tours}} = pv(t)\sqrt{2}\cos i(t)n_t pg'2(dq_{5\text{tours}} - dq_{3.33\text{tours}})$$

en prenant $\cos i(t) = 0.1$ et $g'2 = 10^\circ/s$:

$$\Delta B_{5\text{tours}} - \Delta B_{3.33\text{tours}} = 1.31m$$

Quant à l'erreur sur y, elle n'est donc que de 1.31m, ce qui est très peu. On a donc pu raisonnablement faire ce choix de codage.

Nous nous sommes en outre servis de ces calculs pour déterminer sur combien de bits nous devons coder. Nous avons donc calculé les $dg'1, dg'2, dq$ dans chacun de ces 2 cas et avons réalisé un calcul similaire au précédent.

Il s'est cette fois avéré qu'il était précieux de coder sur 10 bits plutôt que sur 8. En effet, Cela permet d'avoir une précision accrue d'un facteur $2^2 = 4$.

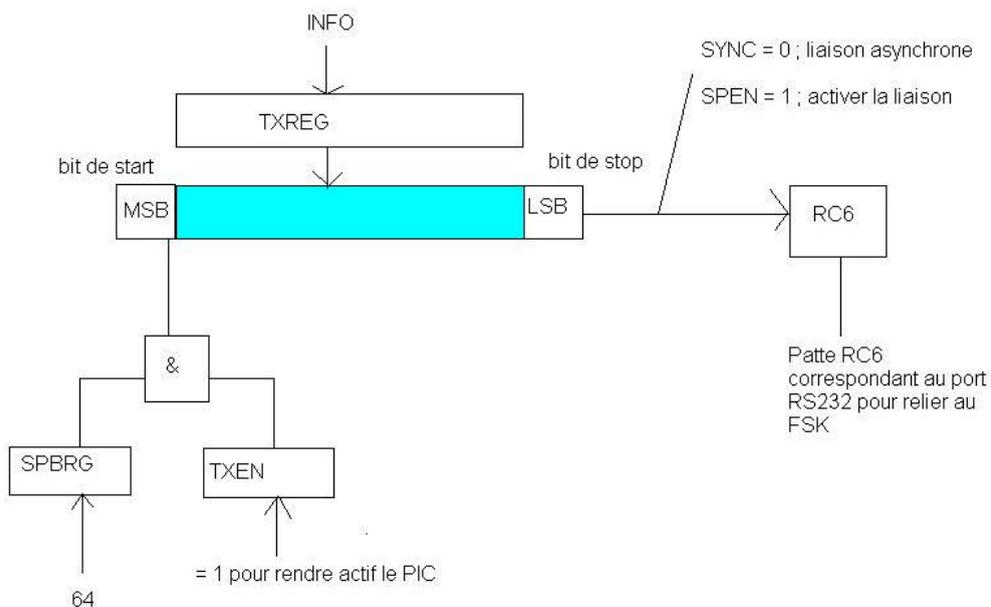
2.11 Programmation du PIC

Faute de connaissances suffisantes, la programmation du PIC s'est révélée plus longue que prévue. Une fois le PIC16F876 choisi, nous avons analysé sa datasheet (près de 400 pages...) présente sur le site de Microchip. Avec l'aide de quelques élèves de la promotion, nous avons pu comprendre et assimiler un programme de base sur la transmission d'un octet de données selon le protocole SNR (programme conçu par un élève de Centrale Paris, Marc Buchdahl, rencontré au week-end télémesure).

Notre programme personnel a dû être développé pour répondre aux spécificités de notre projet. Ainsi, une boucle permet l'envoi des données jusqu'au point de culmination. Le temps de la boucle est approximé grâce à la simulation sous *Trajec*, soit 14,23 secondes, et part à l'arrachage de la prise jack.

Une fois la culmination atteinte, la porte parachute s'ouvre grâce à un servomoteur et l'envoi des données s'arrête. Il nous a paru inutile de les poursuivre durant la descente car les valeurs risquaient d'être très difficiles à exploiter puisque la fusée perd tout contrôle et cela nous semblait une bonne astuce dans le programme du PIC.

Pour la conversion analogique-numérique, on procède selon le schéma suivant :



Les capteurs se trouvent sur les pattes AN0, AN1, AN2, AN3, AN5. On teste également la présence du bit de synchronisation «FF » pour savoir où nous en sommes dans les valeurs. Tout ce mode de transmission est présent sous la forme d'une macro appelée EMITDATA dans le programme dont une des versions se trouve en annexe.

Sur conseils des professeurs, une mémoire EEPROM a été mise en place. La mémoire interne du PIC était insuffisante pour enregistrer toutes les données et comme le risque de n'avoir aucune donnée à exploiter (même post vol) si le PIC plante ou s'il y avait un problème de transmission, nous avons opté pour une mémoire EEPROM externe au PIC. Nous nous sommes munis du modèle AT24C16 (mémoire de 16Ko).

A l'aide des cours de Bigonoff (http://www.von-info.ch/PIC/bigonoff_01.htm), une première macro a été implémentée mais finalement nous nous sommes aperçus qu'elle correspondait à l'implémentation de la mémoire interne du PIC (appelée aussi EEPROM) donc nous sommes repartis sur de nouvelles bases à partir de l'implémentation sur un BUS I²C.

Suite à des problèmes techniques, un manque de compétences et aussi de temps, l'idée de l'EEPROM a dû être abandonnée très tardivement, quitte à ne rien avoir comme données. Il fallait donc concentrer toute notre attention sur la chaîne de télémétrie et sa fiabilité.

A noter que nous avons aussi réglé la fréquence d'échantillonnage (Baud Rate) à 4800 Bauds, ce qui revient à placer 64 en adresse SPBRG (99h en Bank 1).

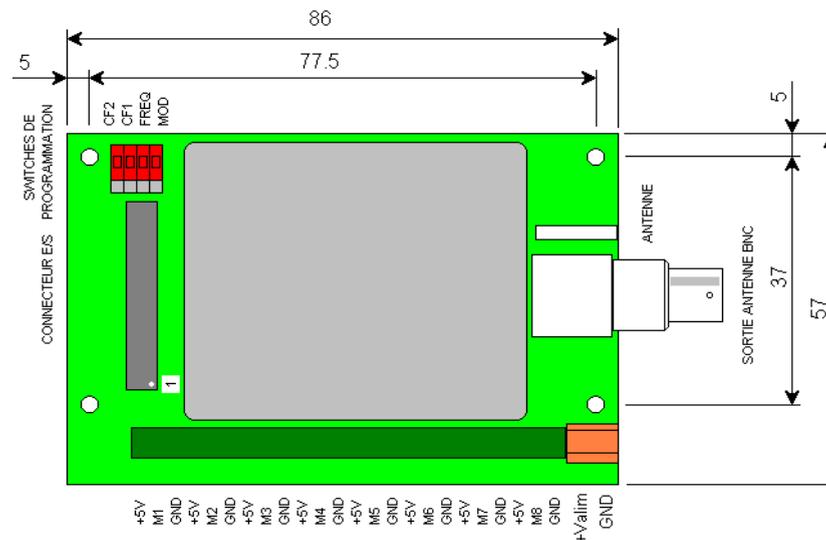
Concernant les tests, ils se sont montrés concluants dès la première tentative hormis l'erreur relative à la programmation de l'EEPROM. Quelques erreurs de syntaxe sont apparues mais elles ont été résolues rapidement et les premières simulations ont pu être mises en œuvre très facilement en shuntant la partie EEPROM.

2.12 Emetteur

Tout ce que nous avons pu découvrir quant à l'émetteur l'a été via la datasheet de *Planète Sciences* puisque ce module de la chaîne nous est prêté. Signalons bien que nous avons adapté cette émetteur : le KIWI MILLENIUM en mode KIWI pour une modulation externe. Une autre possibilité s'offrait à nous au départ visant à utiliser le KIWI en mode complet avec les 8 pattes dédiées aux capteurs. Mais vu que notre montée était d'une quinzaine de secondes, avec cette modulation nous n'aurions eu que 15 points grand maximum en supposant qu'aucune donnée ne soit perdue.

L'émetteur émet à une fréquence FM de 137.950 MHz avec une pureté harmonique de 50dB. Pour la modulation externe, on branche donc à la patte 10 du connecteur HE14 la sortie du FSK et l'alimentation de 12V au bornier à Vis (la masse du bornier et celle du HE14 sont reliées).

Le CNES prêtant l'émetteur, nous pourrions le tester vraiment que lors de la dernière visite d'avancement en même temps que toute la chaîne de télémétrie. L'émetteur, si son état le permet, sera récupéré après le vol.



8 Entrées analogiques

1. La mécanique

1.1 Structure externe

Nous avons été aidés pour la partie mécanique de la fusée par un mécanicien de Subatech, Manoël Dialinas, qui nous a épaulé durant toute la phase de conception. Suite à un problème rencontré lors de la conception de notre fusée nous avons malheureusement été obligé de refaire toute la partie mécanique concernant la structure de la fusée. Ce changement de stratégie a été radical.

La première idée que nous avons eue consistait à faire une structure interne porteuse, c'est-à-dire une structure monobloc constituée de mâts en aluminium. A l'origine la peau ne portait rien, elle était juste présente en tant que enveloppe externe. Cependant, alors que les plans étaient réalisés, Mr Dialinas nous a expliqué que la structure interne ne résistera pas au décollage. Il nous a donc conseillé d'opter pour une coque porteuse. Après avoir continuer étudier les deux structures différentes en modifiant l'une pour que les contraintes ne cassent pas les pièces, et en imaginant les plans de l'autre, nous avons choisi de nous focaliser sur la seconde.

Cette structure porteuse est réalisée en tubes de fibre de carbone de 3mm d'épaisseur. Le but que nous nous étions fixé était de réaliser une fusée démontable par partie de façon à pouvoir accéder plus facilement (il nous semblait) aux expériences. Nous avons donc décidé de faire une coque porteuse en 3 parties qui s'assemblent entre elles par des emboîtements. Ce guidage se fait sur une distance équivalente à 2 fois le diamètre du tube soit 20cm. Toutefois il fallait trouver le tube de carbone. Heureusement Subatech était en contact avec une entreprise qui fabrique des fibres de carbone, Aéroforme. Après entretiens et discussions avec Aéroforme, et en accord avec l'équipe Electronique par rapport à la taille des différentes cases, les tubes sont partis en fabrication.

Un problème est survenu quand il a fallu trouver l'entreprise qui usinera les tubes car notre l'usinage dont nous avons besoin abîmait énormément les outils. En effet aucune entreprise de la région nantaise n'a accepté d'usiner les tubes de carbone d'autant plus que la longueur des emmarchements rendait l'opération délicate. L'usinage s'est donc fait à l'école.

