



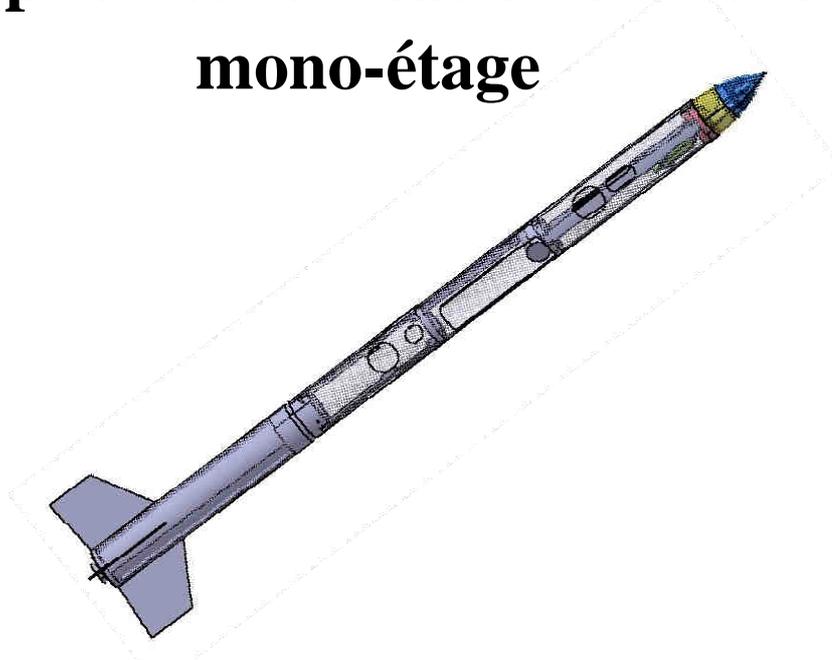
ECOLE CENTRALE PARIS

COMPTE-RENDU DE LANCEMENT
FUSEX SHEHERAZADE - 2008

Arthur Droit
Eric Joffre
Marc Locheron

	<p>PROJET</p> <p>2^{ème} année</p>	<p>N° du projet : 9086</p> <p>Date : 06/2008</p> <p>Promotion 2009</p>
---	--	--

Conception et réalisation d'une fusée mono-étage



<p>Élèves participant au projet :</p> <p>DroitArthur</p> <p>Joffre Eric</p> <p>Locheron Marc</p>		<p>Encadrants :</p> <p>Fiorina Benoît</p> <p>El Ghazi Samira</p> <p>Walton Alain</p> <p>Jean-Bart Erika</p>
--	--	--

Projet 9086
Conception d'une fusée expérimentale mono-étage

RAPPORT FINAL



DROIT Arthur

JOFFRE Eric

LOCHERON Marc

Ecole Centrale Paris

Année 2007-2008 - Promotion 2009

Sommaire

Remerciements	4
Résumé.....	5
Abstract	6
I- Présentation du projet dans son contexte	7
I-1 Un projet ambitieux entamé l'an passé	7
I-2 Etat du projet en début d'année	10
II- Présentation de la réalisation de nos objectifs	13
II-1 L'électronique, élément essentiel pour pouvoir faire décoller la fusée	13
II-2 Conception du parachute.....	17
II-3 Divers éléments de finalisation	19
II-4 Expériences additionnelles.....	20
III- Organisation du travail.....	22
III-1 Le travail en groupe.....	22
III-2 Adaptation de l'organisation de l'équipe tout au long de l'année	22
III-3 Planning.....	22
III-4 Financement.....	23
III-5 Sécurité.....	29
III-6 Difficultés rencontrées	29
III-7 Compétences acquises, enseignements	30
Annexes.....	32

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Mr Benoît Fiorina pour la confiance qu'il nous a accordée tout au long du projet, pour ses conseils avisés qui ont su nous éviter quelques pièges et nous ont permis de sortir de quelques impasses, et pour le recul qu'il nous a permis de prendre afin de ne pas nous écarter des objectifs.

Nous remercions tous les bénévoles de Planète Science qui nous ont prêté main forte en de nombreuses occasions des débuts de la conception jusqu'au lancement de la fusée. Nous remercions plus particulièrement Clément Marion, notre référent, contact privilégié au sein de l'association.

Nous adressons toute notre gratitude envers Mme Samira El Ghazi et M. Alain Walton qui ont toujours répondu avec enthousiasme à nos sollicitations. Ils ont patiemment continué à apporter leur aide au projet Fusex, comme ils l'ont fait l'an dernier. Nous remercions également Mme Erika Jean-Bart, qui a fait un travail considérable sur la partie mécanique l'an dernier, et qui cette année, s'est toujours montrée disponible et intéressée par notre progression.

Nous exprimons également notre reconnaissance envers tous les membres des laboratoires EM2C et LISA. Ils ont toujours montré beaucoup d'intérêt pour notre projet et n'ont jamais hésité à nous proposer leur aide. Leur compagnie agréable a fait de ce projet une expérience plaisante à vivre tout au long de sa réalisation.

Nous tenions également à remercier le Club 92, la Direction des Etudes de l'Ecole Centrale et l'association d'élèves Air Piston qui ont placé leur confiance en nous en participant au financement de notre projet.

Enfin nous remercions toutes les personnes qui ont aimablement contribué au bon déroulement de ce projet.

Résumé

Engagé l'année passée par un groupe de cinq élèves, le projet fusée Shéhérazade arrive à son aboutissement. Son objectif ultime, le lancement de la fusée sur le centre d'essais militaires de la Courtine et l'interprétation des mesures faites en vol, sera accompli début août 2008, marquant ainsi la fin d'une expérience extraordinaire que nous avons vécue tout au long de l'année.

Celle-ci aura été l'occasion pour nous de mettre nos connaissances théoriques au profit de la réalisation concrète d'un objet complexe, et d'enrichir notre formation de nouvelles compétences scientifiques et techniques. Mais d'une manière peut-être plus importante encore, elle nous a permis de découvrir le milieu de la recherche sous un œil nouveau, en rencontrant certains de ses acteurs. Le triple encadrement du laboratoire EM2C, de l'association planètes sciences, et du CNES a constitué un cadre idéal pour faire connaissance avec le secteur aéronautique qui nous passionne tous les trois. Les personnes que cette expérience nous a amené à rencontrer ont toujours fait preuve d'une extrême assistance lorsque nous avons fait appel à eux. Enfin, les difficultés liées à la réalisation d'un projet de longue durée, première expérience du genre pour nous, ont été riches d'enseignement en matière d'organisation et de planification du travail, de recherches de subventions, et de communication, autant d'aspects qui seront essentiels dans notre vie professionnelle future et que seule l'expérience permet de développer.

Le présent rapport a pour objectif de présenter le travail que nous avons effectué tout au long de l'année. Nous y exposerons de la manière la plus précise possible les difficultés rencontrées, les solutions envisagées, et les comparerons avec celles que nos prédécesseurs avaient imaginées. Le lecteur trouvera les développements de notre discours dans les annexes et se reportera au rapport technique pour un aperçu plus exhaustif de la réalisation concrète de notre prototype, de manière à faciliter la lecture du présent rapport, dont nous vous souhaitons la lecture agréable.

Abstract

Initiated last year by a group of five students, the rocket project Shéhérazade has come to an end. Its ultimate objective - the launching of the rocket on the military base of La Courtine, along with the interpretation of the results of the embedded experiments – is to be accomplished in early August 2008, thus marking the end of an extraordinary experience which we lived throughout the year.

This has been the occasion for us to put our theoretical knowledge to the conception of a complex object, and to enrich our education by new scientific and technical skills. But in an even more important way, it enabled us to discover the field of research from a completely new point of view and to be introduced to some of its protagonists. Triple supervision of EM2C laboratory, Planète sciences association, and space French research centre CNES accounted for an ideal framework to learn about the aeronautics sector, which the three of us have a passion about. The people that this experience led us to meet always showed real obligingness every time we called upon them. Finally, the difficulties related to the realization of a long duration project – the first experience of such kind for us – taught us much about work planning, fund raising, and communication, as many aspects which will be essential in our future professional life, and which only the experiment makes it possible to develop.

This report is aimed at presenting the work we carried out throughout the year. It will expose the difficulties we encountered, the solutions we gave to them, in comparison to those that our predecessors had imagined. Details that feed our speech are deferred to appendixes and a more detailed presentation of the concrete accomplishment of our prototype will be found in the technical report, in order to ease the reading of the present one, which we hope that you will enjoy the reading.

I- Présentation du projet dans son contexte

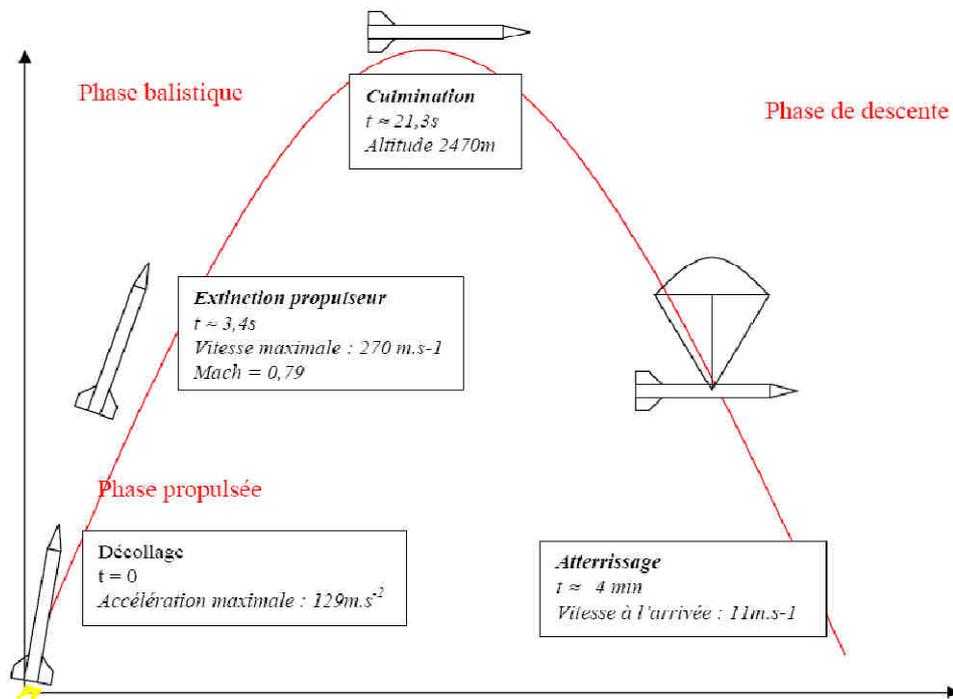
I-1 Un projet ambitieux entamé l'an passé

Présentation du projet

Le projet que nous avons repris cette année avait été commencé par 5 camarades l'an dernier. Les grandes lignes de son objectif n'ont pas changé : concevoir une fusée expérimentale, apte à voler et embarquant une ou plusieurs expériences embarquées. En parallèle de l'encadrement de Benoît Fiorina du laboratoire EM2C, il est soutenu et encadré par les bénévoles de l'association Planète Sciences, qui nous ont fourni une aide technique et défini un cahier des charges précis, ainsi que par le CNES, qui, sous réserve de respect de ce dernier, met gratuitement à notre disposition un propulseur à poudre. Comme nous l'avons précisé en introduction, le lancement de la fusée est prévu début Août sur le centre d'essais militaires de la Courtine.

Le vol de la fusée en deux mots

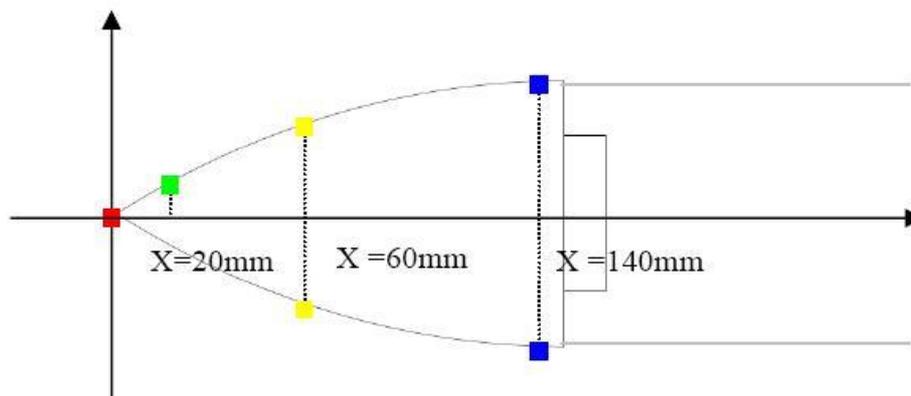
Avant de décrire plus en détail les caractéristiques précises de la fusée et des expériences qu'elle embarque, nous exposons rapidement ici les différentes étapes du vol de la fusée qui ont conditionné toute la réalisation pratique de celle-ci. La figure ci-dessous, tirée du rapport de l'an dernier détaille ces différentes phases :



- Pendant la première phase du vol, d'une durée approximative de 3 secondes, la fusée, propulsée par le moteur à poudre du CNES, quitte la rampe de lancement installée avec une inclinaison dont l'angle dépend essentiellement des conditions de vent. D'une poussée moyenne de 570 N, le propulseur communique à la fusée une vitesse approchant les 270 mètres par seconde, soit Mach 0,79, sa vitesse maximale.
- La phase suivante est la phase balistique où la fusée n'est plus soumise qu'à la force de gravité (et aux frottements de l'air), et devrait atteindre une altitude maximum avoisinant 2500 mètres, quelques 20 secondes après le décollage.
- La phase de descente est alors amorcée, ralentie considérablement par l'ouverture du parachute, prévue pour advenir à culmination. Les caractéristiques du parachute que nous avons conçu cette année ont été calculées pour une vitesse de descente d'environ 10 m/s. La trajectoire est alors fortement dépendante du vent et il est très difficile de prévoir la zone de récupération de la fusée. On estime cependant que celle-ci touchera le sol environ quatre minutes après le décollage, dans un périmètre pouvant aller jusqu'à trois kilomètres.

Notre expérience

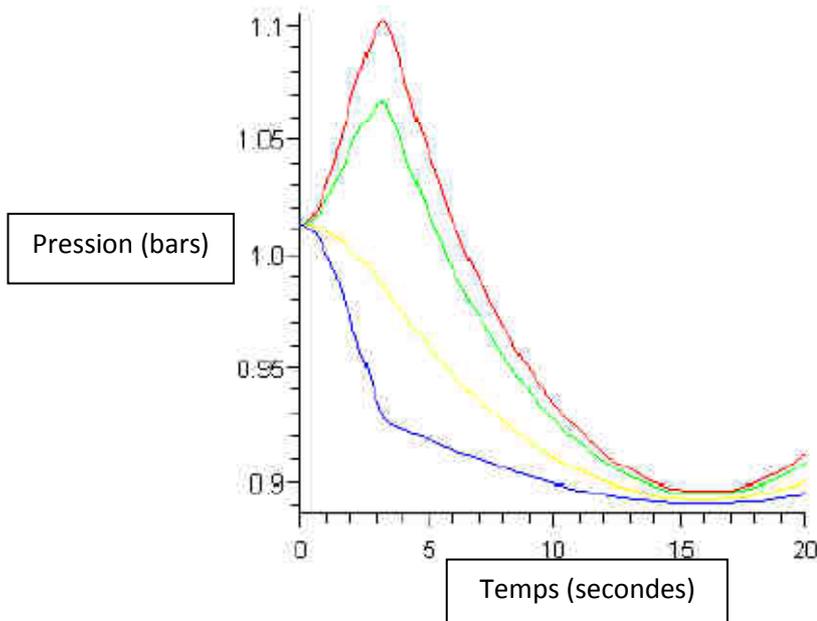
L'objectif principal de notre projet, et la première condition spécifiée par Planète sciences pour autoriser le lancement, est la réalisation d'une expérience embarquée. Après avoir envisagé plusieurs possibilités, nos prédécesseurs avaient choisi de mesurer la pression en différents endroits de l'ogive, par l'intermédiaire de 6 capteurs.



Position des capteurs

Le capteur rouge, placé en tête d'ogive, joue le rôle d'un tube de Pitot. Il permet donc, par simple application du théorème de Bernoulli, la mesure de la vitesse (axiale) de la fusée. Les 5 autres sont placés en différents points de l'ogive, afin de pouvoir déterminer les caractéristiques de l'écoulement autour de celle-ci. L'établissement des courbes théoriques d'évolution de la pression mesurée par ces six capteurs effectué l'an dernier, à la fois par les membres du projet fusex 2007, et par un élève de notre promotion y ayant consacré une étude en autonomie, rend possible leur comparaison avec les résultats que nous obtiendrons après récupération des données en vol.

Voici l'allure des courbes théoriques obtenues par application à notre étude de la théorie des corps élanés, à mettre en regard avec le schéma précédent pour la couleur des courbes, et avec la figure donnant la trajectoire de la fusée pour l'évolution temporelle :



En plus de ces 6 capteurs, notre fusée embarque un accéléromètre uniaxe placé dans l'alignement de la fusée. L'accélération mesurée par cet accéléromètre pourra être intégrée numériquement pour obtenir la vitesse axiale de la fusée. Nous pourrions donc comparer la vitesse donnée par les mesures accélérométriques à celle obtenue par interprétation des mesures de pression effectuées par le tube Pitot.

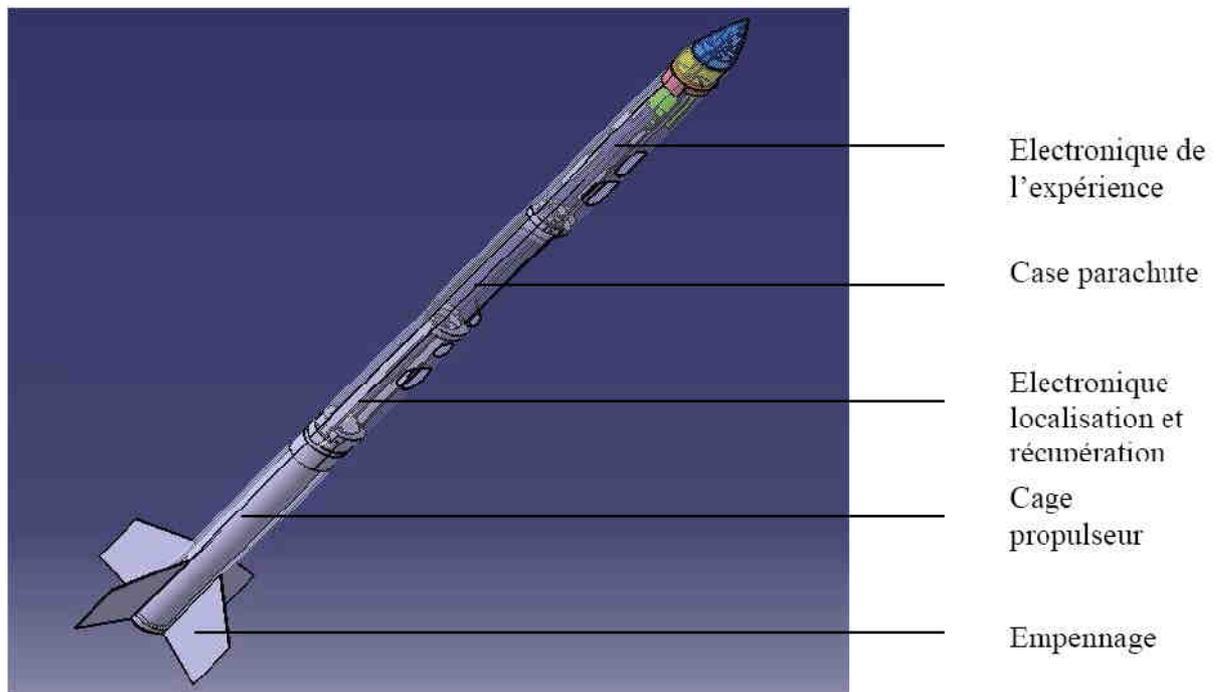
Les mesures prises par les 6 capteurs et l'accéléromètre sont transmises au sol en temps réel, grâce à une transmission radio, après un traitement électronique du signal dont le détail est donné plus bas.

La solution technique retenue

On peut considérer notre fusée comme l'assemblage des éléments suivants :

- Une structure mécanique porteuse figée
- Un système électronique assurant l'acquisition des mesures de pression et d'accélération, et leur transmission radio
- Un système de déclenchement du parachute
- Le parachute lui-même et les éléments le reliant à la fusée
- Un propulseur à poudre

Voici un schéma qui montre l'emplacement de ces différents éléments :



Caractéristiques générales de la fusée :

Masse avant décollage : 6,5 kg

Hauteur totale : 1,66 m

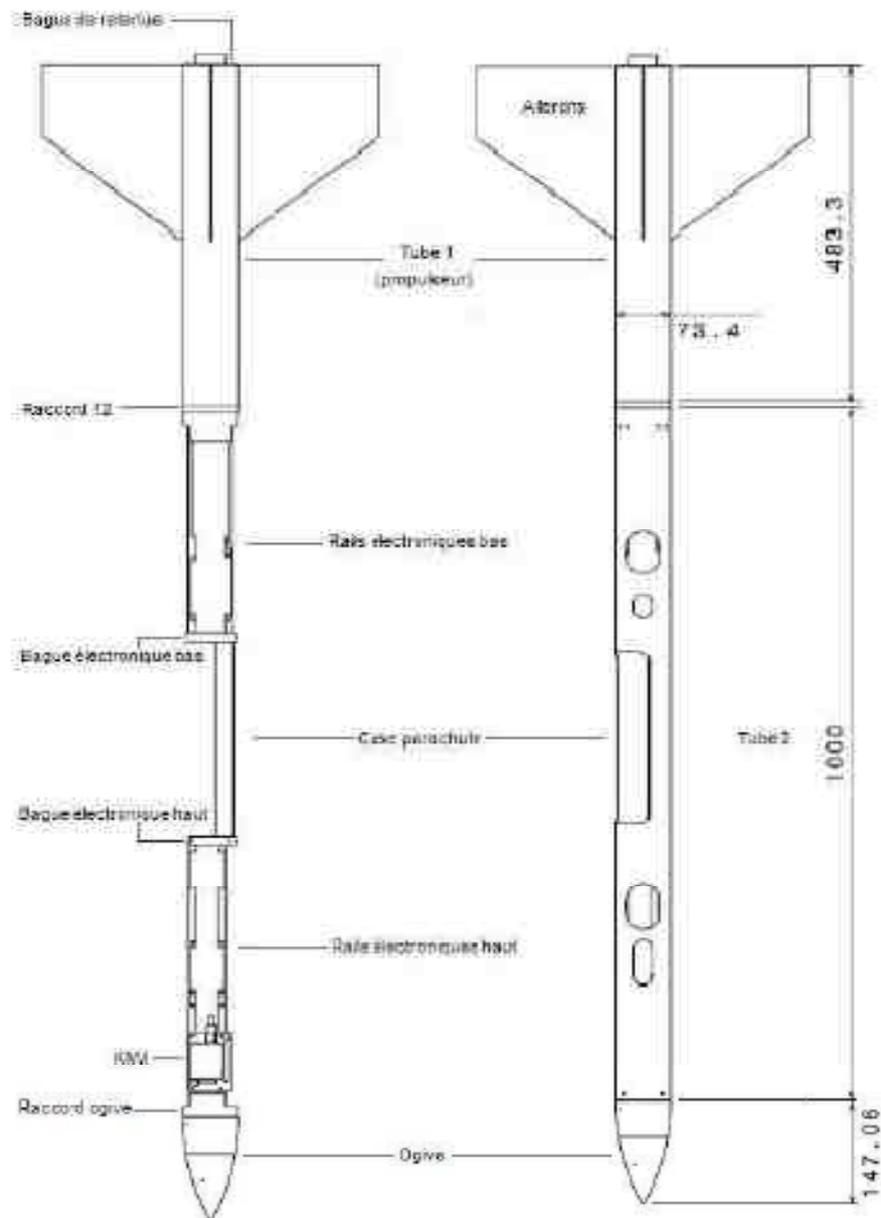
Diamètre extérieur : 73 mm

I-2 Etat du projet en début d'année

Ce qui avait déjà été réalisé l'an dernier

Partie mécanique

La conception et la réalisation de la structure mécanique de la fusée avait constitué la plus grande partie du travail effectué par les élèves ayant commencé le projet l'an dernier. L'ensemble des éléments majeurs de la fusée avaient ainsi été conçus d'une manière tout à fait correcte. La figure suivante en représente les principaux éléments, avec et sans le tube 2 masquant les « rails » sur lesquels les différentes cartes électroniques sont fixées.



La fusée avait été pour cela été modélisée à l'aide du logiciel de CAO CATIA, suite à quoi les différentes pièces avaient été usinées, grâce à l'aide précieuse d'Erika et Alain :

- **L'ogive** : élément le plus important de la fusée (puisque comportant les entrées d'air des capteurs), elle a été conçue à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, par dépôts successifs de fils de plastique chauds
- **Le tube 2** : situé juste en dessous de l'ogive, il a été récupéré d'une précédente fusée. Il est en aluminium et contient deux séries de rails, l'une supportant l'électronique de l'expérience, l'autre celle de la récupération, ainsi que la case parachute. Il comporte plusieurs trous qui permettent d'accéder aux cartes électroniques, ainsi que le spécifie le cahier des charges de Planète-Sciences. Ce tube comporte aussi une trappe permettant l'éjection du parachute.

- **Le tube 1** : situé en bas de la fusée, il a été acheté à l'entreprise WEBER Matériaux. Comme le tube 2, il est en aluminium.
- **Les ailerons** : Conçus eux aussi à l'aide du logiciel CATIA et dimensionnés grâce à des modélisations sous Maple et au logiciel « Trajec » (développé et fourni par Planète-Sciences), ils ont été découpés dans de l'aluminium puis redressés. Ils ont ensuite été collés sur le tube 1.

Partie électronique

Le schéma général de l'électronique avait été conçu l'an dernier. Il est constitué de deux parties indépendantes :

- La chaîne de mesure de l'expérience, permettant le traitement du signal envoyé par les capteurs et son envoi par télémesure grâce au « KIWI », émetteur fourni par Planète sciences.
- Le dispositif permettant l'ouverture de la trappe du parachute.

Les cartes avaient été dessinées à l'aide du logiciel Eagle et fabriquées par le laboratoire LISA. En revanche, elles n'avaient pas été correctement testées.

Ce qu'il nous restait à faire

La majeure partie de notre travail cette année a été de rendre fonctionnelle la partie électronique. En effet, si les cartes électroniques avaient été imprimées l'an dernier, elles n'avaient été que peu testées et aucune ne fonctionnait vraiment correctement. Nous les avons donc reprises une à une, les avons modifiées et faites refaire par le laboratoire LISA quand cela était nécessaire. Enfin, nous avons vérifié leur fonctionnement, prises séparément, et une fois qu'elles étaient reliées entre elles.

Une grosse partie du travail à accomplir cette année consistait en la programmation et le test du microcontrôleur PIC, dont la fonction est de numériser les données et de les ordonner en trames. Un programme avait en effet été commencé l'an dernier mais il n'avait pas été finalisé ni testé.

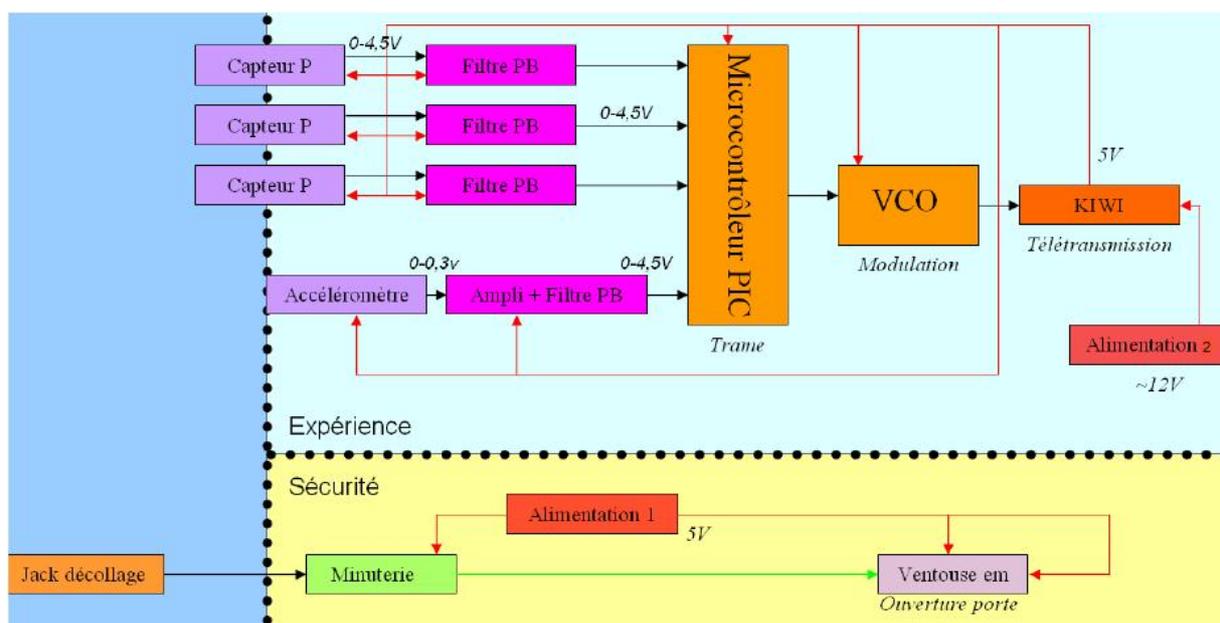
Par ailleurs, le dispositif d'ouverture de la trappe du parachute était également à refaire. Ce dernier, trop volumineux, serait sans doute resté coincé dans la fusée même en cas d'ouverture correcte de la trappe. Nous devons donc concevoir un parachute aux bonnes dimensions pour retenir la fusée pendant sa chute, se déployant convenablement à l'ouverture de la trappe et ne prenant pas trop de place au sein de la fusée.