Un autre problème se posait quant au tube de carbone. Il fallait percer la peau pour la porte parachute. L'utilisation de fibres de carbone impliquait que selon la disposition de celles-ci, la résistance aux efforts se ferait plus ou moins bien dans un certain sens. Couper les fibres ne risquait-il pas de fragiliser la structure ? Après conversation avec Aéroforme il est apparu que cela ne posait que peu de problèmes.

L'ogive de notre fusée a elle aussi être réalisée en fibres à partir d'un moule dont nous avons conçu les plans. Nous disposions d'une ogive parabolique à l'école qui aurait pu servir de moule mais les dimensions ne correspondaient pas à celles du tube (l'ogive était beaucoup trop petite et il aurait fallu un système d'adaptation trop coûteux, pour être intéressant).

1.2 Structure interne

- Première structure

Avant le changement de structure, les éléments internes devaient être porteurs dans la fusée ; c'est-à-dire que la rigidité et la solidité de la fusée étaient assurées par la structure interne en aluminium. Cette structure était composée de 4 profilés en L en aluminium formant un carré. Chaque mât était vissé collé sur la plaque de poussée (la plaque de poussée est une plaque en aluminium dans laquelle est vissé le propulseur). Les autres plaques supportant les expériences étaient fixées sur les mâts par des vis. Cette solution de structure n'a pas convaincu Mr Dialinas car d'après lui elle allait se briser à la base de la case parachute. Il nous a vivement conseillé de faire une coque porteuse et ainsi de supprimer toutes les contraintes appliquées à la structure interne.

- Seconde structure

Nous avons donc été obligé de refaire tous les plans en avril. En effet les plaques étaient conçues pour la structure en mât, il a fallu dessiner les plans des tubes car ceux-ci devaient être usinés. Ce changement de programme nous a coûté presque 1,5 mois en temps de travail. Il a fallu mettre en place un nouveau système d'intégration des expériences. Ainsi, des bagues destinées à supporter les plaques sont collées dans le tube au niveau de chaque emboîtement. En effet pour des questions de simplicité d'intégration, les bagues ne peuvent être placées n'importe où dans les tubes. Une fois l'assemblage des tubes réalisé, ceux-ci sont vissés dans la bague pour assurer une bonne rigidité de l'emboîtement. Ce système de structure ne facilite en rien l'intégration des éléments internes (ce point sera développé ultérieurement).

La fusée a été divisée en trois tubes donc quatre parties : une case parachute, une case analogique avec les capteurs, une case PIC et enfin dans l'ogive la case émetteur. Nous avons conçu des bagues pouvant supporter des plaques au-dessus et en dessous. Ainsi chaque case est constituée d'une partie basse et d'une partie haute supportant des cartes électronique.

Les cartes électroniques sont fixées sur des profilés en U placés l'un en face de l'autre. Ces profilés sont fixés aux plaques par des équerres de chaque côté. En fait chaque plaque est indépendante des autres et peut se désolidariser de la fusée en la dévissant. On peut ainsi ne retirer que la partie PIC sans toucher au reste de la fusée.

1.3 Intégration

L'intégration des éléments internes à la structure de la fusée est sans doute l'un des points les plus importants dans la conception de la fusée. Une bonne intégration permet de résoudre bon nombre de problèmes liés à la répartition des éléments mais surtout à l'assemblage de la fusée. Elle permet aussi de limiter l'emplacement occupé par les expériences et donc de miniaturiser la fusée (et/ou d'embarquer plus de matériel).

Malheureusement, c'est un point de la conception que nous avons un peu négligé au départ. Nous n'avons pas tout de suite saisi l'importance de ce problème. L'intégration n'a donc pas été prise en charge lors de la conception de la structure mais après : la philosophie de l'équipe mécanique était de concevoir une structure dans laquelle on pourrait facilement intégrer n'importe quel type d'expérience. Cette modularité se fait naturellement au détriment de la compacité et surtout, elle fait apparaître de nombreux problèmes au moment du montage.

Nous avons choisi ce mode de fonctionnement parce que c'était notre première fusée : ce système permettait de vraiment séparer le travail des deux équipes (mécanique et

électrique) de manière à travailler indépendamment, avec moins de contraintes et donc plus vite. Il s'agit en fait d'une solution de facilité car, comme on a pu s'en rendre compte par la suite, l'intégration est un problème à cheval entre la mécanique et l'électronique et qui nécessite une collaboration étroite des deux équipes pour être réalisée correctement.

L'équipe mécanique a donc conçu des blocs de structure interne sur lesquels viennent se fixer les cartes expérience. Ces blocs sont au nombre de cinq : un pour les gyroscopes, un pour les capteurs de pression et la carte de visualisation, un pour le PIC et son alimentation, un pour le FSK, un pour l'émetteur et sa batterie. Les deux premiers blocs font partie de la même case «analogique », les deux suivants sont dans la case «numérique » et le dernier bloc se trouve dans la coiffe.

Ces cinq blocs sont amovibles et sont fixés dans le corps de la fusée par des vis sur des bagues (des anneaux de section rectangulaire), elles-mêmes collées à l'intérieur des tubes de carbone. Pour assembler la fusée, il faut commencer par fixer toutes les nappes de fils sur les blocs 2 et 4 (capteurs de pression et FSK). Ensuite, on assemble chaque tube séparément : le parachute, le servomoteur et les gyroscopes sur le tube 1 ; les capteurs et le PIC dans le tube 2 (on branche alors les nappes) ; le FSK et l'émetteur dans le tube 3 (et on les connecte). Finalement, il ne reste plus qu'à brancher les nappes restantes entre les tubes (sur le bloc gyroscopes et sur le bloc PIC) et à emboîter les tubes (puis à visser les emboîtements).

Ce système d'assemblage à l'avantage de laisser une grande modularité au niveau de l'intégration. Cependant, il n'est pratique du tout pour relier électriquement les blocs entre eux car on ne peut pas relier directement deux éléments si ils ne sont pas situés sur deux blocs adjacents : c'est ce qui nous a obligé à créer et monter des «cartes relais » dont la seule utilité est de permettre les raccords électriques au moment de l'assemblage final.

La dernière remarque serait donc de se préoccuper des problèmes d'intégration et d'assemblage le plus tôt possible, en même temps que la conception de la structure externe. En effet, cet aspect de la conception peut causer des ennuis tardivement (on s'aperçoit que certains éléments ne rentrent pas ou qu'ils ne peuvent pas être fixés ou reliés), particulièrement lorsqu'on est novice en la matière.

1.4 Tube de Pitot

Pression d'arrêt / pression statique Tube de Pitot / moyeneur pneumatique

Comme on l'a vu précédemment, la vitesse relative de la fusée s'obtient à partir de la valeur de deux pressions : la pression d'arrêt P_a et la pression statique P_s . La pression d'arrêt dépend de la vitesse tandis que la pression statique correspond à la pression ambiante au niveau de la fusée. Ces deux valeurs sont mesurées par deux capteurs de pression reliés à deux systèmes de relevé de la pression.

La pression d'arrêt, liée à la vitesse (proportionnelle pour les faibles vitesses), correspond à la pression exercée par le fluide en mouvement relatif sur l'extrémité frontale de la fusée. A cette extrémité, les lignes de courants d'air se séparent en un point pour glisser le long de la fusée. En ce point, la vitesse des particules d'air est quasi nulle et la pression est importante (si la fusée vole vite). On mesure cette pression grâce à un tube de Pitot. Ce tube

est muni à son extrémité d'une partie semi hémisphérique et percée en son centre : la sonde de Pitot. Ce trou correspond au point auquel apparaît la pression statique et il est relié à l'intérieur du tube, lui-même relié à au capteur.

Etant donné que notre fusée est pourvue d'une antenne, nous avons placé la sonde de Pitot à son extrémité. Nous pensions au début nous servir de l'antenne elle-même comme tube de Pitot mais pour des raisons de solidité et d'intégration, nous avons privilégié une autre solution : la sonde de Pitot est une petite pièce usinée en nylon, qui vient s'emboîter au bout de l'antenne. Elle a donc une partie cylindrique (pour s'emboîter dans le tube de cuivre) et une extrémité hémisphérique. Le bout avant de la sonde est percé pour conduire la pression jusqu'à l'autre bout. Ce dernier se termine en petit tube autour duquel on emboîte un tube flexible. C'est ce long tube flexible qui conduit la pression d'arrêt depuis la sonde de Pitot jusqu'au capteur de pression, situé dans le tube intermédiaire.

Le principal problème consiste à relier le capteur avec la sonde. En effet, le principe de montage de la fusée impose de coller le tuyau flexible à son capteur avant de fixer le bloc expérience dans le corps de la fusée. Il faut donc faire passer le tuyau à travers toute la fusée puis emboîter les éléments de la fusée avant de pouvoir fixer l'antenne et la sonde de Pitot. Une fois que la fusée est assemblée, on fait passer le tuyau flexible à travers l'antenne, on emboîte l'antenne, on emboîte la partie centrale de la sonde de Pitot dans le tuyau flexible puis la partie externe à l'extrémité de l'antenne. Lors du montage final, ces éléments seront collés avec de la colle à séchage rapide pour assurer leur liaison et leur étanchéité.

En ce qui concerne la pression statique, elle correspond à la pression ambiante. On pourrait donc supposer qu'il suffit de mettre un capteur de pression à l'air libre dans la fusée. Cependant, la vitesse atteinte par la fusée pourrait entraîner des perturbations (surpressions ou dépressions) dans la fusée ce qui fausserait les calculs. En effet, la pression statique doit être mesurée de manière précise, d'autant plus que ses variations (qui dépendent de l'altitude) sont faibles. De même, un capteur de pression relié à un trou dans la paroi de la fusée ne peut donner une valeur précise : les perturbations aérodynamiques autour de la fusée (dûes à son instabilité impliquant de légers changements de cap et à sa vitesse) ainsi que le vent (réel) faussent les mesures. C'est pour cela qu'on utilise un moyennneur pneumatique.

Le principe du moyennneur consiste à mesurer plus précisément la pression extérieure à la fusée en faisant la moyenne des pressions en différents points autour de la fusée. Ainsi, une surpression sur un flanc de la fusée sera compensée par la dépression sur le flanc opposé. De manière pratique, le moyennneur pneumatique et une petite pièce (1 cm environ) composée d'une partie interne creuse reliée à cinq ouvertures sur l'extérieure. Ces ouvertures sont des petits tuyaux de métal. Etant situé à égale distance de chaque trou, il permet donc d'avoir une excellente approximation de la pression moyenne régnant autour de la fusée. La pièce est fixée sur le même bloc d'expérience que son capteur de pression ce qui permet de les relier hermétiquement avant l'assemblage du corps de la fusée. Le capteur est relié à l'une des ouvertures du moyennneur par un tuyau flexible.