II- Présentation de la réalisation de nos objectifs

II-1 L'électronique, élément essentiel pour pouvoir faire décoller la fusée

L'électronique ayant constitué la plus grande partie de notre travail cette année, la description de tous les problèmes rencontrés, des solutions que nous y avons apportés, et de la réalisation pratique des cartes jusqu'à leur intégration dans la fusée, pourrait composer la quasi-intégralité de notre rapport, rendant ce dernier assez peu lisible. C'est pourquoi nous avons décidé de reporter les considérations purement techniques à un autre rapport, dit « technique » détaillant les aspects expérimentaux de notre travail. Le présent paragraphe a pour objectif de décrire de la manière la plus claire possible les différentes étapes de traitement du signal permettant au final la transmission des données expérimentales au cours du vol.

Présentation de la chaîne de mesure



Pour mener à bien la chaîne de mesures relative à l'expérience, nous utilisons 4 cartes électroniques :

- la carte des capteurs, sur lesquels parviennent les arrivées d'air
- la carte des filtres et de l'accéléromètre
- la carte du microcontrôleur PIC et du VCO
- la carte de l'émetteur « Kiwi ».

Le but de cette chaîne de mesure débutant par la prise des mesures analogiques de pression et d'accélération, est de traiter ces signaux grâce aux filtres puis de construire une trame

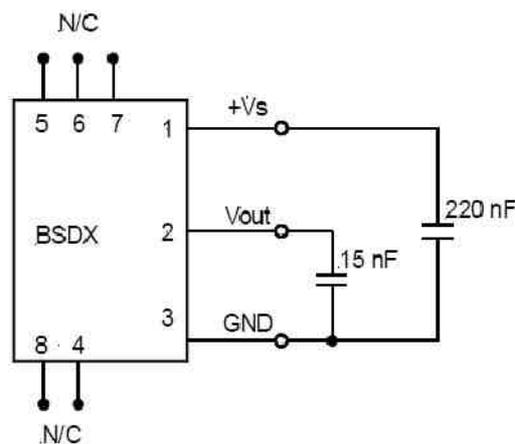
numérique à l'aide du PIC. Enfin ce nouveau signal est modulé en fréquence par le VCO avant d'être envoyé au sol par télémétrie à l'aide du télétransmetteur Kiwi, fourni par Planète Sciences lors de la campagne de lancement sur le site de La Courtine.

D'autre part, la réalisation du système de récupération nécessite également l'introduction dans la fusée d'une carte électronique. C'est une minuterie qui déclenche l'ouverture de la trappe du parachute à l'apogée du vol de la fusée.

a) Carte des capteurs

La carte des capteurs est essentiellement composée de six pressiomètres, correspondant aux différents points de prise de pression, tels que présentés dans le paragraphe précédent.

Elle a dû être refaite car il existait de nombreux faux contacts et car il manquait des condensateurs de découplage près de certaines pattes des capteurs. De tels condensateurs sont destinés à éviter d'abîmer le capteur en cas de brusque variation de tension, et s'ils ne sont pas obligatoires, ils sont très fortement conseillés. D'ailleurs, leur présence est spécifiée dans le document de données constructeurs, dont le schéma ci-dessous est extrait.



En sortie de cette carte, on obtient sur des pistes différentes six valeurs de tension, proportionnelles aux pressions mesurées par les différents capteurs.

b) Carte des filtres et de l'accéléromètre

- Filtres

Le but de ces filtres est d'éviter le repliement du signal. En effet, d'après le théorème de Shannon, l'échantillonnage doit être deux fois plus rapide que la vitesse de variation du signal. On le filtre donc de manière à ce qu'aucune fréquence ne soit supérieure à la moitié de la fréquence d'échantillonnage. Pour cela, on utilise un simple montage de filtre passe-bas avec une résistance et un condensateur par piste.

La carte des filtres avait été réalisée l'an dernier mais nous y avons décelé une erreur substantielle, probablement due à une simple erreur d'étourderie :

La gamme de fréquences filtrées est déterminée par la valeur du rapport $\frac{1}{RC}$, qui définit la pulsation de coupure du filtre. Les composants initialement soudés sur la carte étaient tels que la fréquence de coupure était complètement différente de celle souhaitée. Nous avons fini par remarquer qu'elle en valait en fait exactement l'inverse, ce qui nous a amené à considérer que le groupe précédent avait considéré la formule erronée $\omega = RC$, au lieu de $\omega = \frac{1}{RC}$.

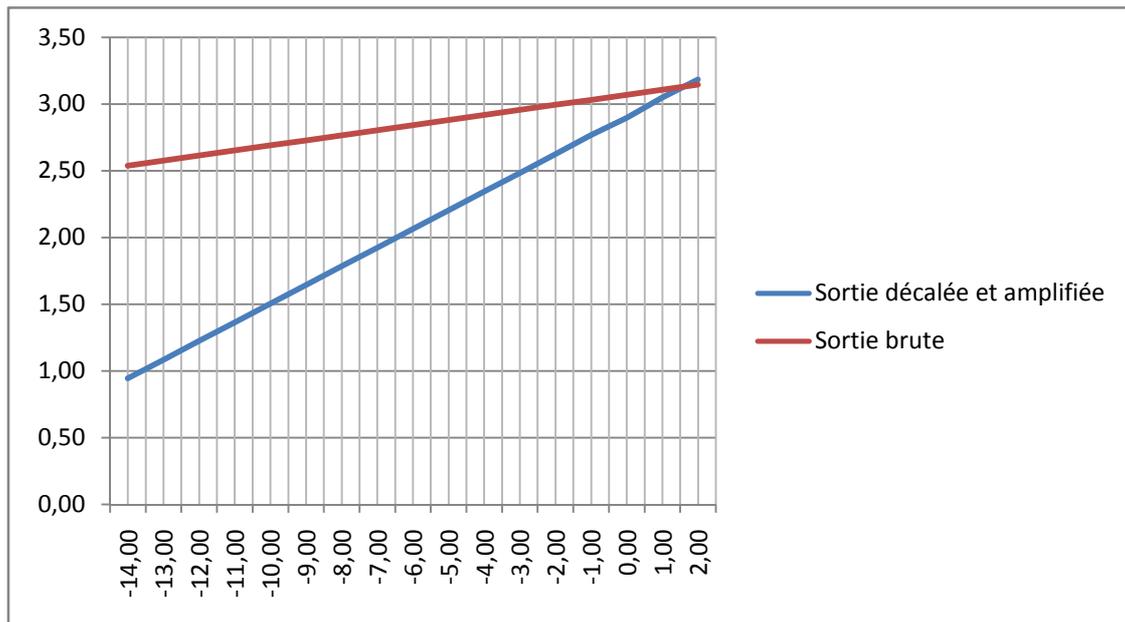
- Accéléromètre

Le montage de l'accéléromètre ne fonctionnait pas en l'état. Nous l'avons donc modifié et en avons profité pour amplifier et décaler le signal de sortie de manière à optimiser la gamme d'accélération mesurable. En effet, les composants utilisés de manière brute permettent de mesurer des accélérations comprises entre -50g et +50g, avec une sensibilité d'environ 38 mV/g. Or dans le cas qui nous concerne, les accélérations mesurées varient entre -14g pendant la phase propulsée à une valeur que l'on a estimé pouvoir atteindre jusqu'à +1g à cause de la décélération due aux frottements. L'utilisation que nous faisons du capteur d'accélération ne nécessite donc pas le quart de l'étendue de mesures qu'il permet, au prix d'une sensibilité trop faible pour les variations d'accélération que nous nous attendons à observer.

NB : l'accélération effectivement mesurée est en réalité $\mathbf{a} - \mathbf{g}$, projeté sur l'axe du capteur, orienté dans le sens ogive- ailerons, d'où le signe - pour l'accélération mesurée durant la première phase : mesure = $(13g \mathbf{e}_z - (-g \mathbf{e}_z)) \cdot (-\mathbf{e}_z) = -14g$, où l'on ne tient pas compte de l'inclinaison initiale de la fusée.

Le décalage et l'amplification en sortie de l'accéléromètre nous permettent d'améliorer ceci, en utilisant un montage que nous avons décrit et expliqué dans le rapport technique. Au final, on obtient grâce à ce montage une sensibilité de 140 mV/g soit quatre fois plus qu'en utilisant l'accéléromètre brut.

On représente sur le graphe ci-après la comparaison entre le signal de sortie avec (bleu) ou sans (rouge) ce traitement du signal de l'accéléromètre. Nous ne pouvions pas amplifier le signal de manière plus importante dans la mesure où la sortie effective est une sortie d'amplificateur opérationnel qui sature à 0 Volts (saturation basse) et 3,7 Volts (saturation haute) lorsqu'il est alimenté en 5 Volts, ce qui restreignait les valeurs à cet intervalle. On lit sur le graphique l'accélération en unités de g en abscisse et la tension en Volts en ordonnée.



c) Carte PIC – VCO

En sortie de la carte des filtres, on a donc désormais les six signaux correspondant aux mesures de pression, filtrés, ainsi que le signal d'accélération, soit au total sept tensions analogiques contenant les mesures de nos diverses expériences. Pour pouvoir exploiter ces mesures, il faut les convertir dans un format bien spécifique permettant leur transmission au sol. C'est justement le but de la carte PIC-VCO.

- Microcontrôleur PIC

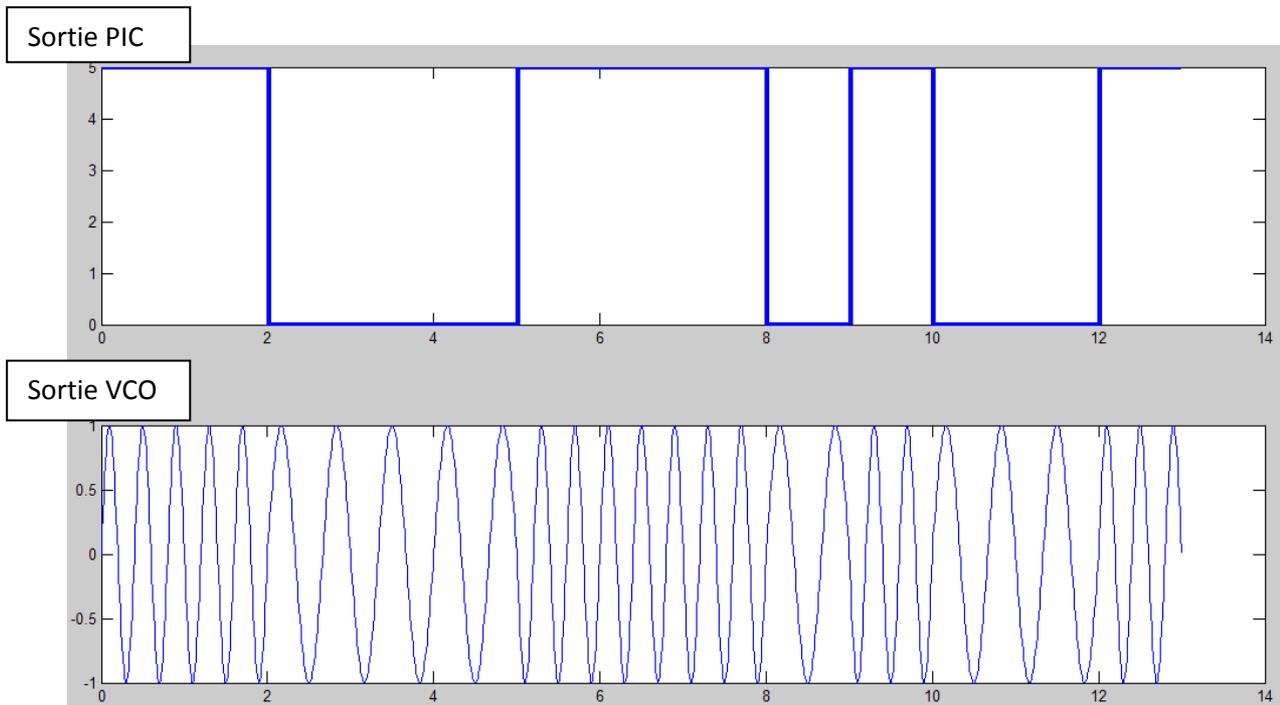
Le microcontrôleur PIC numérise et organise en trames les données qu'il reçoit en entrée selon une méthode que nous pouvons choisir en le programmant. Il n'a donc qu'une seule sortie, dont les seules valeurs possibles sont 0V (0 numérique) et 5V (1 numérique).

Comme nous l'avons précisé plus haut, le programme du microcontrôleur avait été écrit l'an passé, mais non testé, notamment à cause du fait que les cartes électroniques en amont de cette dernière ne fonctionnaient pas correctement. Cependant, l'ensemble de la carte ayant été correctement réalisé, nous n'avons pas jugé nécessaire de refaire celle-ci.

- Modulateur de fréquence VCO

La fonction du VCO, utilisé en mode modulateur de fréquence, est de convertir les créneaux de 0V en un signal sinusoïdal de fréquence 9kHz et les créneaux de 5V en signal sinusoïdal de fréquence 15 kHz. Ces deux fréquences correspondent à un standard pour les émetteurs-récepteurs de Planète Science et il est très important qu'elles soient très précisément établies. A nouveau produites à partir d'associations de condensateurs et résistances en série, ces deux fréquences ont donc été ajustées

pour se rapprocher le mieux possible des valeurs idéales. Finalement la fréquence haute obtenue est de 14,95 kHz, et la fréquence basse de 8,98kHz, ce qui nous situe largement dans la marge d'erreur acceptable fixée à 2%.