On pratique dans le corps de la fusée (le tube intermédiaire) 4 trous, au même niveau mais opposés deux à deux pour mesurer quatre pressions tout autour de la fusée. Avant la fixation du bloc capteurs, on colle quatre petits tuyaux flexibles aux quatre embouts restant du moyennneur. Une fois le bloc en place, on vient emboîter les extrémités libres des quatre flexibles dans les trous de la peau : le moyennneur est enfin en place. Il faudra là encore coller les flexibles juste avant le lancement.

Ce système de mesure de la vitesse est a priori relativement fiable et performant puisqu'il est utilisé dans les avions de chasse. Cependant, il y a deux problèmes pour obtenir de bons résultats. Tout d'abord, il faut pouvoir mesurer des variations de pression de manière

précise, ce qui suppose de connaître au mieux et à l'avance la plage de mesure nécessaire. Il faut pouvoir choisir le bon capteur. Ensuite, il faut penser dès le début aux raccordement des différents éléments : ils sont éloigné (environ 1,30 mètre entre l'extrémité du tube de Pitot et son capteur) et il faut réaliser des connections étanches. De plus, il n'est jamais facile de relier entre eux des éléments de la structure interne (les capteurs) et externe (les points de prise de pression). Ce sont des éléments qui doivent être pris en compte dès la conception.

1.5 Stabilité

Pour commencer qu'est-ce que la stabilité d'une fusée ? C'est sa capacité à retrouver naturellement sa position initiale lorsqu'elle se trouve en incidence ; la fusée est dite en incidence si son axe longitudinal fait un angle avec l'axe de sa direction, tangent à sa trajectoire. La stabilité, c'est donc de pouvoir corriger son inclinaison pour aligner son axe longitudinal avec son vecteur vitesse. On dit que la fusée est stable si elle conserve la même attitude. Le problème de stabilité concerne donc la rotation de la fusée sur elle-même autour de son axe normal.

Après cette définition, on peut se demander pour quoi rechercher une fusée stable. Cela permet en fait de déterminer à l'avance sa trajectoire, qui sera la plus simple, « belle », « intuitive » possible ; C'est-à-dire approximativement une parabole (si l'on excepte la descente sous parachute) lui permettant d'atteindre la plus haute altitude possible (qui pourra être estimée). Prédire la trajectoire d'une fusée a aussi l'avantage de pouvoir estimer son point de chute et donc d'éviter certains « dommages collatéraux ». D'autre part le fait que la fusée conserve la même attitude tout au long de son vol garantit qu'elle ne sera pas soumise à de trop fortes contraintes mécaniques, susceptible de l'endommager ou de nuire au bon fonctionnement des expériences.

Pour comprendre ce qu'est une fusée stable, il faut faire une petite étude mécanique des forces en présence durant le vol : il y a le poids, la poussée du propulseur (uniquement au début du vol) et la résistance de l'air. Ces forces agissent suivant deux axes : longitudinal (parallèle au corps de la fusée) et normal (et/ou transversal : on ne considère pas de troisième axe du fait de la symétrie de la fusée). De plus, et c'est ce qui est le plus important, ces différentes forces n'agissent pas au même endroit.

Le poids est assez facile à déterminer (mais attention, il change pendant le vol avec la combustion du propulseur). C'est lui qui attire la fusée vers le sol et qui va lui donner cette trajectoire parabolique, caractéristique de la chute libre. Il s'applique au centre de gravité de la fusée, qui va lui aussi se déplacer du fait de l'allègement du propulseur.

La poussée du propulseur est difficile à mesurer mais elle est très courte et s'applique pendant que la fusée est quasiment à la verticale : elle s'oppose donc au poids et s'applique au centre de gravité. Cette force n'intervient pas au niveau de la stabilité de la fusée car elle s'exerce uniquement selon l'axe longitudinal et n'intervient pas dans sa rotation.

La résistance de l'air enfin est le paramètre le plus important pour la stabilité mais pas le plus facile à calculer. Elle s'exerce selon deux composantes : la traînée, sur l'axe longitudinal, qui s'oppose à l'avancement de l'engin et donc à la poussée (et freine la fusée) ; elle dépend essentiellement de la vitesse, du diamètre de la fusée et du C_x (coefficient aérodynamique) ; et la portance, sur l'axe normal. La portance provient de l'action de l'air en mouvement relatif (à cause de la vitesse de la fusée) sur les ailerons. Elle dépend de la vitesse (la fusée doit voler vite pour être stable) et du coefficient de portance C_n , qui dépend

principalement de la taille et de la forme des ailerons. C'est cette dernière qui va permettre à la fusée de tourner sur elle-même (autour de son axe transversal) pour corriger son éventuelle incidence due aux perturbations (vent, déformations de la fusée, vibrations).

En effet la portance ne s'applique pas au centre de gravité mais au centre de poussée. L'emplacement de ce point virtuel dépend de la position, de la taille et de la forme des ailerons.

D'autre part, il est important de noter que la portance est très supérieure à la composante normale du poids, entre autre à cause de la vitesse élevée de l'engin. En effet la force de portance est proportionnelle au carré de la vitesse.

La fusée est donc stable lorsque la force de portance lui permet de corriger son incidence. Cette correction s'effectue par une rotation autour d'un point appelé centre de rotation ; ce point dépend de la portance et de la composante normale du poids. Cette dernière étant négligeable, le centre de rotation est toujours très proche du centre de gravité (sauf aux très faibles vitesses).

La rotation s'effectue dans le sens de la portance, qui est toujours dirigée vers l'arrière de la trajectoire (à cause de l'air en mouvement relatif dans la direction de la trajectoire). La capacité de la fusée à retrouver la bonne attitude va donc dépendre de l'emplacement du centre de poussée, le point d'application de la portance.

Ce point peut être soit en avant, soit en arrière, soit confondu avec le centre de gravité. Comme on peut le voir sur le schéma, la seule solution permettant un équilibre stable est de placer le centre de poussée en dessous du centre de gravité, c'est-à-dire de mettre les ailerons à l'arrière. Dans cette position, si la fusée se met en incidence, la portance aura tendance à ramener l'arrière de la fusée dans l'axe de la trajectoire et donc à supprimer l'angle d'attaque.

Si on place le centre de poussée en haut de la fusée, la portance aura tendance à accentuer l'incidence de la fusée et à la faire se retourner. La trajectoire ressemblerait alors à une suite de loopings totalement imprévisibles, ce qui n'est pas le but recherché. De même, si les deux centres sont confondus, la portance ne pourra entraîner de rotation et la fusée errera sans trajectoire précise, au gré des perturbations.

Maintenant que l'on a une idée de l'endroit où placer le centre de poussée, il faut encore le définir précisément et dessiner les ailerons. En effet, il ne suffit pas de placer le centre de poussée en dessous du centre de gravité pour obtenir une fusée stable. La stabilité dépend en fait de deux critères essentiels de la fusée : le coefficient de portance (qui caractérise l'importance que va avoir l'action de l'air sur la fusée) et la marge statique, qui est en fait la distance séparant les centres de gravité et de pression, en fonction du diamètre de la fusée. Comme on l'a vu, elle détermine la capacité de la fusée à tourner sur elle-même.

Comme les calculs théoriques, nécessaires pour modéliser le vol et ainsi déterminer les critères de stabilité, sont très compliqués, Planète Science donne aux clubs des fourchettes de valeurs à respecter (exigence du cahier des charges). Ces valeurs ont été validées par les nombreux tirs de fusées et garantissent d'obtenir une fusée à peu près stable. De plus Planète Science fournit les formules et les méthodes pour les calculer, en fonction de dimensions caractéristiques de la fusée.

En effet, une marge statique trop faible fait que la fusée serait déstabilisée à la moindre perturbation et qu'elle aurait du mal à retrouver sa position initiale. Il en est de même avec un coefficient aérodynamique trop faible : on parle alors d'instabilité.

A l'inverse, une marge statique ou un coefficient de portance trop fort rend la fusée « surstable » : en cas d'incidence, la force de rappel exercée sur les ailerons est tellement importante que la fusée se retrouve en incidence de l'autre côté de sa trajectoire : elle oscille

sans pouvoir s'arrêter (le mouvement n'est pas amorti) ce qui peut entraîner des dommages car les contraintes mécaniques sont beaucoup plus importantes. Un autre inconvénient est qu'une fusée surstable est beaucoup plus sensible au vent vrai (le vent météo). Dans un cas normal, la fusée s'aligne avec le vent relatif (vitesse + vent vrai) et a donc tendance à remonter le vent petit à petit. Une fusée surstable s'alignera très rapidement avec le vent vrai et partira donc à l'horizontale.

Les valeurs fournies par Planète Science sont les suivantes : un C_n compris entre 15 et 30 et une marge statique comprise entre 2 et 6 fois le diamètre de la fusée. Pour satisfaire à ces exigences, il faut prendre quelques précautions.

En ce qui concerne le C_n , c'est facile, il suffit en général d'agrandir (ou de diminuer) la taille des ailerons pour l'augmenter (ou le baisser). Attention cependant, plus la fusée est grosse, plus les ailerons devront être grand. D'autre part, nous avons remarqué que le moyen le plus efficace pour faire varier ce coefficient et de jouer sur la hauteur des ailerons. En effet, leur longueur influence très peu la portance et il ne sert à rien de faire des ailerons très longs.

Pour la marge statique, c'est beaucoup plus compliqué : nous avons rencontré de nombreux problèmes. Tout d'abord, même s'il est facile de calculer la position du centre de poussée (seules quelques grandeurs sur les ailerons et les dimensions de la fusée sont nécessaires), il est en revanche très difficile d'estimer à l'avance la position du centre de gravité. En effet, lors de la conception, on n'a aucune idée (même vague) du poids que vont faire les expériences et la structure interne, le câblage, etc. Il faut donc, à partir du centre de poussée, déterminer la fourchette de valeur dans laquelle peut se trouver le centre de gravité.

Ensuite, il faut calculer le centre de gravité provisoire, avec les éléments que l'on connaît déjà, c'est-à-dire la structure et le propulseur. Attention, il faut tenir compte de la combustion de la poudre : il faut faire les calculs avec le propulseur vide et avec le propulseur plein pour s'assurer que la fusée restera stable lors des différentes phases de vol. On doit ensuite regarder la position du centre de gravité provisoire et voir s'il est trop haut ou trop bas. Comme, à ce stade de la conception, on connaît de manière un peu plus précise le poids qui sera embarqué, on fait une estimation du centre de gravité que doit avoir l'ensemble des éléments à rajouter. Ils sont ensuite répartis dans le corps de la fusée dans cette optique.

Les principaux problèmes liés à la stabilité concernent donc les ailerons (forme, taille et surtout fixation) et la position du centre de gravité de l'engin. Ce centre de gravité est très difficile à déterminer mais il faut pourtant en faire une estimation, même imprécise, qui sera complétée au fur et à mesure.

Cependant, on peut donner quelques conseils d'ordre général pour parvenir à ses fins. Ce ne sont pas des règles (toutes les fusées sont différentes) mais des solutions qui permettent de répondre aux contraintes du cahier des charges. En général, le propulseur ainsi que les ailerons ont tendance à énormément abaisser le centre de gravité de l'engin, et donc à abaisser la marge statique. Pour conserver une valeur confortable, il faut donc déplacer le poids interne de la fusée (structure interne et expériences), celui que l'on peut déplacer, vers le haut, l'avant du corps. Pour cela, on placera par exemple la case parachute (très légère) juste au dessus de la plaque de poussée. On essaiera de placer les batteries le plus haut possible. On peut également jouer sur le poids de l'antenne (en fonction de son diamètre).

Pour terminer, il faut noter que ces problèmes de stabilité rejoignent ceux liés à la répartition des éléments dans la fusée et sont donc indirectement en relation avec les contraintes d'intégration. Ce sont donc des éléments à prendre en compte dès le début de la conception et qu'il ne faut surtout pas négliger.

1.6 Organisation des éléments dans la fusée

La répartition des différents éléments dans le corps de la fusée est un sujet qui ne pose a priori pas de gros problème. Cependant, c'est un élément de la conception qui est lié à d'autres points sensibles, chacun apportant son lot de contraintes. Comme pour tous les éléments de la fusée, il doit être pris en compte dès le début de la conception.

Pour commencer, faisons la liste de tout ce qu'il faut mettre dans la fusée. Il y a tout d'abord les expériences : pour nous, il s'agit des deux capteurs de pression avec le moyennneur pneumatique et le tube de Pitot, et des gyroscopes. Ensuite, il y a toute la chaîne de télémesure associée : la partie analogique, numérique, le séquenceur et l'émetteur, l'alimentation. Il faut aussi intégrer à la fusée un système de ralentisseur : le parachute avec son servomoteur. Enfin, il faut rajouter la carte de visualisation en plus de ce que l'on n'avait pas prévu au départ : les cartes relais.

Chaque élément a donc des particularités, des contraintes d'utilisation, de localisation, qui limite les possibilités d'organisation. De plus, des contraintes liées à la stabilité et à l'intégration ou aux perturbations électromagnétiques viennent s'ajouter à cela.

- Les gyroscopes doivent être près du centre de gravité.
- Il est plus difficile de relier les capteurs de pression à la prise de pression si ils sont éloignés.
- Le tube de Pitot doit se trouver à l'extrémité de l'antenne.
- L'analogique et le numérique doivent être isolé électromagnétiquement.
- De même, l'émetteur et l'antenne perturbent les autres signaux électriques (ou électronique) et ils doivent être isolé.
- Les masse mécanique et électriques doivent être reliée.
- La case parachute est volumineuse et on ne peut pas y mettre d'électronique.
- La carte visu doit être accessible en rampe.
- La marge statique impose une certaine position pour le centre de gravité : il faut jouer avec l'emplacement et le poids des éléments.
- Enfin, lorsqu'on construit une fusée pour la première fois, on a aucune idée de la taille et du poids que vont prendre les différents éléments ce rend encore plus difficile ce travail ; il faut donc faire des estimations, les remettre souvent à jour et prévoir de se laisser des marges de manoeuvre.

Après avoir analysé tous ces points, nous avons opté pour l'organisation suivante :

- Le parachute est dans la première case, juste au dessus du propulseur. Cela permet d'alléger le bas de la fusée pour remonter le centre de gravité et de ne pas avoir d'électronique de chaque côté de la case parachute (il aurait été difficile de les connecter).
- Les gyroscopes sont placés juste au dessus, ce qui correspond à peu près au centre de gravité de la fusée.
- Dans la même case on trouve les capteurs de pression et la carte visu (le reste de l'analogique) ainsi que le moyennneur.
- Dans la troisième case, on trouve toute la partie numérique (PIC et FSK) qui est donc isolé électromagnétiquement du reste. Il y a également la batterie (toujours pour relever le centre de gravité).
- Enfin, dans l'ogive se trouve l'émetteur et sa batterie, isolés du reste de l'électronique pour ne pas les perturber.

Cette structure est celle qui nous a semblé la plus évidente mais elle comporte quand même quelques difficultés, notamment au niveau de l'assemblage : le tube de Pitot est très éloigné de son capteur de pression et il doit donc traverser la moitié de la fusée. D'autre part le servomoteur, tout en bas dans sa case parachute, est éloigné de sa source d'alimentation. Enfin, la carte relais (dont on a négligé l'importance au départ), aurait mérité d'être plus proche des différents blocs auxquels elle est connectée.

1.7 Ailerons

Les ailerons sont normalement la dernière chose à faire de la fusée. En effet c'est d'eux que dépend la stabilité. Nous avons des normes très strictes à respecter en ce qui concerne la distance (la marge statique) qui sépare le centre de poussée (endroit où s'applique la traînée et la portance) et le centre de gravité. Cette distance doit être comprise entre 2 et 6 fois le diamètre. Si la distance est trop grande ou trop petite la fusée devient instable et risque de s'écraser. Nous ne connaissons pas précisément la position du centre de gravité, mais pour des raisons de temps il a absolument fallu faire usiner les ailerons. Nous avons tablé sur des estimations de poids et de positionnement des éléments internes dans la fusée pour définir le centre de gravité.

De plus la taille et la forme des ailerons vont avoir une incidence sur le coefficient de portance (C_n). Ce coefficient doit être compris entre 20 et 40. Si une de ces deux conditions n'est pas remplie, la fusée n'est pas validée pour le lancement. Des formules mathématiques donnent le C_n en fonction de la forme et de la taille des ailerons.

Pour notre fusée le C_n est de 24 et la marge statique est comprise entre 2 et 6 fois le diamètre.

Les fusées sont composées de 4 ailerons séparés par un angle de 90° . Nous avons également des contraintes sur la verticalité (la perpendicularité par rapport au tube) mais aussi sur l'alignement vertical (c'est-à-dire l'alignement des ailerons par rapport à un fil à plomb placé au sommet de la fusée). Si les ailerons sont légèrement décalés, cela induira une rotation propre de la fusée. Cette rotation est gênante pour l'expérience si elle est trop rapide.

Les ailerons sont des plaques en aluminium de forme trapézoïdale de 3mm d'épaisseur. Un nouveau problème est apparu : la fixation des ailerons sur une surface ronde. La solution que nous apporter Mr Dialinas nous apparut très satisfaisante : coller les ailerons sur le tube une fois guidés par des vis très fines. Cependant notre suiveur Planète Science nous a largement déconseillé cette méthode. Planète Sciences estime en effet que la colle ne tient pas suffisamment bien et il a suggéré de les maintenir par des équerres. Le problème de l'arrondi a été réglé par une légère déformation de ces équerres avec une pince. Les ailerons sont ensuite vissés dans les équerres.

1.8 Ogive

L'ogive ou coiffe constitue la partie frontale de la fusée, celle qui lui permet de pénétrer dans l'air. Sa fonction est donc principalement aérodynamique : sa forme doit limiter au maximum les frottements. La coiffe est donc généralement de forme conique, parabolique ou ogivale. Sa deuxième fonction est d'abriter l'émetteur. Elle doit donc être creuse pour libérer un maximum de volume. Cependant, elle a un autre rôle : elle permet aussi de maintenir en place l'antenne qui émet les données. L'antenne est fixée à son extrémité inférieure dans la fusée (à la base de l'ogive) et elle passe à travers la pointe de l'ogive ce qui

lui assure un deuxième point d'ancrage. La coiffe est une pièce particulière, relativement volumineuse (environ 20 cm de long pour 10 cm de diamètre à la base) et de forme peu commune : il n'existe pas de pièce permettant d'en fabriquer (il faut la concevoir et la fabriquer nous-même). De plus elle est fixée à l'extrémité de la fusée ce qui la rend difficile à intégrer.

Au début du projet, nous pensions réaliser notre ogive par nos propres moyens. Dans ce cas, la fibre de verre nous paraissait être la meilleure solution : elle est légère, robuste, pas trop chère et relativement facile à travailler. Cependant, nous n'avions aucune connaissance concernant le travail de ce matériau. De plus, le principal problème consiste à réaliser un moule pour mettre en forme la fibre de verre.

Dans un souci d'aérodynamisme, nous avons décidé de réaliser un moule qui serait extérieur à la coiffe : le moule est creux (c'est la surface extérieure de la coiffe) et on le tapisse de fibre. Il faut ensuite comprimer le matériau pour le faire sécher. Cette opération est délicate car il faut comprimer l'ogive de l'intérieur (avec un ballon de baudruche par exemple comme nous l'ont suggéré certains). De plus, pour fabriquer un moule (qui peut être en plâtre), il faut d'abord réaliser un contre-moule, matrice qui a la même taille et la même forme que l'ogive mais qui n'est pas creux : ce contre-moule peut être fait en pâte à modeler durcissante ou en terre (avec un tour de potier).

Comme on vient de le voir, les opérations nécessaires pour fabriquer une ogive sont nombreuses, longues, difficiles et peu communes. De plus, il faut encore réussir à la fixer sur la structure. Avec notre structure en mâts, nous pensions visser la coiffe autour de la bague supérieure ce qui suppose que la base de l'ogive soit cylindrique. Cela rajoute une difficulté. Nous avons également pensé à une ogive conique en aluminium fabriquer en enroulant une feuille de métal. Cette technique nous posait les mêmes problèmes d'intégration.

Finalement, avec l'apparition de la solution «peau porteuse », nous avons dû revoir notre copie. Le fait qu'Aéroforme nous fabrique les tubes de carbone pour la structure nous a donné l'idée de réaliser une ogive en fibre chez eux. En effet, Aéroforme fabrique les tubes en enroulant des bandelettes de fibre de carbone autour d'un cylindre de métal. On pouvait donc fabriquer notre coiffe de la même façon. Restait encore à trouver un moule une bonne dimension. Nous avons finalement décidé de le faire usiner en même temps que les autres pièces d'alu, ce qui a l'avantage de nous laisser le choix des dimensions. L'inconvénient est que ce moule coûte relativement cher (c'est une grosse pièce).