II-2 Conception du parachute

Fabrication de la toile de parachute

Comme nous l'avons expliqué plus haut il est impératif que la fusée soit munie d'un système destiné ralentir sa chute, et qui se déploie au sommet de sa trajectoire. L'équipe de l'an passé avait déjà récupéré un parachute hémisphérique qui devait équiper la fusée bi-étage de l'année précédente. Ce dernier était surdimensionné pour notre fusée mono-étage, et encomrait inutilement l'intérieur du fuselage. C'est pourquoi nous avons choisi cette année de fabriquer un parachute cruciforme qui, d'une part est plus compact par sa forme (voir annexe I pour le comparatif parachute hémisphérique-cruciforme), et par ses dimensions (puisque conçu pour notre fusée contrairement au précédent), et d'autre part est plus fiable en cas d'ouverture à grande vitesse.

Nous avons récupéré des chutes de toile de spi au club voile de Centrale. Le parachute étant un élément de sécurité central, nous avons confié sa confection à partir de nos plans à une professionnelle de la couture (Lucinda Couture à Antony).

Nous avons également gagné une place considérable dans la case parachute en optant pour des suspentes en kevlar qui présentent une rigidité inégalable pour un encombrement minimal.

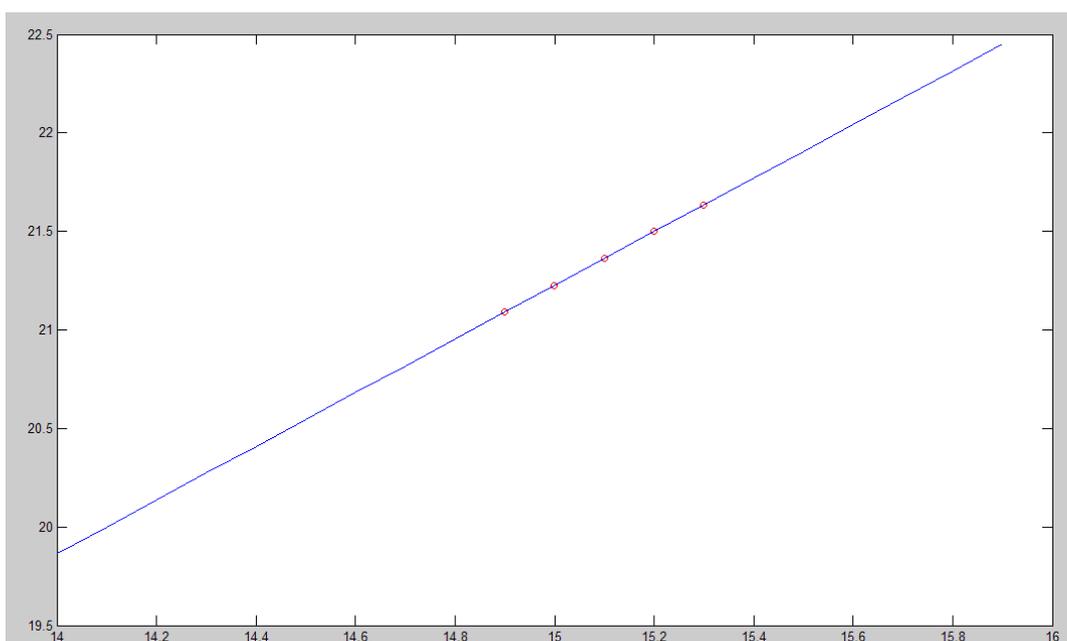
Le gain de place dans la case parachute rime avec gain de sécurité car en minimisant l'encombrement on minimise les risques liés à des scénarii dans lesquels le parachute reste coincé dans la fusée ou bien sorte mais ne s'ouvre pas car trop comprimé.

Conception d'une minuterie électromagnétique

La carte de minuterie parachute est destinée à commander l'ouverture de la trappe à culmination de la fusée, c'est-à-dire environ 21 secondes après son décollage. Le principe de fonctionnement est assez simple : Après débranchement d'un jack (utilisé en simple interrupteur), la charge d'un condensateur fait passer en saturation haute un amplificateur comparateur, ce qui alimente alors une ventouse électromagnétique. Le courant électrique qui la parcourt libère alors, par phénomène d'induction magnétique, une plaque métallique collée à la trappe. L'ajustement de la valeur de la résistance de charge du circuit RC permet de prédire à la seconde près la date d'ouverture du parachute, que nous avons pour l'instant fixée à 21 secondes mais qui, selon les conditions de vent le jour du lancement, pourra être modifiée.

En réalité, la conception de cette minuterie n'est pas si aisée que cela car Planète Sciences nous impose l'insertion de diodes dans notre montage. Une première diode permet d'indiquer si le circuit de la minuterie est alimenté en tension, ce qu'on commande à l'aide d'un interrupteur, et une seconde s'allume lorsqu'un courant parcourt la ventouse (ce qui libère la trappe si elle est collée à la ventouse). Or, dans les gammes de tensions utilisées, les tensions « seuil » des diodes ne sont pas toujours négligeables, et ces dernières dépendent (faiblement, certes) du courant qui les traversent. Un calcul approché donne cependant des prévisions très correctes, et il est présenté en détail dans le rapport technique.

L' « étalonnage » effectif du montage permet de relier la valeur de la résistance de charge (en abscisse, unités : kOhm) et la durée séparant le débranchement du jack (en ordonnées en secondes), soit l'ouverture de la trappe. Jusqu'au dernier instant, nous pourrions donc ajuster cette durée à la seconde près.



II-3 Divers éléments de finalisation

Une fusée de 6kg propulsée par un moteur à poudre, lancée à 270 m.s^{-1} est un vrai missile. On comprend donc pourquoi le moteur fourni par le CNES n'est délivré qu'à condition qu'un cahier des charges extrêmement précis et strict soit vérifié. Ceci permet d'expliquer pourquoi il y a un fossé entre une fusée presque prête à voler et une fusée qui vole. Il y a en effet une multitude de détails à ne pas oublier. Nous avons tenté d'en présenter un dans cette partie, pour montrer la démarche que nous avons suivie à chaque fois: besoin du cahier des charges+contraintes= solution imaginée puis réalisée.

Réalisation des hublots

Besoin du cahier des charges :

- On doit pouvoir accéder rapidement à l'interrupteur qui met en route la carte de la minuterie.
- La diode témoignant de la mise en route de la carte doit être visible de l'extérieur de la fusée

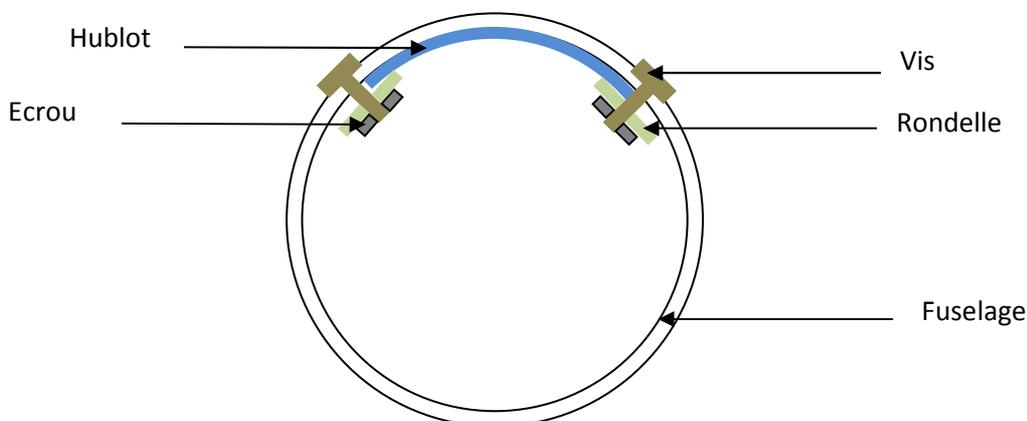
Contraintes :

- La fusée doit être relativement lisse et ne pas présenter d'ouverture béante
- Tout système rajouté dans le fuselage ne doit pas gêner l'insertion des bagues, des rails, et des cartes montées dessus.

Solution imaginée et réalisée :

Nous avons réalisé un hublot transparent (thermoformé) qui recouvre les deux brèches voisines : l'une en face de l'interrupteur d'alimentation et l'autre de la diode témoin. Ce hublot peut coulisser vers le bas afin de libérer l'ouverture située au-dessus de l'interrupteur.

Le guide de glissement du hublot est constitué de 4 vis, munie de rondelles sur lesquelles reposent des ressorts qui plaquent la surface en plastique contre le corps du fuselage.



II-4 Expériences additionnelles

Comme il restait de la place à l'intérieur de la fusée, nous avons réfléchi à des expériences simples que nous pourrions réaliser en plus. Ces expériences devaient être le plus simples possibles de façon à ne pas perdre de vue l'objectif principal : faire décoller la fusée et mener à bien notre expérience de mesure de pression. Nous avons donc pensé à deux éléments à rajouter dans la fusée : un traceur GPS et une caméra embarquée.

Ajout d'un traceur GPS

Il nous a tout d'abord paru intéressant d'ajouter un « traceur GPS » dans la fusée. Un tel dispositif, dont le fonctionnement est parfaitement autonome, permet d'enregistrer sa position GPS avec une fréquence déterminée. Dans notre cas, il était nécessaire que celle-ci soit très importante étant donné la courte durée de l'expérience (environ 25 secondes, car la phase de descente n'est que de peu d'intérêt pour notre expérience). Nous avons trouvé un traceur permettant d'enregistrer sa propre position à chaque seconde, ce qui correspond à la fréquence maximale existante sur le marché.

Mémorisant également l'heure précise de chaque mesure et la vitesse correspondante, il devrait donc nous permettre d'accéder à une information supplémentaire : la composante horizontale de la vitesse de notre fusée. Avec le tube de Pitot et l'accéléromètre, nous disposons déjà de la vitesse selon l'axe de la fusée ; le GPS nous permet donc de connaître l'angle que fait la fusée avec l'horizontale et donc de mieux préciser sa trajectoire. Par ailleurs, le traceur GPS que nous avons choisi donne aussi l'altitude, autre élément pour vérifier nos mesures et la trajectoire de la fusée.



Sa très petite taille (72 x 46 x 20 mm) va nous permettre de porter une attention toute particulière à sa protection dans la fusée car il est indispensable de le récupérer dans un état correct

pour exploiter les mesures. Il suffit ensuite de le connecter à un ordinateur via une prise USB pour récupérer les données. Grâce à son fonctionnement totalement indépendant du reste de l'électronique de la fusée, et à sa taille extraordinaire, le rajout de cet élément ne représente pas une grande difficulté.

Ajout d'une caméra embarquée

Nous nous sommes également procuré une caméra miniature afin de filmer le vol depuis l'intérieur de la fusée. Bien que cet élément ne présente pas d'intérêt scientifique réel, il permettra de garder un souvenir du vol de notre fusée.

Présentée comme l'une des plus petites caméras au monde (40 x 80 x 14 mm), elle offre une offre une résolution d'une qualité tout à fait correcte pour l'utilisation qui en est faite, et une précision qui n'est pas affectée par la vitesse de l'objet sur lequel elle est fixée (ce qui, dans notre cas, est bien-sûr déterminant). Elle stocke elle-même les données vidéos, si bien que son fonctionnement est également totalement autonome.

Enfin, ses dimensions nous permettent, ici encore, de la protéger de manière efficace contre les chocs importants subis lors de l'atterrissage de la fusée, car de même que pour le traceur GPS, la récupération des données est conditionnée par le maintien de l'intégrité de la caméra.



Essais en soufflerie

Afin de vérifier le bon fonctionnement de nos capteurs, nous avons utilisé la grande soufflerie du laboratoire EM2C pour y réaliser quelques essais. Malheureusement, nous n'avons pu y consacrer qu'un temps limité, étant donné la préparation considérable que de tels essais nécessitaient, et le travail qu'il fallait encore fournir sur l'électronique de la fusée. Les résultats obtenus et les difficultés rencontrées sont reportés au rapport technique et ne seront pas discutés ici.

III- Organisation du travail

III-1 Le travail en groupe

Notre expérience du travail en groupe n'a évidemment pas été la même que celle vécue par nos prédécesseurs. Ces derniers étaient cinq et, partant de zéro, ils avaient dû se spécialiser chacun dans une partie bien précise (mécanique, électronique, etc...) et se coordonner. Cette année, nous étions seulement trois, et comme notre objectif était de terminer la fusée en réglant tous les problèmes survenant dans différents domaines, il était nécessaire que nous ayons tous une vision globale du projet. Bien entendu, cela ne nous a pas dispensé de nous spécialiser chacun sur un nombre précis de tâches à effectuer et de nous coordonner mais nous devons tous être parfaitement au courant du travail effectué par les autres, afin de bien garder à l'esprit notre objectif et d'avoir conscience de notre situation par rapport au but recherché : rendre la fusée opérationnelle.

Etant seulement trois, il n'était pas difficile de se réunir très souvent, et la communication n'a donc posé aucun problème. Nous avons veillé malgré tout à utiliser des modes de communication formels (rapports écrits par exemple), afin d'améliorer la transmission d'information avec nous-mêmes à travers le temps (il nous est arrivé au début de devoir refaire des essais pour établir la correspondance entre les numéros des capteurs et leur position sur l'ogive de la fusée, ce genre d'incident nous a incité à mieux garder des traces de tous nos travaux).

III-2 Adaptation de l'organisation de l'équipe tout au long de l'année

Malgré une compréhension globale du système nécessaire de la part de chacun des membres du groupe, nous avons été naturellement amenés à nous spécialiser sur de nombreuses tâches. En particulier, la compréhension du microcontrôleur nécessitait trop d'investissement pour que nous puissions tous nous y consacrer. A partir de janvier Arthur s'est ainsi attelé à la compréhension du fonctionnement du microcontrôleur PIC (dont le rôle est de convertir les 7 mesures analogiques des capteurs en une seule trame numérique), pendant que les deux autres continuaient de régler un à un les obstacles au lancement de la fusée (électronique défectueuse, conception d'un nouveau parachute etc.).

III-3 Planning

On peut dégager trois grandes phases dans notre projet : une première de septembre à décembre, durant laquelle nous avons tous les trois étudié le travail effectué l'an passé, et identifié les étapes restant à valider. Durant cette étape nous avons commencé à résoudre quelques problèmes, mais afin d'accroître notre efficacité, nous avons rapidement adopté une classification de

tous les points à valider que nous avons réparti dans l'équipe et dans le temps, grâce notamment au diagramme de Gantt que l'on trouvera en annexe.

Ce diagramme étant fait, nous avons pu entamer une phase de conception plus efficace. C'est notamment à partir de cette période que nous nous sommes plus ou moins répartis les problèmes à résoudre, tel que nous l'avons expliqué dans le paragraphe précédent. De fait, les tâches effectivement menées ont différé de manière notable avec ce qu'on avait prévu lors de la réalisation du planning. Le début des essais en soufflerie, par exemple, a été retardé de presque un mois car il a fallu attendre que le laboratoire LISA imprime une nouvelle carte pour les capteurs, ce qui explique que nous n'ayons pu réaliser qu'un seul des deux ensembles d'expériences que nous avions prévues. Durant cette période, nous avons assuré le fonctionnement et la fiabilité de toutes les cartes électroniques.

Enfin à partir de mai, nous sommes entrés dans une phase de finalisation, où nous avons pris du recul pour bien avoir conscience des jalons qui nous séparent de la certification de la fusée. En parallèle, nous avons entamé la réalisation des divers éléments de finalisation tels que les hublots. En effet dans un projet aussi complexe que le nôtre, on aurait vite fait de s'embourber dans des détails, ou de foncer le nez dans le guidon en passant à côté des échéances.

III-4 Financement

Dépenses

La plus grande partie de notre activité cette année ayant consisté en l'amélioration de l'électronique de la fusée, les dépenses effectuées ont été relativement limitées. En effet, bien que nous ayons initialement envisagé la possibilité de les faire imprimer par une entreprise d'électronique industrielle, ce qui aurait été à l'origine de frais et de délais importants, nous avons finalement décidé de reprendre la solution de l'équipe précédente. Ainsi, grâce à l'aide de Samira, l'ensemble des cartes ont été réalisées entièrement gratuitement par le laboratoire d'électronique de l'Ecole Centrale LISA. De plus, tous les composants que nous avons intégrés sur les cartes étaient disponibles en grande quantité et il n'a pas été nécessaire d'en faire l'acquisition de nouveaux.

Par ailleurs, il faut souligner l'aide majeure du CNES et de Planète Sciences. Sous réserve de respect du cahier des charges, le CNES nous fournit en effet le propulseur, dont le coût dépasse le budget de notre projet! Pour sa part l'association Planète Sciences nous fournit aussi bien l'émetteur « Kiwi » que le récepteur permettant de recueillir les données télétransmises.

Seuls les achats finaux du matériel Hi-Tech embarqué caméra vidéo – traceur GPS, de nombreuses piles d'alimentation rechargeables, ainsi que la réalisation du parachute de ont été à l'origine des dépenses effectuées, et présentées ci-dessous. Enfin, l'inscription à la semaine de

lancement et le déplacement sur le site de la Courtine constituent une part importante du budget final de notre projet.

Subventions

Nous avons fait appel à diverses sources de subvention en début d'année pour financer notre projet et les achats mentionnés ci-dessus :

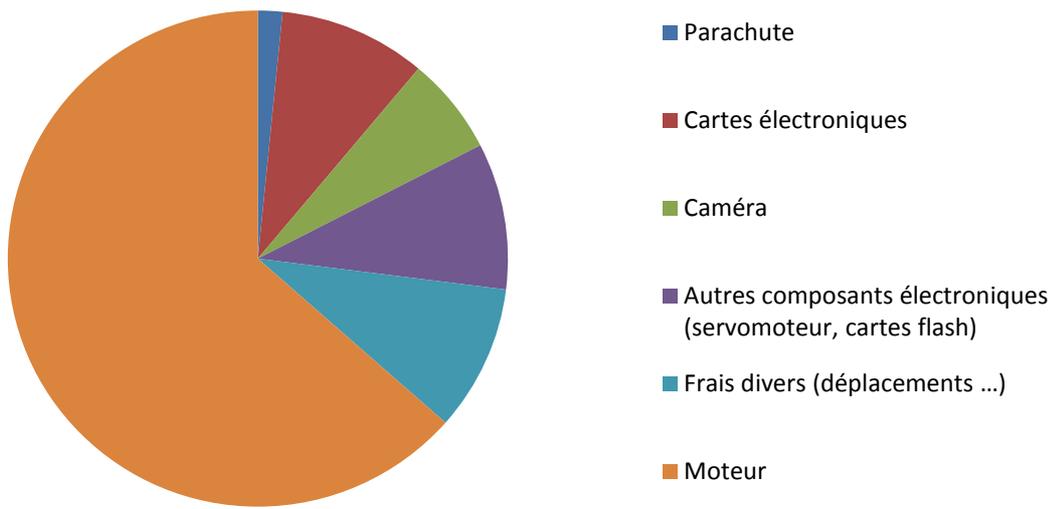
- Nous avons tout d'abord fait le nécessaire pour effectuer dès le début de l'année une demande de report de la subvention du Club 92, dont disposaient les membres du projet l'an dernier, et que nous avons obtenu.
- Pour la seconde année consécutive, la direction des études de l'Ecole a également bien voulu nous accorder la subvention que nous lui demandions, cette année à hauteur de 600€.
- Nous avons enfin répondu à un appel à subvention, organisé sous forme de concours par l'association Air Piston, association de promotion de l'aéronautique dirigée par des élèves de notre promotion à l'Ecole. Pour cela, nous avons dû préparer une soutenance devant son président Olivier Bernhard, et fournir un document d'une page présentant de manière synthétique notre projet. On pourra trouver ce document en annexe. Elle-même financée par Dassault Aviation, l'association Air Piston, nous a finalement accordé la subvention de 500€ mise en jeu.

Budgets

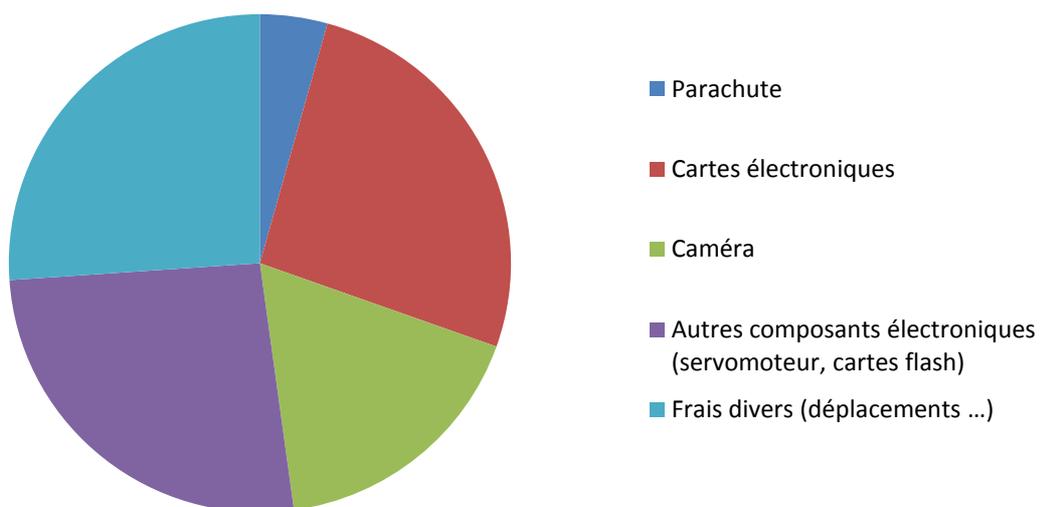
Lors de la rédaction du rapport intermédiaire en décembre, il nous avait été demandé de présenter un budget prévisionnel. Bien que la nature des dépenses effectivement réalisées ait été assez éloignée de nos prévisions d'alors, il était important d'en réaliser une première estimation. Finalement, si le budget global du projet fusex 2008 est assez proche de celui initialement prévu, on peut constater que nous avons largement surestimé nos dépenses en matériel électronique, et qu'à l'inverse nous avons sous-estimé les coûts liés à la campagne de lancement.

Nous avons représenté ci-après les différents budgets (prévisionnel et réel) en vue de leur comparaison. Etant donné l'importance du coût du propulseur, coût assumé par le CNES, ceux-ci sont représentés avec ou sans sa prise en compte.

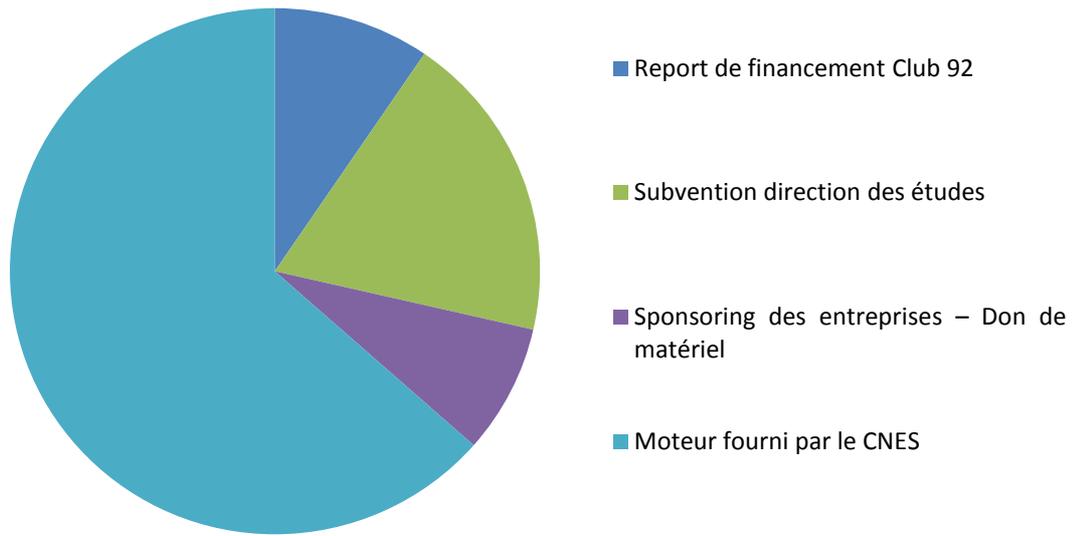
Budget prévisionnel : Dépenses	
Parachute	50
Cartes électroniques	300
Caméra	200
Autres composants électroniques (servomoteur, cartes flash)	300
Frais divers (déplacements ...)	300
Moteur	2000
Total	3150



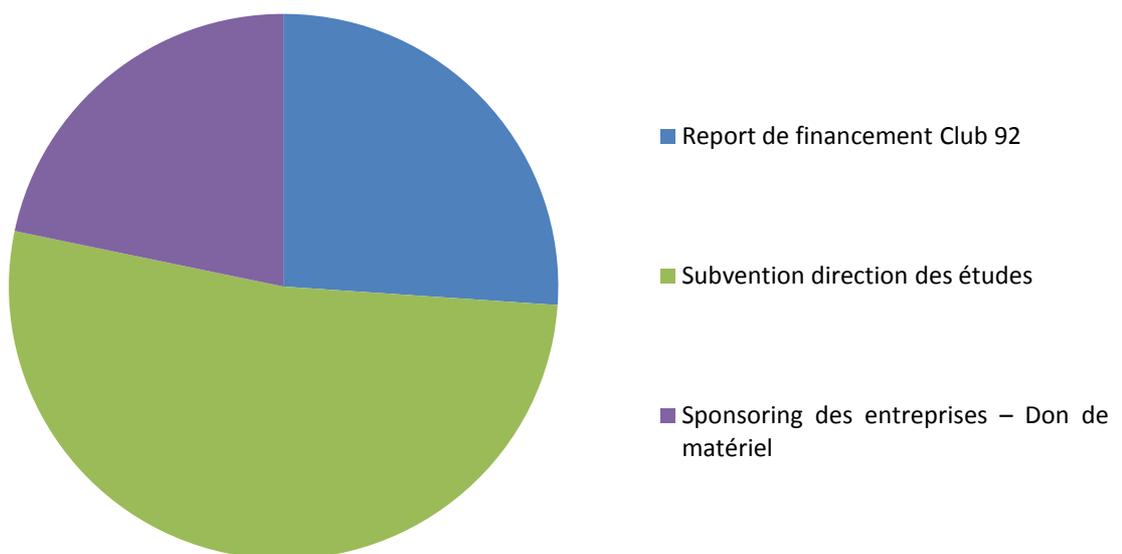
Budget prévisionnel - Dépenses (avec et sans moteur)



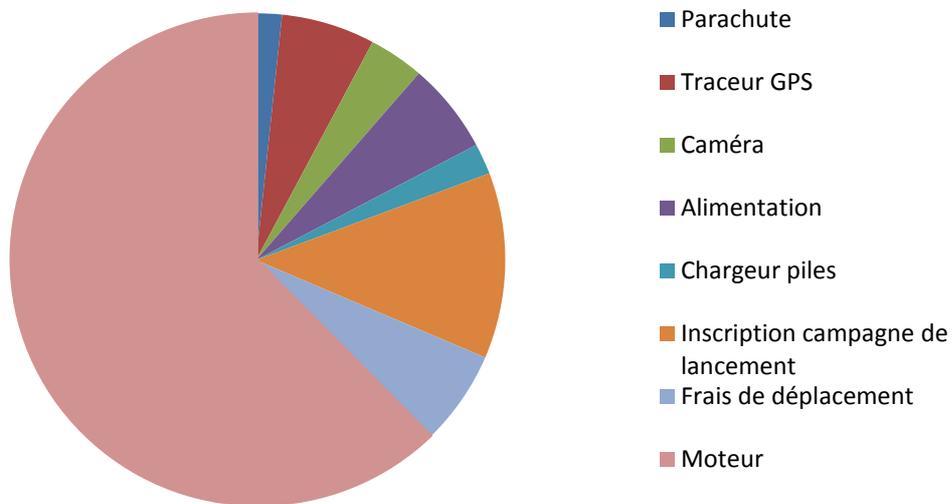
Budget prévisionnel : Recettes	
<i>Recettes déjà perçues</i>	
Report de financement Club 92	300
<i>Subventions espérées</i>	
Subvention direction des études	600
Sponsoring des entreprises – Don de matériel	250
Moteur fourni par le CNES	2000
Total	3150



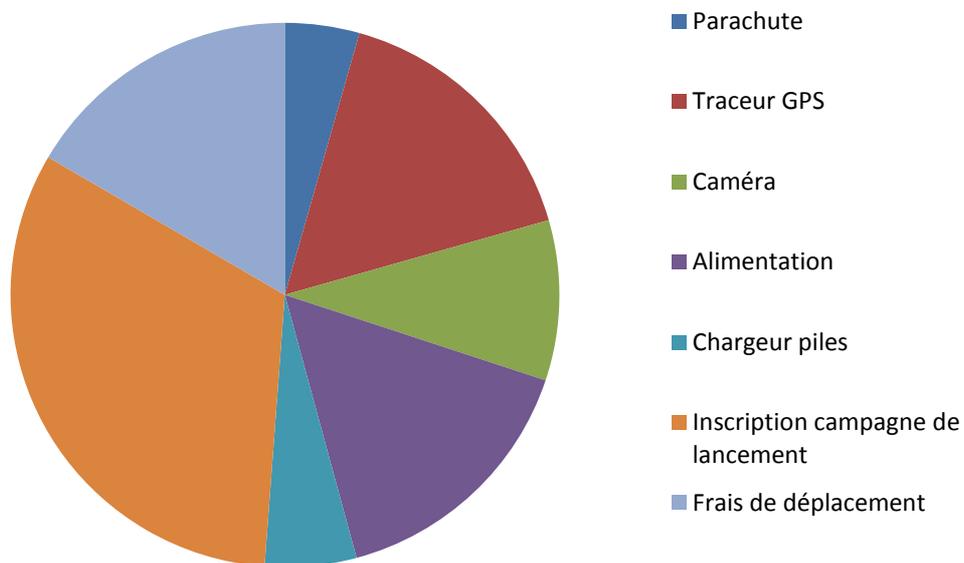
Budget prévisionnel - Recettes (avec et sans moteur)