En ce qui concerne la fixation, le plus simple consistait à faire comme pour les tubes, c'est-à-dire à emboîter la coiffe dans le tube supérieure. Elle s'encastre dans le tube, et vient reposer sur la bague supérieure. Pour la fixer, il suffit de la coller avec de la colle à séchage rapide un peu avant le départ. En effet, elle n'a pas besoin d'être collé solidement vu que c'est l'emboîtement qui encaisse l'essentiel des efforts (due à l'antenne, le poids de l'ogive est négligeable).

Le moule a donc la forme d'un cylindre (10 cm de diamètre pour 8 cm de long) surmonté d'un cône de 12 cm de haut. Le cône, quoi que moins esthétique, est beaucoup plus facile (et donc moins cher) à usiner qu'une ogive ou une parabole. A l'extrémité du cône se trouve un petit cylindre (1 cm de diamètre) correspondant au trou nécessaire pour faire passer l'antenne. Aéroforme fabriquera notre coiffe en enroulant des bandes de fibre autour de notre moule et nous obtiendront directement notre pièce finale.

Pour terminer, je ferais juste remarquer que la coiffe d'une fusée est une pièce très particulière, de par sa forme et ses caractéristiques (de légèreté, d'aspect). Il n'existe pas d'équivalent dans le commerce. Il faut donc réfléchir assez tôt à la façon dont on va la

fabriquer mais aussi au moyens (matériels, humains, savoir-faire, temps) nécessaire à sa réalisation.

1.9 Système de récupération

1.9.1 Parachute

La chaîne parachute se compose de 5 éléments : la toile du parachute, les suspentes, l'émerillon, l'anneau anti-torche et la sangle. Chaque élément est à dimensionner en fonction du poids de la fusée et de la vitesse qu'a cette dernière quand le parachute est déployé.

Il existe plusieurs formes de parachutes utilisés dans la campagne de lancement des fusées organisée par Planète Science. Les deux principales sont hémisphériques et cruciformes. Dans un premier temps, nous nous étions orienté vers la forme hémisphérique car elle demandait moins de travail sur la toile. Cependant au fil de nos discussions avec les autres clubs, nous avons appris que le parachute cruciforme peut se remettre en place seul si jamais il part en torche, chose que l'hémisphérique ne peut faire.

Une fois le choix du parachute effectué, il a fallu dimensionner ce dernier. Pour ce faire nous avons appliqué au pied de la lettre les formules données par Planète Science dans son cahier des charges. Une inconnue à déterminer est cependant laissée à la charge du club, il s'agit de la vitesse de la fusée au moment de l'ouverture. En effet il est impossible de déterminer celle-ci avec exactitude, tout ce que nous savons c'est quelle est de l'ordre de 40 à 50 m/s. Par mesure de prudence, nous avons décidé de prendre une marge de 20m/s, et avons donc fait nos calculs avec une vitesse à culmination de la fusée de 70 m/s.

Le parachute et tous les éléments qui le composent, n'ont pu être achetés qu'en fin d'année car même si le dimensionnement ne prenait pas plus de deux heures en lui-même, le poids de la fusée n'a été déterminé que tard dans l'année. De plus le changement radical de stratégie pour la structure de la fusée n'a pas aidé.

Tous les éléments de la chaîne parachute ont été achetés dans un magasin d'accastillage (Accastillage Diffusion dans notre cas) car seul ce type de magasin dispose de matériel assez solide pour répondre à nos exigences. Là où nous avons eu beaucoup de chance c'est que le magasin Nantais avait une voilerie au dessus de chez lui ce qui nous a permis de faire confectionner le parachute en même tant que nous avons commandé le reste.

Les formules nécessaires au dimensionnements des éléments de la chaîne parachute sont placées en annexe, ainsi que les dimensions de notre parachute.

1.9.2 Propulsion de la porte

L'ouverture de la porte parachute est effectuée via un servomoteur commandé au moment opportun par le PIC, à savoir la culmination de la fusée.

Il n'y a aucun système qui ne pousse la porte, le servomoteur n'est là que pour libérer un crochet qui évite à la porte de s'ouvrir pendant la montée. Tout le travail de poussée est effectué par la parachute qui plie comme il le faut à tendance à vouloir se déplier et donc à pousser la porte.

Pour être certain de l'extraction du parachute lors de l'ouverture de la porte, il est relié à celle-ci par un morceau de suspente de 20 cm que l'on avait en trop. La porte lors de la

descente de la fusée se retrouveras donc à pendre accroché au parachute, mais cela n'a aucune espèce d'importance.

1.9.3 Minuterie

La minuterie peut être conçue de plusieurs manières différentes avec autant de montage électronique qu'il y a de fusées lancées. Nous avons plutôt opté pour une minuterie faite par le PIC 16F876. nous entendons par là que la minuterie est gérée par le PIC dans son programme et non le fait que nous utilisons le PIC en tant qu'horloge pour stimuler une bascule. Nous avons opté pour ce principe car il nous évitait d'avoir à concevoir un autre circuit électronique et de plus comme expliqué dans la partie PIC, le fait de ne pas nous intéresser aux données une fois le parachute ouvert facilite grandement l'implémentation de la minuterie.

De plus l'avantage de cette technique est la facilité de changement du temps de déclenchement. En effet celui-ci n'est pas connu à l'avance car il dépend des conditions météorologiques du jour de lancement. Avec un circuit électrique ordinaire il faudrait tourner un potard pour avoir la valeur de temporisation donnée, avec toutes les erreurs que ça engage (précision de la mesure de la résistance avec l'ohmmètre,...). Alors qu'avec notre programme, on est capable d'avoir le temps souhaité à la μs près.

Une fois le temps imparti écoulé, le PIC entre dans une boucle sans fin qui commandera le déplacement du servomoteur et fera en sorte qu'il reste dans une position bien déterminée.

Cette idée qui semblait facile sur le papier, nous a posée en fait quelques petits soucis au niveau de la programmation. En effet nous avons dû renoncer à certaines méthodes d'écriture dans l'EEPROM pour avoir la possibilité de connaître exactement le temps mis par le programme pour faire une boucle. De ce fait nous avons perdu un certain nombre de données qu'ils auraient pu être possible d'acquérir.

III. Synthèse, bilan et conseils pour les projets futurs

1. Points important à ne pas oublier

- Une équipe motivée

Le premier point sur lequel il faut insister est l'investissement que nécessite un projet tel que la réalisation d'une fusée expérimentale (en tout cas la première). Les membres d'une équipe sont tous importants et chaque opération est vitale pour le projet. Si une personne vient à ne plus pouvoir participer aux réunions, s'investir et échanger, ou retarder d'une quelconque façon l'avancé du projet, il est clair que celui-ci aura du mal à aboutir... d'où l'importance du chef de projet à pousser ses coéquipiers, et motiver les équipes.

- Importance d'une répartition des tâches

Il est plus facile pour chacun de se motiver sachant précisément ce qui doit être fait et pour quand. Ainsi une répartition des tâches efficaces facilitera le suivi de celles-ci et l'avancé du projet. Il est en effet nécessaire de faire des listes systématiques du travail effectué, du travail à réaliser, et de les relire régulièrement afin de n'oublier aucun détail. La planification du projet est essentielle.

- Des contraintes multiples

Le cahier des charges et la nature même d'une fusée expérimentale implique des contraintes sur des domaines très larges tels que la mécanique, l'électronique, l'intégration, le montage et l'assemblage, la stabilité (position du centre de gravité), l'isolation électromagnétique... Cette multitude de critères définissant la fusée, il est primordial pour le projet qu'existe des temps d'échanges et de confrontation des idées sur ces points. Il ne peut pas y avoir distinction des tâches jusqu'à isoler un membre car chaque mission a des implications sur le reste du projet.

- Une communication primordiale

Le point précédent rend explicite celui là. Il est important de permettre et de forcer les échanges au sein de l'équipe. Les réflexions mêmes particulières devront être abordées avec tout le monde car elles pourront influencer d'autres parties du projet. Il doit y avoir concertation et décisions acceptées par tous.

D'autre part, pour parvenir à une intégration réussie, il est impératif qu'existe une collaboration étroite et précoce entre l'équipe mécanique et l'équipe électronique. Il est impossible de travailler chacun de son côté : cela occasionne toujours des mauvaises surprises qui, par manque de communication, apparaissent très tard, au plus mauvais moment.

- Anticipation

La réalisation ne doit débuter qu'une fois le projet pensé dans sa globalité et dans ses détails.

2. Erreurs à ne pas refaire ou idées à réitérer

2.1 Mécanique

- Réfléchir très tôt aux problèmes d'assemblage et d'intégration :

C'est un point que l'on a un peu négligé et qui nous a occasionné quelques soucis. Cela doit absolument être pris en compte au moment de la conception.

- Mise à jours :

Il est également utile pour le suivi et l'avancement du projet de remettre régulièrement à jour les calculs ou les résultats qu'on a obtenus, en fonction des données complémentaires ou des précisions qu'on a pu avoir.

- Ailerons :

- pas se compliquer la vie pour la fixation des ailerons, des équerres conviennent très bien.
- Pour changer le coefficient de portance il faut jouer sur la hauteur des ailerons, les autres paramètres ne changent quasiment rien.
- Ils doivent arriver au bas de la fusée.

- Structure externe :

- elle doit être d'un seul tenant pour faciliter l'intégration.
- Ne pas utiliser d'emboîtement car ça augmente le problème de flèche.

- Structure interne :

- faire une structure interne modulable de façon à intégrer facilement les expériences.
- Faire une structure porteuse.

2.2 Electronique

- Chaîne générale :

Bien comprendre les différents liens et surtout très rapidement pour commencer les choses sérieuses le plus tôt possible. Il faut avoir une vision globale de la chaîne des capteurs au pc et bien connaître les formes des signaux entre les différents modules.

- **PIC :**

Ne pas perdre de temps sur le choix du pic, en écoutant tous les conseils à droite à gauche mais choisir le mieux dans un temps imparti.

Connaître le fonctionnement global d'un pic et s'entraîner à allumer une led ou faire une conversion analogique numérique en prenant son temps avant de se plonger directement dans le programme final ! Ou alors recruter un expert du pic comme membre de l'équipe ...