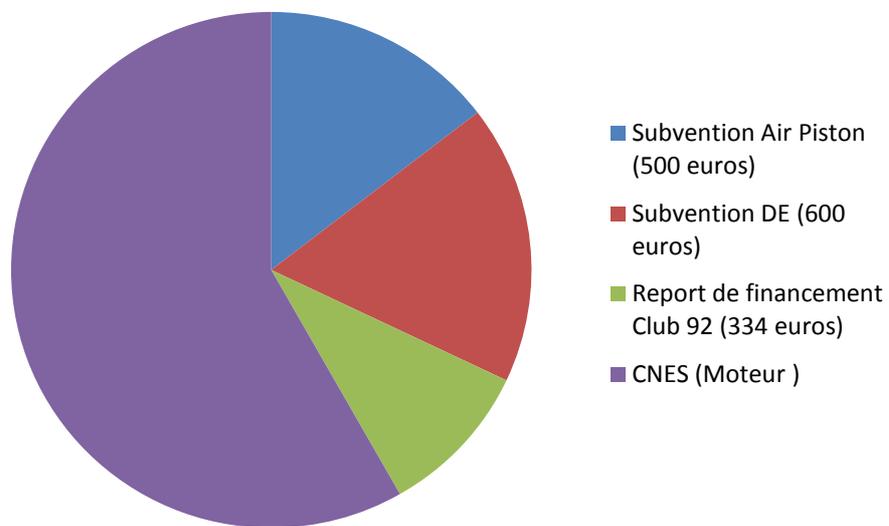
Budget réel : Dépenses	
Parachute	53
Traceur GPS	195,5
Caméra	115,1
Alimentation	190
Chargeur piles	65
Inscription campagne de lancement	390
Frais de déplacement	200
Moteur	2000
Total	3208,6



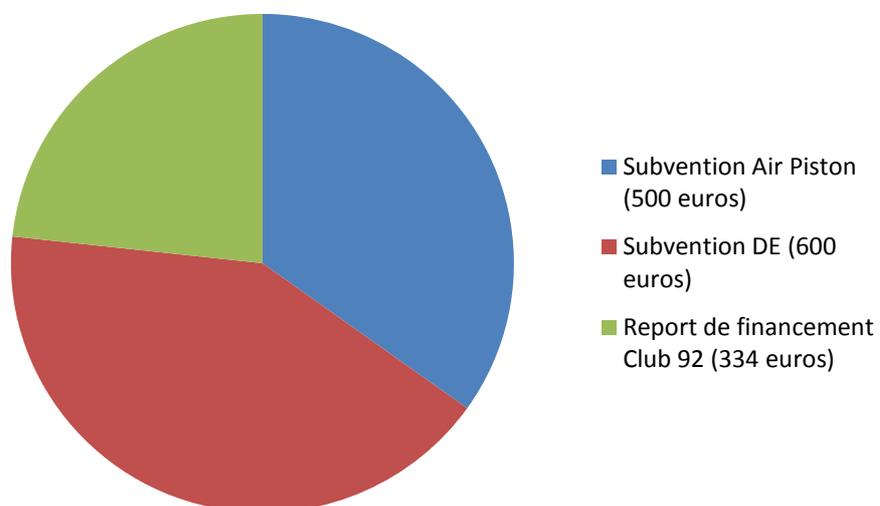
Budget réel - Dépenses (avec et sans moteur)



Budget réel : Recettes	
Subvention Air Piston	500
Subvention DE	600
Report de financement Club 92	334
CNES (Moteur)	2000
Total	3434



Budget réel - Recettes (avec et sans moteur)



III-5 Sécurité

Pour pouvoir lancer notre fusée dans de bonnes conditions, nous devons respecter un certain nombre de consignes de sécurité, notamment données par Planètes Sciences dans le cahier des charges.

Par mesure de sécurité, il était interdit de concevoir nous même le propulseur à poudre de la fusée, qui nous est en fait fourni gratuitement par le CNES. La sécurité à propos du moteur n'est donc pas de notre ressort. De même, lors de la campagne de lancement à la Courtine, nous sommes encadrés par des professionnels et c'est un pyrotechnicien qui déclenche l'allumage du moteur. Les risques sont donc encore une fois réduits au minimum.

Outre les éléments de sécurité relatifs au vol de la fusée que nous avons dû assurer afin de valider le cahier des charges, nous devons bien évidemment être prudents tout au long de la réalisation de notre prototype. Par exemple la soudure, le perçage des cartes, les diverses coupes à la scie à ruban nécessitaient des précautions auxquelles Samira et Alain nous ont sensibilisés.

III-6 Difficultés rencontrées

Ce projet nous a permis de faire plusieurs constats significatifs de ceux que l'on rencontre dans le monde du travail. Parmi ceux qui nous ont semblé le plus important, nous avons d'une part pris la mesure de la difficulté de reprendre un travail entamé par autrui, et d'autre part, appris une nouvelle fois que le plus difficile à gérer dans un projet complexe comme le nôtre est le temps.

Reprendre le travail d'autrui

La première difficulté à laquelle nous nous sommes heurtés a été de reprendre un travail entamé par une autre équipe. Il est en effet très difficile de ne pas perdre du temps à refaire des essais ou des raisonnements déjà réalisés malgré les rapports que nos prédécesseurs nous ont transmis. Inversement, il faut parfois remettre en cause le travail qui a déjà été effectué plutôt que de continuer aveuglément sur une base que l'on est amené à revoir tardivement. Il y a un équilibre à trouver entre la confiance que l'on accorde à l'héritage et les réserves que l'on doit émettre. Ce constat nous a permis de prendre conscience de l'importance du soin à apporter aux prises de notes et aux divers rapports écrits pour communiquer entre deux équipes souhaitant échanger leurs savoirs.

Gérer le temps et la complexité

Une fusée expérimentale est, au final, un agencement de petites réalisations, de petits systèmes simples à comprendre, mais dont la coordination et le nombre considérable en font un projet d'une grande complexité. Nous avons par exemple sous-estimé l'électronique car, sur le papier, celle-ci semble élémentaire : des entrées physiques, des filtres puis un convertisseur analogique-numérique, mais dans la réalité on se heurte à des centaines de petits problèmes qui doivent être résolus les uns après les autres, tout en respectant la compatibilité avec le reste de la chaîne de mesure. Autrement dit, sur le diagramme de Gantt, on part du général que l'on découpe en points particuliers ; sur ces points on est confronté à des problèmes. Avant de valider une solution, on doit remonter au plus général pour vérifier que la solution s'intègre bien dans la fusée complète (en choisissant un interrupteur on doit vérifier que celui-ci est assez compact pour ne pas dépasser du fuselage, ni gêner les autres composants).

Nous avons prévu une ou deux semaines pour nous immerger dans le projet et comprendre le fonctionnement de la fusée, le cahier des charges et les points à valider. En réalité il nous a fallu plusieurs mois pour vraiment comprendre en détails comment fonctionne la chaîne de mesure. Aucune carte ne fonctionnait du premier coup et il a fallu beaucoup de temps pour réaliser des essais, faire la distinction entre les dysfonctionnements liés à des faux-contacts et ceux liés à une mauvaise conception intrinsèque de la carte, reconcevoir, souder à nouveau les composants, puis recommencer les tests et ainsi de suite.

Par nature, les imprévus ne peuvent figurer dans un planning. Nous avons dû ainsi à de nombreuses reprises revoir nos échéances suite à une série de petits incidents. Les essais en soufflerie ont été reportés car il a fallu refaire les cartes des capteurs de pression au dernier moment. On imagine alors à quel point il doit être difficile de respecter les délais en entreprise, où les projets sont notoirement plus complexes et le non respect des échéances infiniment plus lourds de conséquences. Une telle réussite passe nécessairement par la conception d'un planning qui comprend des marges de sécurité, qui prévoit les « risques » de non respect des délais, et surtout qui détaille les tâches à effectuer avec une exhaustivité la plus proche possible de la réalité.

III-7 Compétences acquises, enseignements

La liste des difficultés rencontrées est longue, c'est bien là la richesse de notre projet ! En effet, nous avons vraiment eu l'impression de nous heurter à des problématiques d'entreprise. L'expérience que l'on a pu en tirer constitue l'enseignement majeur de notre projet. En effet, ce sont vraiment les détails les plus insignifiants qui nous ont le plus retardé, comme par exemple la recherche d'un faux-contact sur une carte (la compréhension d'un tel petit souci révèle parfois un problème bien plus grave que prévu, tel un ensemble de valeurs de résistances mal choisies, ou des

tensions supposées constantes qui chutent, et nous amènent à revoir la conception même de la carte !). On comprend aisément comment, à une autre échelle, un simple manque de communication au sujet de câblages électriques a pu induire des délais de livraison importants chez Airbus.

Ce projet nous a également permis d'acquérir des compétences techniques. Nous avons ainsi appris à concevoir des cartes électroniques, à souder, à percer, à scier, etc., ce pourquoi nous remercions d'ailleurs Samira et Alain, qui n'ont jamais hésité à nous transmettre un peu de leur savoir-faire.

ANNEXE I - Conception du parachute

On détermine la surface du parachute en exprimant l'équilibre des forces dans la descente freinée de la fusée ce qui nous donne :

$$S = \frac{2 \cdot g \cdot M}{R \cdot C_x \cdot V_d^2}$$

où : V_d est la vitesse de chute,

M la masse de la fusée

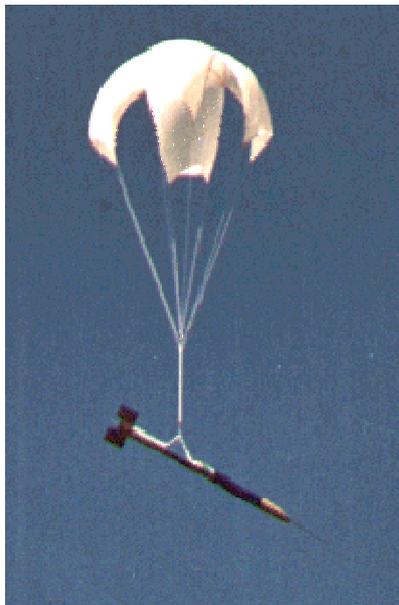
g la constante de gravitation

C_x le coefficient de traînée

R la masse volumique de l'air

Deux types de parachutes existent : le modèle **hémisphérique**, et le **cruciforme**.

Le premier est meilleur en théorie, mais plus difficile à fabriquer car il s'agit d'une forme 3D contrairement au cruciforme qui peut se mettre à plat. D'autre part, si le cruciforme est meilleur en théorie, le cruciforme est plus fiable dans les ouvertures à hautes vitesses et donc offre une meilleure sécurité dans l'absolu. Ces deux raisons nous ont poussés à concevoir un parachute cruciforme.



Parachute cruciforme



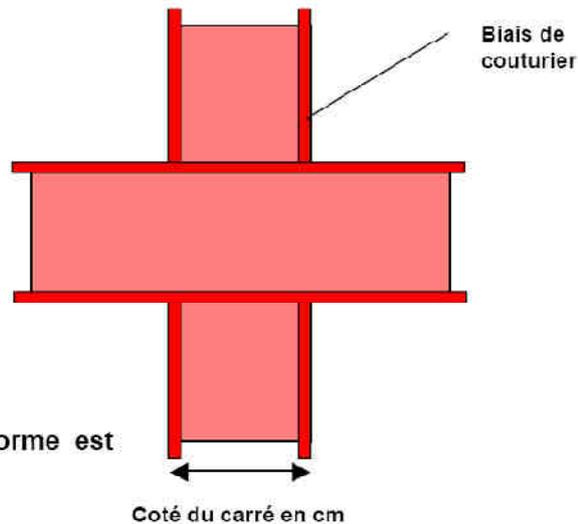
Parachute hémisphérique

ANNEXE II - Le parachute cruciforme

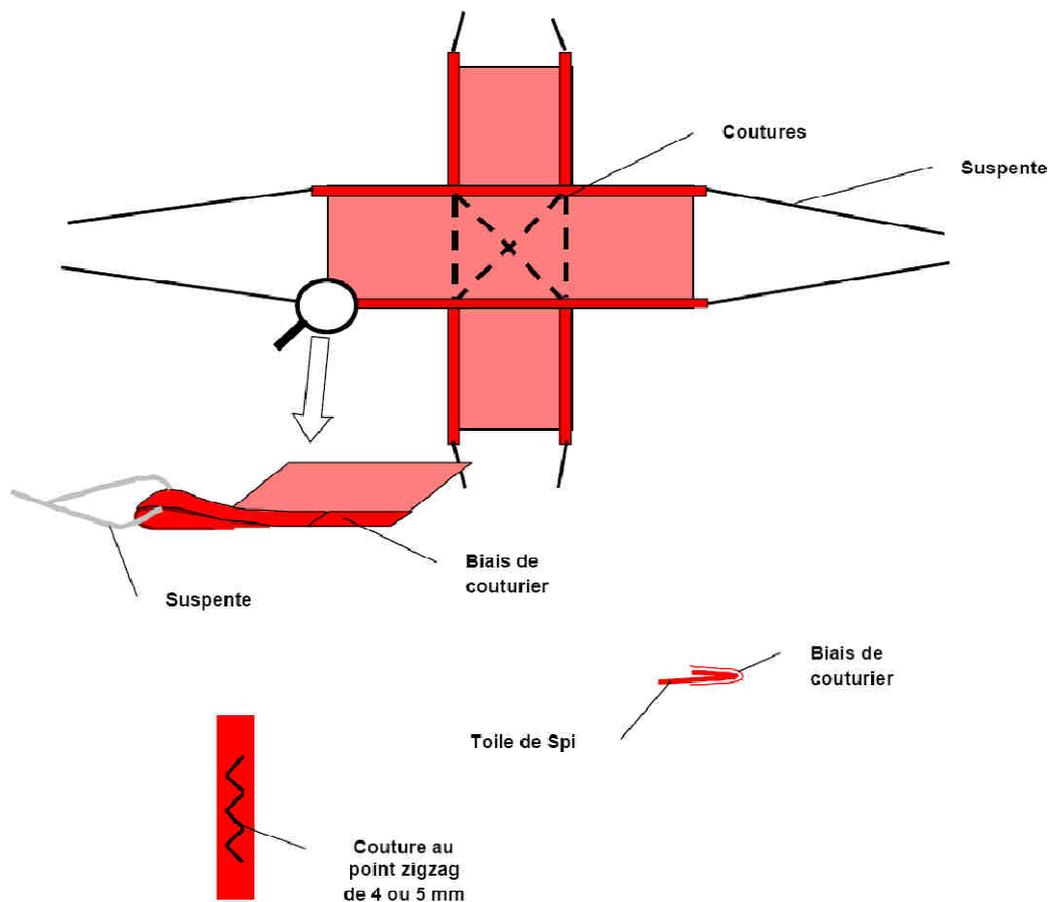
Le parachute cruciforme est utilisé pour des ouvertures à grande vitesse. Il est constitué de deux bandes de toile de Spi renforcées par des biais de couturier.