➤ **Généralités :**

- Etre rigoureux pour le choix des capteurs par exemple.
- Garder un esprit critique vis-à-vis des conseils et d'où qu'ils viennent.
- Avoir une équipe super motivée et qui ne compte pas son temps. Impératif !
- Décision rapide même si il existe d'autres solutions peut être meilleures. Enfin ça dépend du délai que l'on se fixe.
- Prévoir le double de temps par rapport à l'estimation pour les tests.

Conclusion

Au commencement du projet, nous n'avions aucune idée de l'ampleur que celui-ci prendrait. Nous n'imaginions pas devoir nous investir autant. Cependant, au fur et à mesure que nous avons découvert les facettes multiples sur lesquelles repose la construction d'une fusée expérimentale, l'excitation et l'enjeu ont révélé pour chacun une forte motivation. Ainsi, si le projet a pu aboutir, c'est principalement grâce à la motivation de l'équipe, à l'acharnement de tous pour comprendre et concevoir des systèmes nouveaux.

Au final, que la fusée fasse un vol nominal ou que le système de récupération ou de transmission des données ne fonctionne pas pendant le vol, cette expérience aura été pour nous une source d'enrichissement sans comparaison avec d'autres formes d'enseignement. Devoir s'approprier des nouvelles connaissances dans l'objectif de réaliser concrètement quelque chose nous semble être l'enseignement le plus bénéfique.

Une partie de l'équipe a le désir de continuer à réaliser ce genre de projet l'année prochaine. Ainsi, dès la rentrée une campagne de recrutement aura lieu au sein de toutes les promotions. Les idées émergent déjà et la motivation est toujours d'actualité. Pourquoi pas réaliser une fusée bi-étage l'année prochaine ?

Il est sûr en tout cas que l'expérience acquise par notre équipe facilitera beaucoup la mise en route des projets l'année prochaine. Les prochaines équipes éviteront nos erreurs et pourront s'attacher plus rapidement à la phase de réalisation. Cependant, un projet d'une envergure telle que celui-ci nécessitera dans tous les cas un investissement personnel qui dépassera largement les créneaux dégagés à l'emploi du temps scolaire. La passion sera forcément consommatrice de temps ; aspect qui ne devra surtout pas être négligé lorsque les nouveaux s'engageront dans les projets. En effet, une démission sera pour la fusée un drame car il serait très difficile pour le reste de l'équipe de rattraper le retard et de retrouver les connaissances maîtrisées par la personne démissionnant.

Ce rapport devrait être la source principale d'information pour les prochains projets. Nous avons essayé de rassembler notre expérience entre ces quelques pages dans l'espoir que nos erreurs seront évitées par la suite, et que l'apprentissage nécessaire ne doive pas être repris depuis le début.

Nous espérons donc avoir été clairs et précis. Si toutefois des points n'apparaissent pas dans ce rapport, nous serons toujours disponibles pour les compléter.

Annexe 1

Le projet en quelques chiffres

Le projet Fuz'Mines, c'est aussi :

- **environ 700 mails** échangés sur l'alias fuzmines@emn.fr entre les membres de l'équipe projet et avec nos **quelques 25 interlocuteurs différents** (tuteurs Ecole et *Planète Sciences*, techniciens Ecole, professeurs, fournisseurs, sponsors, ...);
- **environ 400 heures de travail** par membre de l'équipe, réparties sur une trentaine de semaines et consacrées à la fois à la gestion de projet, à la conception de la fusée, aux contacts avec nos différents interlocuteurs, à la réalisation pratique, à la rédaction de différents documents liés au projet, etc. ;
- un **budget global d'environ 2 100 €** recouvrant les frais de participation à la campagne de lancement, l'achat des différents composants électroniques (capteurs, microcontrôleur, composants divers), l'achat et l'usinage des différentes pièces composant la structure interne et externe de la fusée.

Annexe 2

Plans électroniques

Annexe 3

Plans mécaniques

Annexe 4

Calculs théoriques parachute

DIMENSIONNEMENT DU PARACHUTE

Surface du parachute :

$$S = \frac{2 \cdot g}{r \cdot C_x \cdot Vd^2} \cdot M$$

Avec S la surface du parachute [m²]
 r la densité de l'air, environ 1.3 [g/l]
 M masse de la fusée [kg]
 C_x le coefficient aérodynamique du parachute. Constante égale à 1.
 Vd vitesse de descente sous parachute [m/s]
 g l'accélération de la gravité [m/s²]

Force exercée sur le parachute à l'ouverture :

$$F = \frac{1}{2} \cdot r \cdot S \cdot C_x \cdot Vo^2$$

Avec F la force en Newton [N]
 r la densité de l'air, environ 1.3 [g/l]
 S la surface du parachute [m²]
 C_x le coefficient aérodynamique du parachute. Constante égale à 1.
 Vo vitesse de la fusée à l'ouverture du parachute [m/s]

DIMENSIONNEMENT DES AUTRES ELEMENTS

Sangle et émerillon :

$$R = 2.F$$

Avec R résistance de l'émerillon et de la sangle en Newton [N]
 F force exercé sur le parachute à l'ouverture en Newton [N]

Suspentes :

$$R = \frac{2.F}{n.w}$$

Avec F force exercé sur le parachute à l'ouverture en Newton [N]

n nombre de suspentes

2 coefficient de sécurité

w pourcentage de suspente travaillant à l'ouverture (Planète Science préconise de prendre w égale à 0.75, par mesure de sécurité, nous l'avons pris égal à 0.5)

Annexe 5

Calculs théoriques trajectoire et algorithmes

FORMULES GENERALES

Soit $A(t)$ l'avancement suivant l'axe des abscisses au temps t par rapport au temps $t-1$;
Soit $B(t)$ l'avancement suivant l'axe des ordonnées au temps t par rapport au temps $t-1$.

Il va donc s'agir de tracer une courbe paramétrée, de paramètre t , dans un plan (O,X,Z) .
Chacune des étapes de calcul qui suivent sont à réitérer pour tous les temps t , suivant un pas d'itération p de 20 ms.

On a :

$$A(t) = v(t) \cdot p \cdot \cos[i(t)] \quad (1)$$

$$B(t) = v(t) \cdot p \cdot \sin[i(t)] \quad (2)$$

I°) CALCUL DE LA VITESSE AU TEMPS t : $v(t)$

Si $v(t) < 80 \text{ m/s}$:

$$v(t) = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho(t)}} \quad (3)$$

avec P_1 la pression d'arrêt au nez de la fusée, P_2 la pression statique (pression atmosphérique) et $\rho(t)$ la masse volumique au temps t

Si $80 \text{ m/s} < v(t) < 290 \text{ m/s}$:

$$v(t) = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{P_2}{\rho(t)} \left[\left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (4)$$

avec $\gamma = 1,4$: coefficient de compressibilité de l'air

CALCUL DE LA MASSE VOLUMIQUE AU TEMPS t : $\rho(t)$

$$\rho(t) = \rho_0 \frac{20\ 000 - z(t)}{20\ 000 + z(t)} \quad (5)$$

avec $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$ et $z(t)$ l'altitude de la fusée au temps t .

CALCUL DE L'ALTITUDE AU TEMPS T : $Z(T)$

$$z(t) = \frac{10^5}{2,256} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^{\frac{1}{5,256}} \right] \quad (6)$$

$$P_0 = P_{\text{sol}} \left[1 - \frac{2,25}{10^5} \cdot z(\text{Sissones}) \right]^{-5,256} \quad (7)$$

avec $z(\text{Sissones}) = 100 \text{ m}$

ALGORITHME DE CALCUL DE LA VITESSE AU TEMPS t : $v(t)$

A faire une seule fois :

- relever P_{sol} avec un baromètre le jour J sur le pas de tir
- en déduire la valeur de P_0 à l'aide de la formule (7)

A faire à chaque temps t :

- calculer $z(t)$ à l'aide de la formule (6)
- calculer $\rho(t)$ à l'aide de la formule (5)
- tester si $v(t) < 80 \text{ m/s}$ à l'aide de la formule (3)
- si test vrai, calculer $v(t)$ à l'aide de la formule (3)
- si test faux, calculer $v(t)$ à l'aide de la formule (4)

II° CALCUL DE L'ANGLE i AU TEMPS t : $i(t)$

PRINCIPE THEORIQUE

On suppose que la trajectoire est plane, et qu'il y a donc 4 degrés de liberté :

- l'altitude
- l'abscisse
- l'inclinaison
- la rotation propre

- Soit R_0 le repère lié à la terre, noté $R_0 = (\underline{X}, \underline{Z}, \underline{Y})$

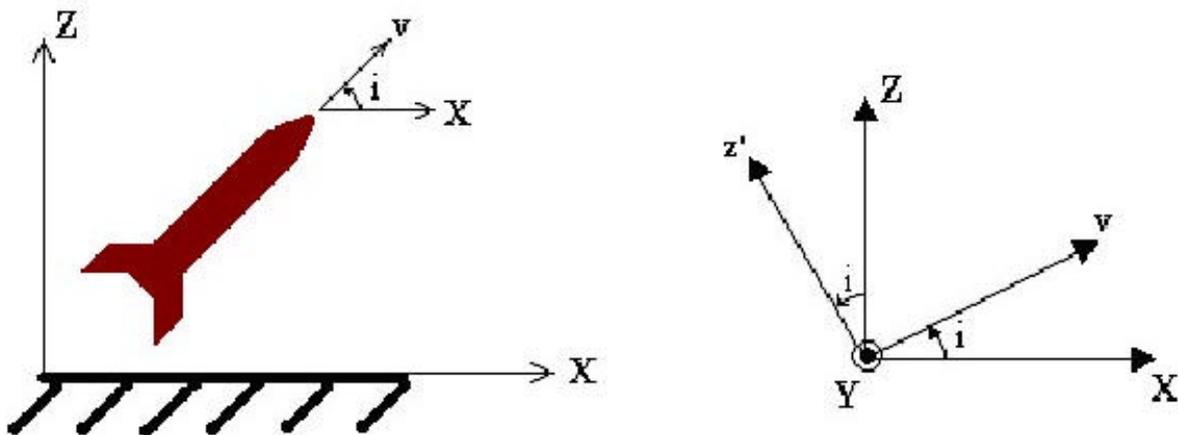
- Soit R' le repère qui s'incline avec la fusée, noté $R' = (\underline{v}, \underline{z}', \underline{Y})$.

On note i l'inclinaison, alors $i = (\underline{X}; \underline{v}) = (\underline{Z}; \underline{z}')$.

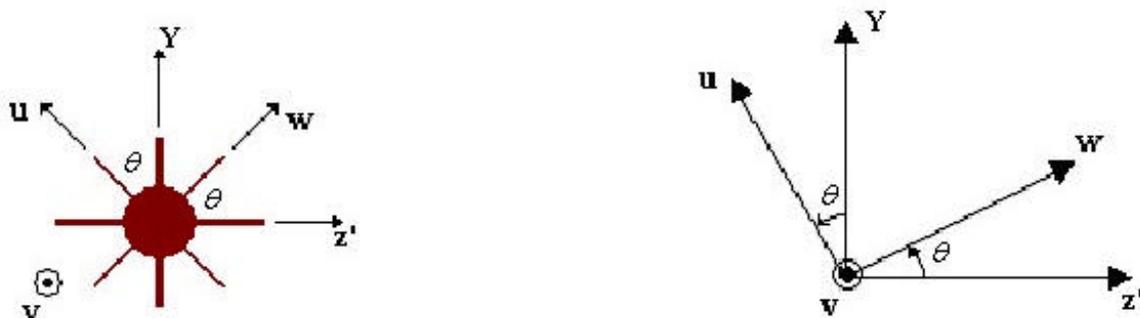
- Soit R_F le repère lié à la fusée, noté $R_F = (\underline{u}, \underline{v}, \underline{w})$.

On note q l'angle de rotation de la fusée sur elle-même, alors $q = (\underline{z}'; \underline{w}) = (\underline{Y}; \underline{u})$.

INCLINAISON DE LA FUSEE PAR RAPPORT A L'HORIZONTALE



ROTATION DE LA FUSEE SUR ELLE-MEME



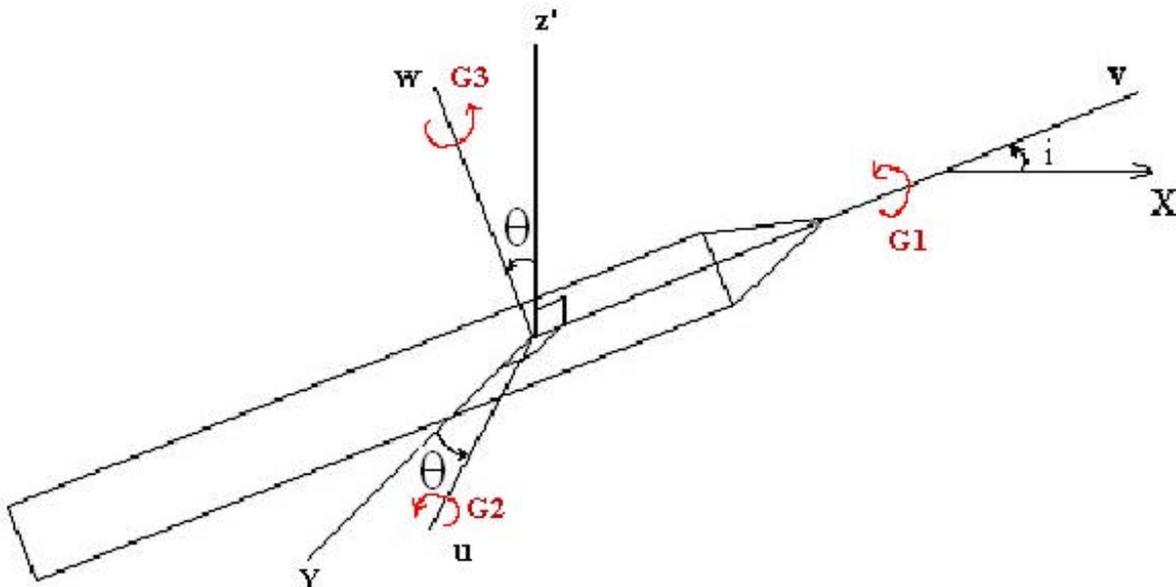
$$\underline{\mathbf{Q}}(R_F / R_0) = \underline{\mathbf{Q}}(R_F / R') + \underline{\mathbf{Q}}(R' / R_0) = q' \underline{\mathbf{v}} + i' \underline{\mathbf{Y}}$$

Or $\underline{\mathbf{Y}} = \cos(\theta) \underline{\mathbf{u}} + \sin(\theta) \underline{\mathbf{w}}$, donc :

$$\underline{\mathbf{Q}}(R_F / R_0) = i' \cos(\theta) \underline{\mathbf{u}} + i' \sin(\theta) \underline{\mathbf{w}} + \theta' \underline{\mathbf{v}}$$

Les gyroscopes ne permettent que de mesurer des rotations par rapport à des axes fixes de la fusée ($\underline{\mathbf{u}}$, $\underline{\mathbf{v}}$, $\underline{\mathbf{w}}$), donc :

- Un premier gyroscope G1 placé autour de l'axe $\underline{\mathbf{v}}$ de la fusée permet d'obtenir le terme θ' .
- Un second gyroscope G2 placé autour de l'axe $\underline{\mathbf{u}}$ de la fusée permet d'obtenir le terme $i' \cos(\theta)$.
- Un troisième gyroscope G3 placé autour de l'axe $\underline{\mathbf{w}}$ de la fusée permet d'obtenir le terme $i' \sin(\theta)$.



On pourrait utiliser seulement deux gyroscopes mais la précision serait moindre :

- La mesure de la rotation autour du vecteur $\underline{\mathbf{v}}$ est la plus évidente. Elle donne θ' , que l'on peut intégrer pour avoir θ .
- L'autre mesure est forcément plus délicate, car les 2 inconnues sont couplées (i et θ interviennent en même temps). Nous pouvons faire la mesure sur le vecteur $\underline{\mathbf{u}}$ ou sur le vecteur $\underline{\mathbf{w}}$. Cela revient strictement au même. Le problème, c'est que si par exemple nous choisissons de faire la mesure sur $\underline{\mathbf{u}}$, alors on mesure en fait $i' \cos(\theta)$, et non pas simplement i' . Nous n'avons pas de problème pour $\cos(\theta)$ assez grand, mais par contre si $\cos(\theta)$ est petit, nous perdons beaucoup en précision. Or on remarque que quand $\cos(\theta)$ est petit, c'est $\sin(\theta)$ qui est grand. Donc en faisant la mesure à la fois sur le vecteur $\underline{\mathbf{u}}$ et $\underline{\mathbf{w}}$, nous calculerons i' en prenant la mesure la plus significative. En l'occurrence, on choisira de prendre l'une des deux valeurs dès que celle-ci devient supérieure à l'autre.

ALGORITHME DE CALCUL DE L'ANGLE i AU TEMPS t : $i(t)$

- faire le zéro de l'angle θ initial, noté $\theta_{ini} = \theta_0$, selon le positionnement de la fusée en rampe
- au temps t :
 - après avoir acquises les valeurs successives de θ' , que l'on peut appeler θ'_i , avec $G1$,
 - on en déduit la valeur θ_t de la manière suivante :

$$\theta_t = \theta_0 + p \sum_{i=1}^t \theta'_i$$

- calculer numériquement $\text{Cos}(\theta_t)$ et $\text{Sin}(\theta_t)$ (*)
- comparer leur valeur et retenir la plus grande des 2
- acquérir les valeurs données par $G2$ et $G3$, i. e. respectivement les valeurs de $i' \text{Cos}(\theta_t)$ et $i' \text{Sin}(\theta_t)$
- Si lors de l'étape (*), c'est $\text{Cos}(\theta_t)$ qui a été choisi, diviser la valeur de $i' \text{Cos}(\theta_t)$ donnée par $G2$ par la valeur de $\text{Cos}(\theta_t)$ pour avoir finalement la valeur de i' ; Si lors de l'étape (*), c'est $\text{Sin}(\theta_t)$ qui a été choisi, diviser la valeur de $i' \text{Sin}(\theta_t)$ donnée par $G3$ par la valeur de $\text{Sin}(\theta_t)$ pour avoir finalement la valeur de i'
- Pour trouver $i(t)$, on opère de la même manière que pour θ_t , i.e. :

$$i(t) = i(0) + p \sum_{u=1}^t i'(u)$$

- répéter ce procédé pour tous les temps t

III°) ALGORITHME DE RECONSTITUTION DE LA TRAJECTOIRE

- à chaque temps t :
 - calculer la vitesse $v(t)$ grâce au 1^{er} algorithme donné ci-dessus
 - calculer l'angle $i(t)$ grâce au 2nd algorithme donné ci-dessus
 - calculer $\text{Cos}[i(t)]$ et $\text{Sin}[i(t)]$ numériquement
 - multiplier $v(t)$ par p et par $\text{Cos}[i(t)]$ selon la formule (1) donnée sur la première page de ce document pour avoir à l'issue de ce calcul la valeur de $A(t)$
 - multiplier $v(t)$ par p et par $\text{Sin}[i(t)]$ selon la formule (2) donnée sur la première page de ce document pour avoir à l'issue de ce calcul la valeur de $B(t)$
 - afficher sur l'écran le point de coordonnées $(A(t); B(t))$ dans le plan (O,X,Z) et tracer le segment joignant ce point au point correspondant au temps $t-1$