Voici le tableau de correspondance entre la masse de la fusée et les dimensions du parachute cruciforme pour une descente à 10 m/s.

Masse (Kg)	Côté du carré (cm)
1	17,4
1,1	18,2
1,2	19,0
1,3	19,8
1,4	20,6
1,5	21,3
1,6	22,0
1,7	22,7
1,8	23,3
1,9	23,9
2	24,6



La surface du parachute cruciforme est composée de cinq carrés.



ANNEXE III – Demande de subvention Air Piston – Dassault Aviation




PROJET FUSEX 2008

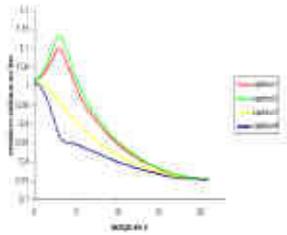





Présentation

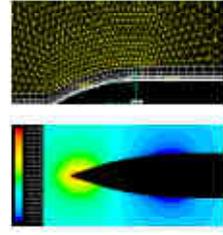
Nous sommes trois élèves-ingénieurs de deuxième année à l'Ecole Centrale Paris, rassemblés par notre passion pour l'aéronautique autour d'un projet de conception d'une fusée expérimentale mono-étage, en partenariat avec le CNES qui fournit le propulseur, l'association Planète Sciences et en étroite collaboration avec le laboratoire EM2C ECP-CNRS (UPR 288).
La fusée embarquera une expérience de mesure de la pression autour de l'ogive ainsi que de l'accélération longitudinale, dont les résultats seront envoyés au sol par télémetrie.
Elle sera lancée début Août 2008 sur le site militaire de La Courtine.

Les grandes étapes du projet



**Etude de l'écoulement
autour de l'ogive**

- Mesure de la pression autour de l'ogive
- Simulation numérique de l'écoulement
- Prédiction de la trajectoire



**Conception
mécanique**

- Conception des pièces sur CATIA
- Fabrication et intégration dans la fusée
- Fabrication du système de récupération - parachute



Electronique

- Conception d'une chaîne de télémesure :
Capteurs - filtres anti repliement -
Microcontrôleur - Modulation en
fréquence - émission - réception.
- Conception d'une minuterie pour
l'ouverture du parachute
- Fabrication des carres - Soudures

Quelques caractéristiques

- Hauteur de la fusée : 1,66m
- Masse avant décollage : 6,5 kg
- Vitesse maximale : 270 m/s (Mach 0,79)
- Altitude maximale : 2470 m

Nous contacter

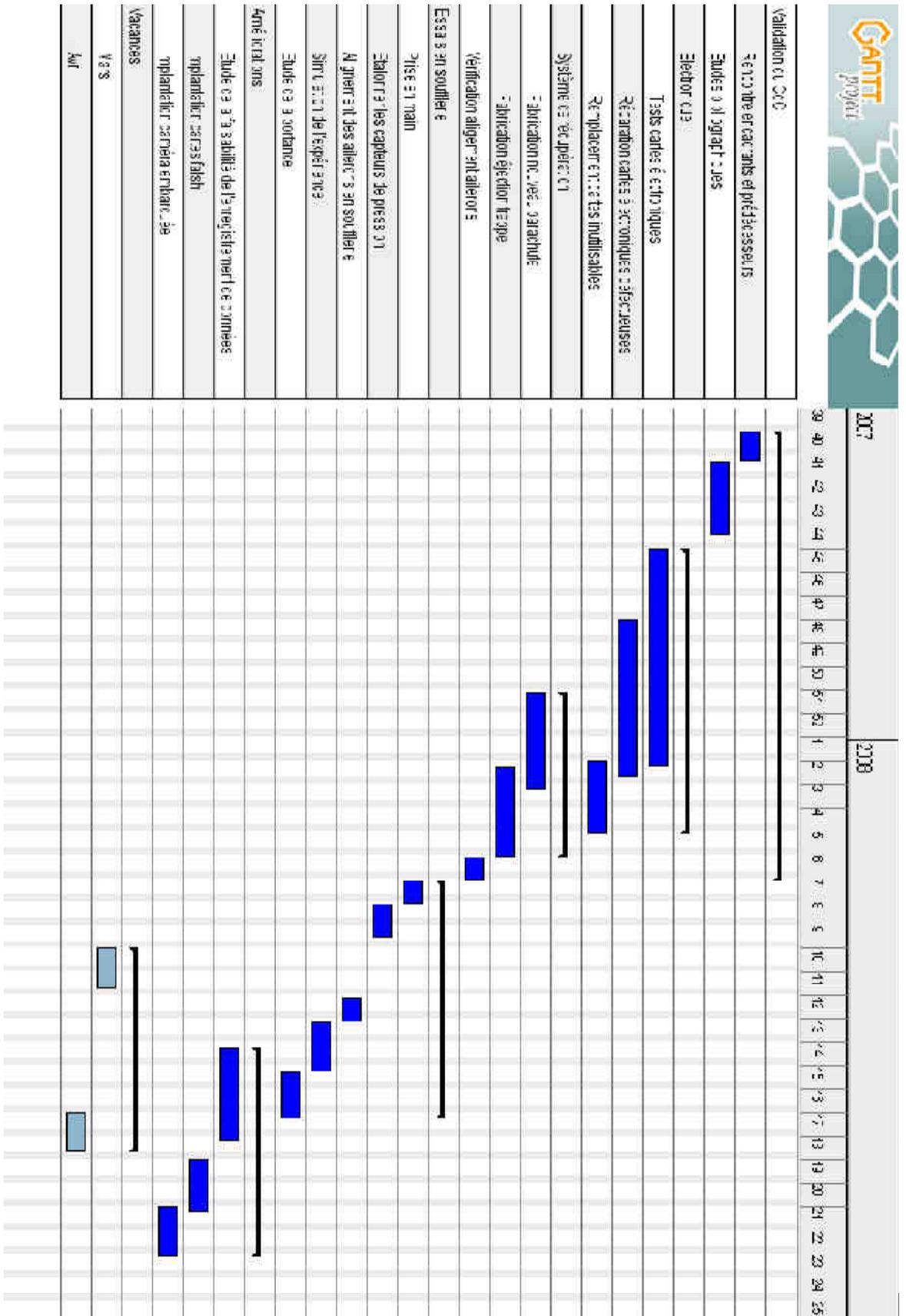
DROIT Arthur
arthur.droit@student.ecp.fr

JOFFRE Eric
eric.joffre@student.ecp.fr

LOCHERON Marc
marc.locheron@student.ecp.fr

Notre encadrant : FIORINA Benoit
benoit.fiorina@em2c.ecp.fr

ANNEXE IV – Diagramme de GANTT prévisionnel (novembre 2007)



Rapport technique – Projet 9086

Projet de deuxième année 9086

CONCEPTION ET REALISATION D'UNE FUSEE EXPERIMENTALE MONO-ETAGE

Encadrant : Benoît Fiorina

Elèves: Arthur Droit
Eric Joffre
Marc Locheron

Juin 2008

SOMMAIRE

Introduction	3
I- Réalisation des cartes électroniques.....	4
I-1 Méthodes générales.....	4
Conception de nouvelles cartes	4
Réalisation.....	7
I-2 Présentation de nos cas concrets.....	8
La carte des capteurs	8
Carte des filtres et de l'accéléromètre	10
Le micro-contrôleur	14
La carte du minuteur.....	22
II- Essais en soufflerie	26
Expériences envisagées.....	26
Mise en œuvre	26
Résultats.....	27
Critiques.....	29
CONCLUSION.....	30

INTRODUCTION

Concevoir et réaliser une fusée expérimentale est un projet ambitieux qui fait appel à de nombreuses disciplines. Nous avons décidé de relever le défi, tout comme nos prédécesseurs, de concevoir et réaliser chaque organe de la fusée. C'est un défi certes ardu mais qui procure une satisfaction incomparable lorsque la chaîne complète, imaginée et réalisée de bout en bout par nos soins, fonctionne.

Afin de réaliser notre objectif final de lancer une fusée expérimentale emmenant à son bord une expérience embarquée dont les données sont transmises au sol en temps réel, il nous a fallu acquérir de nouveaux savoir-faire dans plusieurs domaines. L'électronique est l'un de ces domaines dans lequel nous étions parfaitement novices et dont il a fallu acquérir les outils et les méthodes pour remplir notre mission qui consistait à rendre fonctionnelle la chaîne de mesure (principal élément manquant pour autoriser le vol de la fusée).

Le présent rapport a pour vocation de retracer fidèlement, autant que faire se peut, les problèmes techniques que nous avons rencontrés, les tests effectués pour les identifier, les solutions imaginées, et enfin la réalisation de ces solutions. Une partie est également consacrée aux essais réalisés en soufflerie.

I- REALISATION DES CARTES ELECTRONIQUES

I-1 METHODES GENERALES

Nous avons tenté de présenter dans cette partie toutes les méthodes que nous avons utilisées pour tester les cartes électroniques réalisées l'an dernier, comprendre quels étaient les problèmes, puis concevoir et enfin réaliser de nouvelles cartes opérationnelles.

La grande difficulté lorsqu'on teste une carte électronique, provient du fait qu'il faut arriver à déterminer si le problème est lié à une mauvaise conception théorique de la carte, ou bien à une réalisation douteuse (faux-contacts), ceci d'autant plus que nos cartes qui comportaient souvent deux couches avec des pistes relativement fines et nombreuses étaient réalisées par le laboratoire LISA qui ne dispose pas d'un matériel tout neuf pour imprimer les cartes.

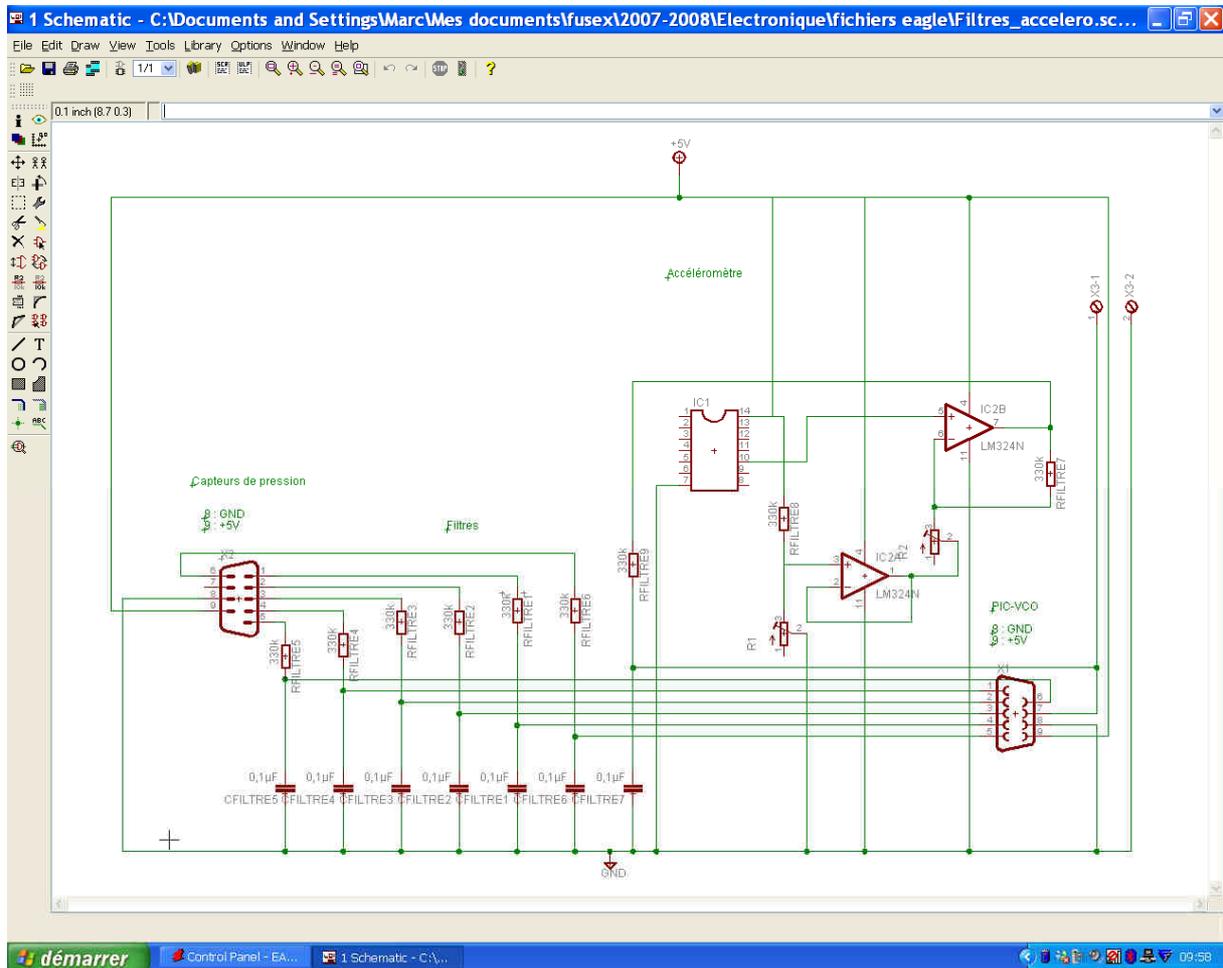
CONCEPTION DE NOUVELLES CARTES

Afin de concevoir de nouvelles cartes (ou du moins de modifier celles existantes), nous avons utilisé la version d'essai gratuite du célèbre logiciel de réalisation de PCB : Eagle. La version d'essai limite seulement la taille des cartes, et bloque quelques fonctions avancées mais est largement suffisante pour répondre à nos besoins.