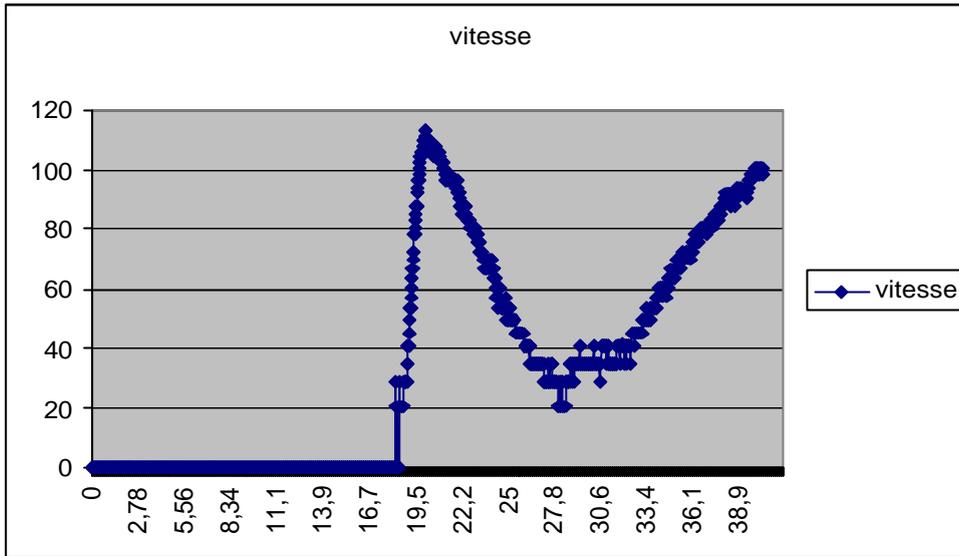
Annexe 6

Schémas électroniques

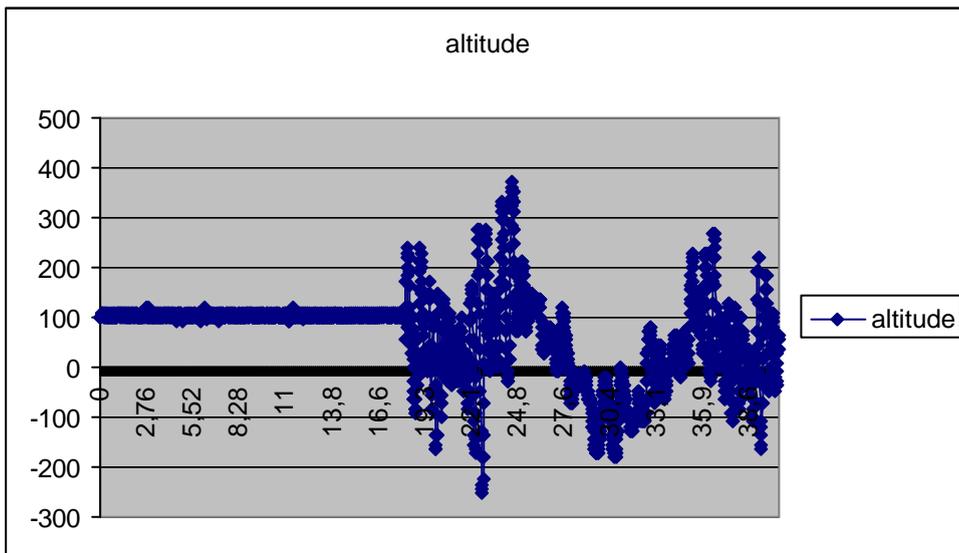
Annexe 7

Chronologie

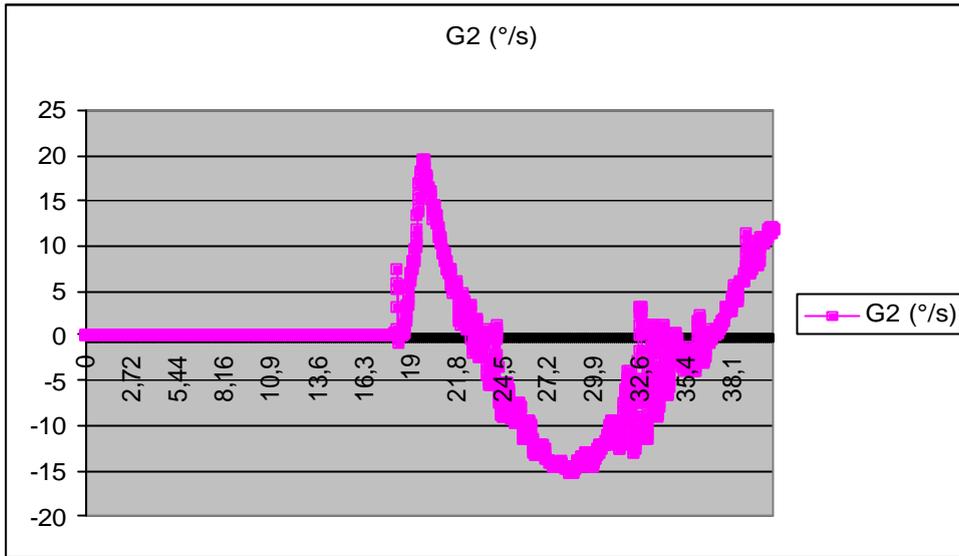
Tableau de vitesse



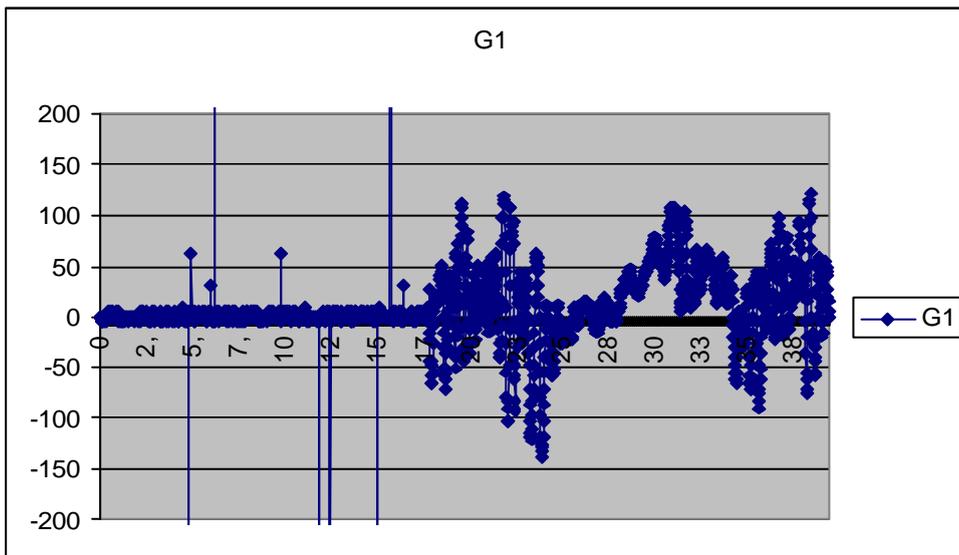
altitude



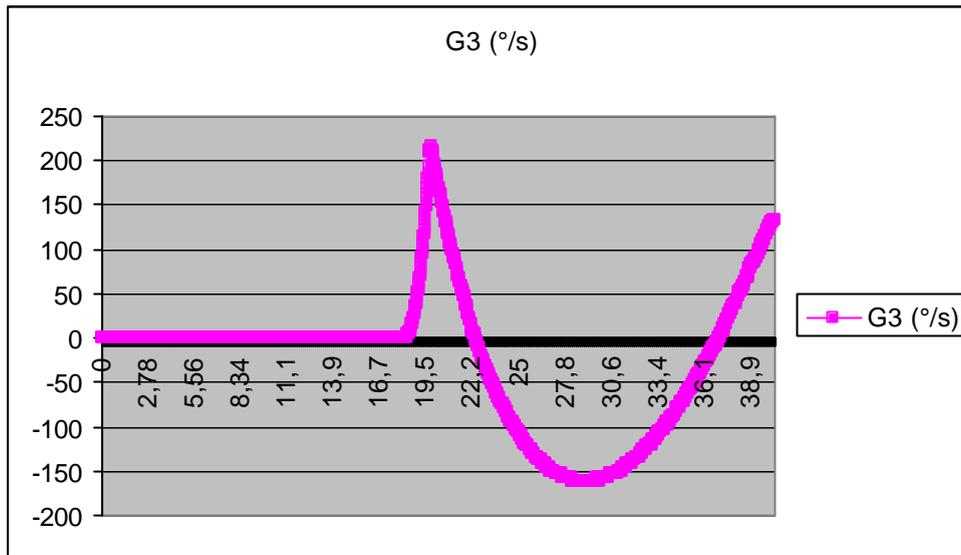
G2



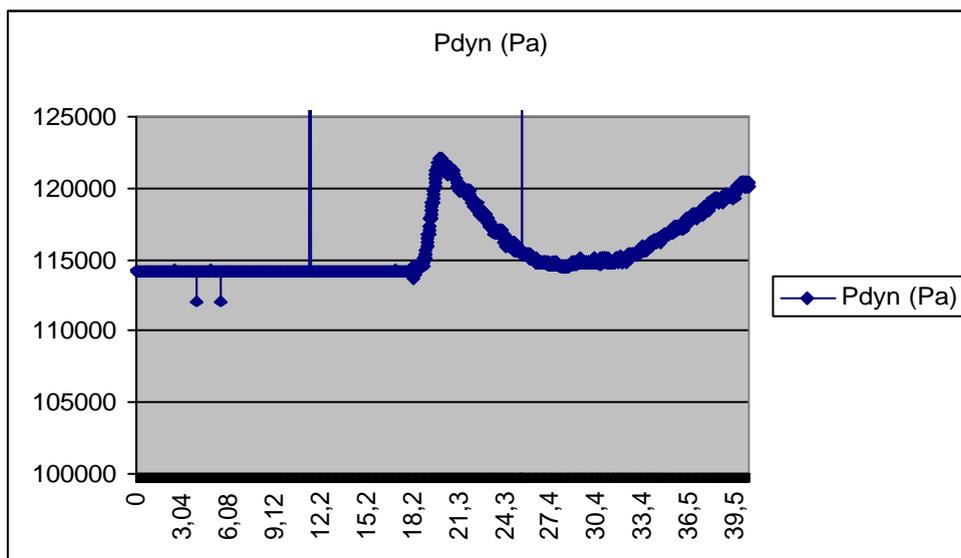
G1



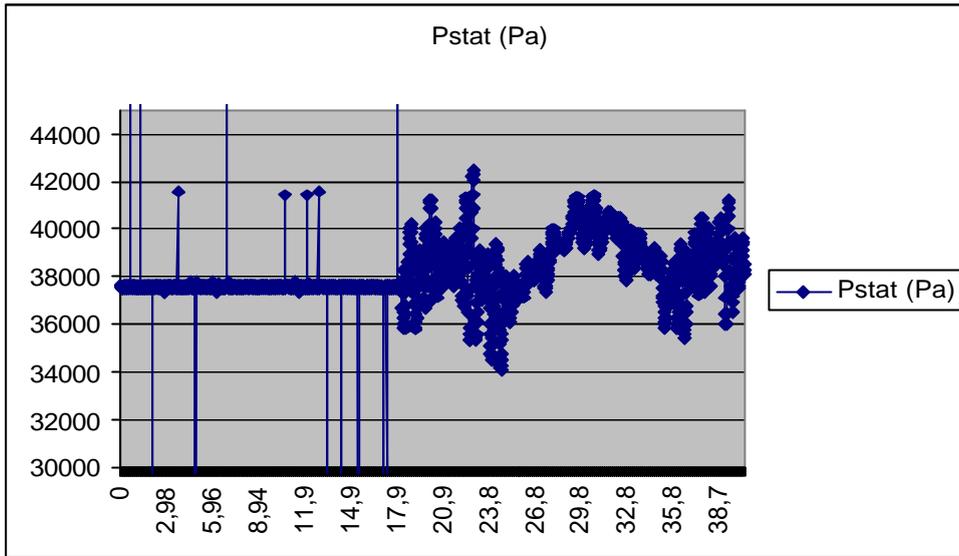
G3



Pdyn



Pstat



inclinaison