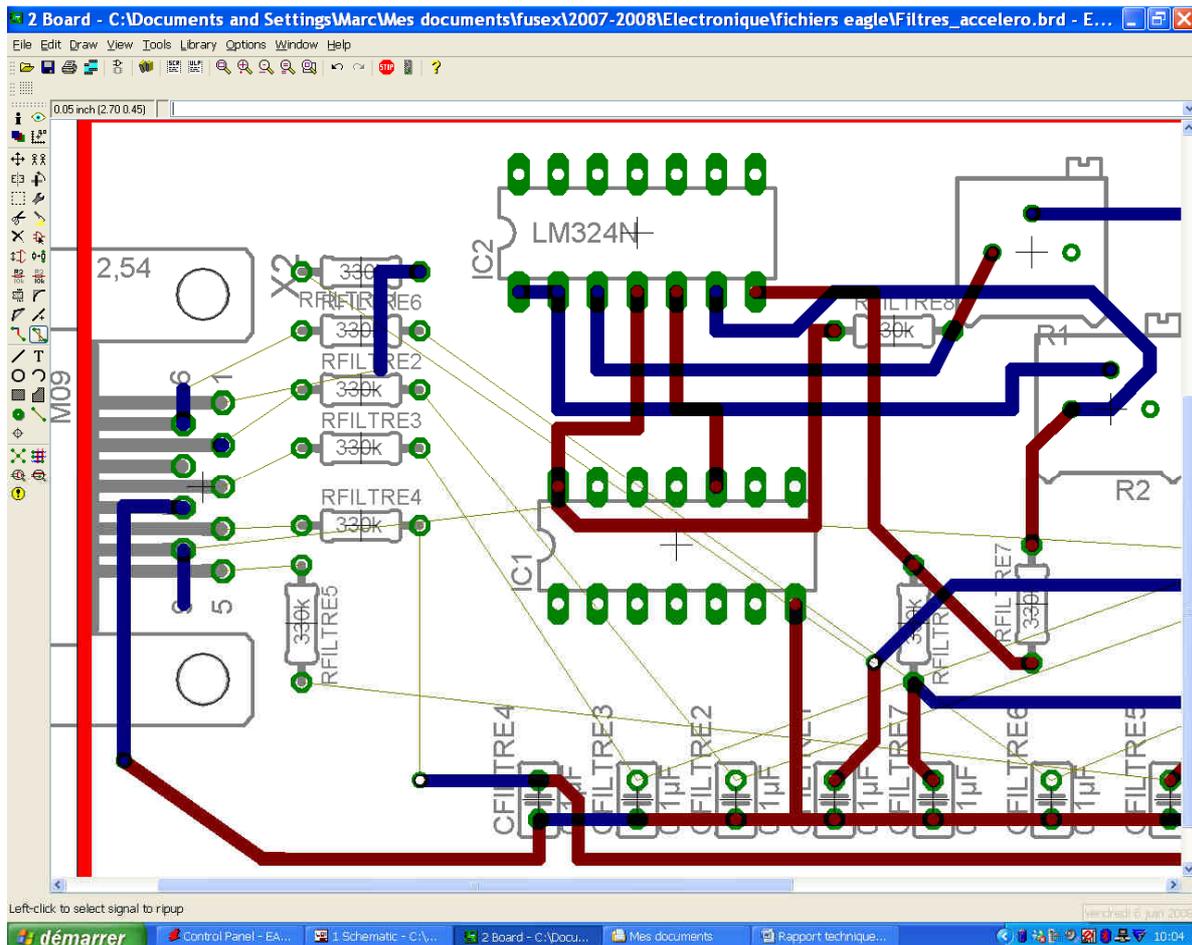
Le logiciel gère deux façades en parallèles : d'une part le schéma électronique sur lequel on ajoute les composants et où on crée les connections électroniques de manière schématique, et d'autre part le « board » sur lequel on met en place concrètement et non plus schématiquement les pistes, les composants sur la carte telle qu'on va l'imprimer. Le logiciel fait le lien entre ces deux aspects en reliant d'un trait fin tous les points qui doivent être connectés. Cela facilite la mise en place des pistes.

Notons qu'il existe de nombreuses options réglables comme l'épaisseur des pistes la distance minimale à imposer entre deux pistes voisines ou une piste et composant par sécurité (le logiciel possède une fonction qui détermine les endroits ne respectant pas ces critères).

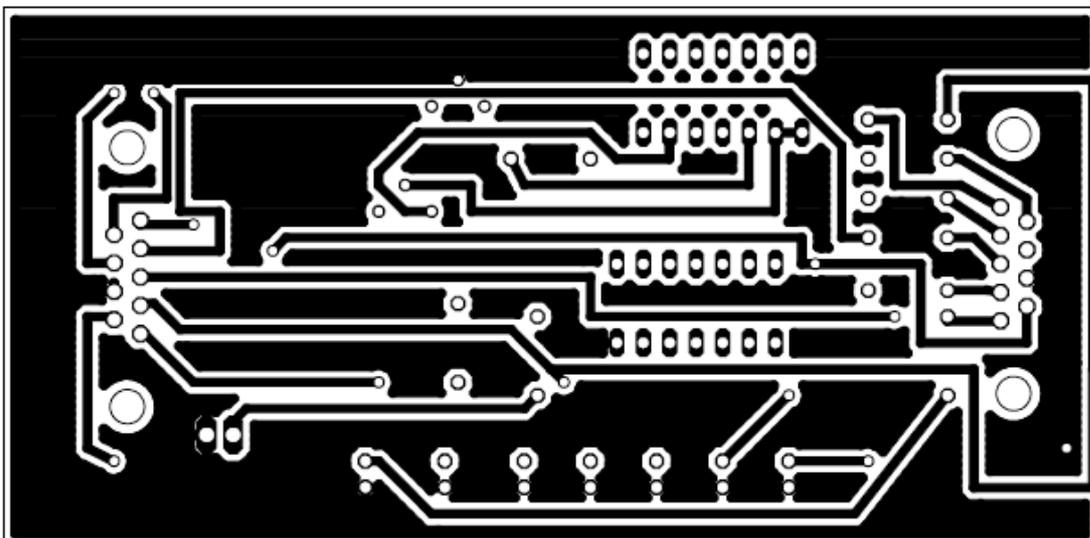
Une fois la carte terminée, il ne reste plus qu'à mettre un plan de masse : toutes les parties non utilisées de la carte sont reliées à la masse par une grande surface en cuivre. Ceci présente deux avantages : d'une part tout ce qui est relié à la masse représente du cuivre qui n'a pas été décapé par le bain d'acide et n'a donc pas encrassé la cuve, améliorant ainsi le rendu final, et d'autre part cela permet d'améliorer la connexion de tous les points de masse entre eux.



Schematic – Cette interface nous permet de concevoir des schémas électroniques de manière conviviale et visuellement agréable.

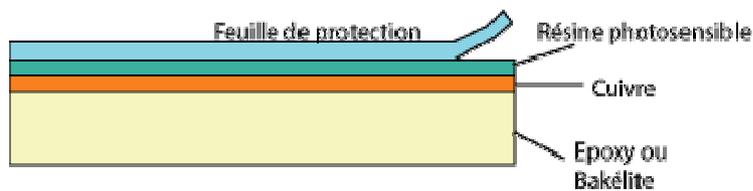


Board – Cette interface permet de concevoir les calques (typons) qui vont être utilisés pour sensibiliser les parties à enlever sous l'action du bain d'acide. Les traits fins représentent les pistes restant à tracer. Les pistes en rouge sont situées sur le dessus de la carte et celles en bleu sur le dessous. Il faut veiller d'une part bien sûr à ce que deux pistes d'une même couleur ne se croisent pas, et d'autre part à ne pas se retrouver avec des soudures impossibles à réaliser (soudures entre le dessus de la carte et une prise 9 broches par exemple). Voilà le genre de calque, que l'on obtient une fois le plan de masse ajouté :



REALISATION

Une carte électronique est constituée d'une plaque d'epoxy ou de bakélite (epoxy en ce qui nous concerne), d'une couche de cuivre déposée dessus, elle-même recouverte d'une résine photosensible abritée par une feuille de protection. Pour réaliser le circuit imprimé souhaité, on retire la feuille de protection dans une chambre noire, on place le calque (opaque au niveau des pistes et du plan de masse) sur la résine. On place ensuite la plaque sous une insoleuse qui va retirer la résine partout où cette dernière n'est pas protégée par le calque. Ainsi les zones de cuivre non protégées par la résine seront décapées créant ainsi des pistes.



Une fois la carte sortie du bain et nettoyée, il faut la percer au niveau des emplacements prévus pour passer les pattes des composants, ces derniers sont ensuite soudés à l'étain, d'une part pour les fixer, et d'autre part pour assurer leur jonction électrique avec la piste voisine.

I-2 PRESENTATION DE NOS CAS CONCRETS

LA CARTE DES CAPTEURS

Cette première carte de la chaîne de mesure supporte les capteurs de pression alimentés en 5V qui envoient en sortie une tension, fonction linéaire de la pression.

PRESSURE RANGE SPECIFICATIONS			
SenSym Part No.	Pressure Range	Burst Pressure [®]	Sensitivity
ASDX001	0 – 1 PSI	20 PSI	4.00 V/PSI
ASDX005	0 – 5 PSI	20 PSI	0.80 V/PSI
ASDX015	0 – 15 PSI	30 PSI	0.267 V/PSI
ASDX030	0 – 30 PSI	60 PSI	0.133 V/PSI
ASDX100	0 – 100 PSI	150 PSI	0.040 V/PSI

Extrait de la datasheet des capteurs de pression

PSI signifie « pound per square inch », et on a la correspondance 1bar=14,51 PSI.

Les capteurs achetés l’an dernier sont le ASDX030 pour le Pitot et le ASDX015 pour les autres prises de pression. Le ASDX030 supporte une plus large gamme de pression et a donc été placé en tête d’ogive pour cette raison.

Nous nous sommes aperçu que la « datasheet » léguée par nos prédécesseurs ne correspondait pas à nos capteurs. En récupérant la donnée-constructeur adéquate, nous avons constaté qu’il existe deux types de modèle : l’un de mesure absolu et l’autre de mesure relative. Dans notre cas, nos capteurs mesurent une pression absolue par rapport à une petite capsule de vide de référence. Ce choix effectué l’an dernier n’était pas forcément judicieux puisqu’il y a toute une gamme de pressions entre 0 et 0,8 bar qui n’est pas utilisée. Mesurer une pression en relatif par rapport à une pression de référence (celle régnant à l’intérieur du fuselage qui peut être connue en embarquant un baromètre) aurait été une solution plus adaptée.

Sur un projet complexe comme une fusée expérimentale il faut savoir ne pas être trop ambitieux et garder en tête l’objectif n°1 : faire voler la fusée. Il vaut mieux une fusée avec une expérience de précision médiocre qui vole qu’un véritable laboratoire de mesures qui reste au sol. C’est pourquoi nous n’avons pas perdu de temps à revoir le choix des capteurs qui représentent un coût non négligeable, et pour lesquels les délais de livraison peuvent être de l’ordre de plusieurs mois (comme nos camarades de l’an dernier en ont fait l’expérience) c’est à dire une durée pendant laquelle nous ne pouvons effectuer aucun essai sur la chaîne de mesure.

Deux condensateurs sont présents entre deux pattes et la masse pour chacun des capteurs. Il s’agit de **condensateurs de découplage**, dont le rôle est de limiter les pics de tension. Pour être

efficaces ces derniers doivent être situés au plus proche des pattes. La carte dont nous avons héritée en reprenant le projet avait regroupé tous les condensateurs au même endroit loin des pattes sur lesquelles ils devaient agir. Nous avons donc repris le « board » de cette carte sous Eagle pour revoir la disposition des composants (le schéma électrique demeurant correct). Le renouvellement de la carte était également justifié par le fait que la précédente présentait de nombreux faux-contacts (car les condensateurs n'étaient pas soudés directement mais montés sur tulipes). D'autre part nous avons profité de refaire la carte pour changer le type de tulipe sur lesquels on vient brancher les capteurs, les précédentes ne tenant pas bien ces derniers. Ainsi, il n'est dorénavant plus nécessaire de fixer les capteurs sur la carte autrement que par emboîtement (auparavant du scotch était utilisé). Ces précisions ont pour but de montrer à quel point la réalisation d'une fusée expérimentale doit faire face à une accumulation de toute une série de petits problèmes à trier et à résoudre les uns après les autres.

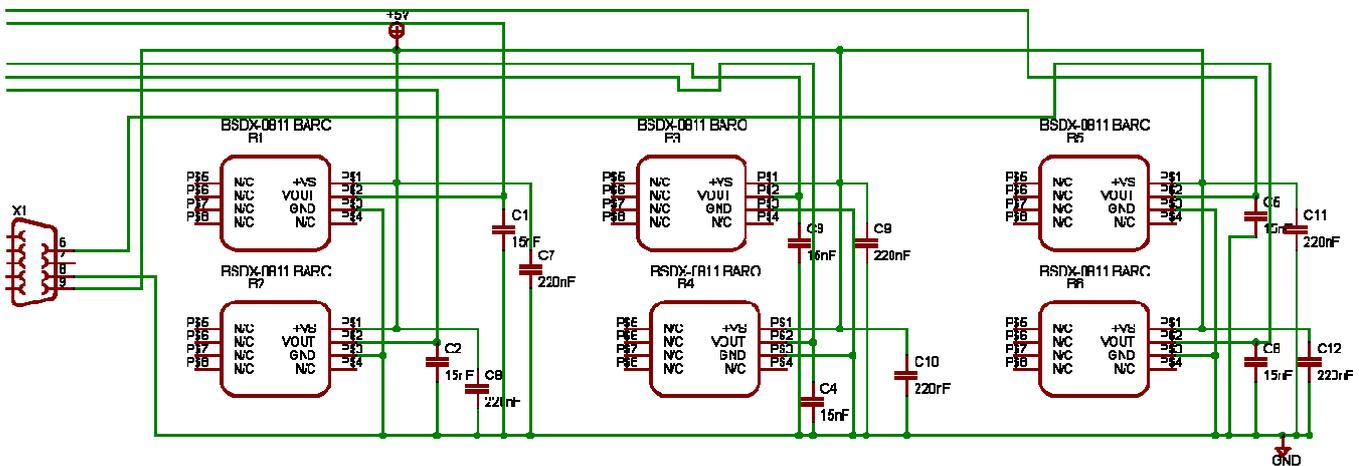
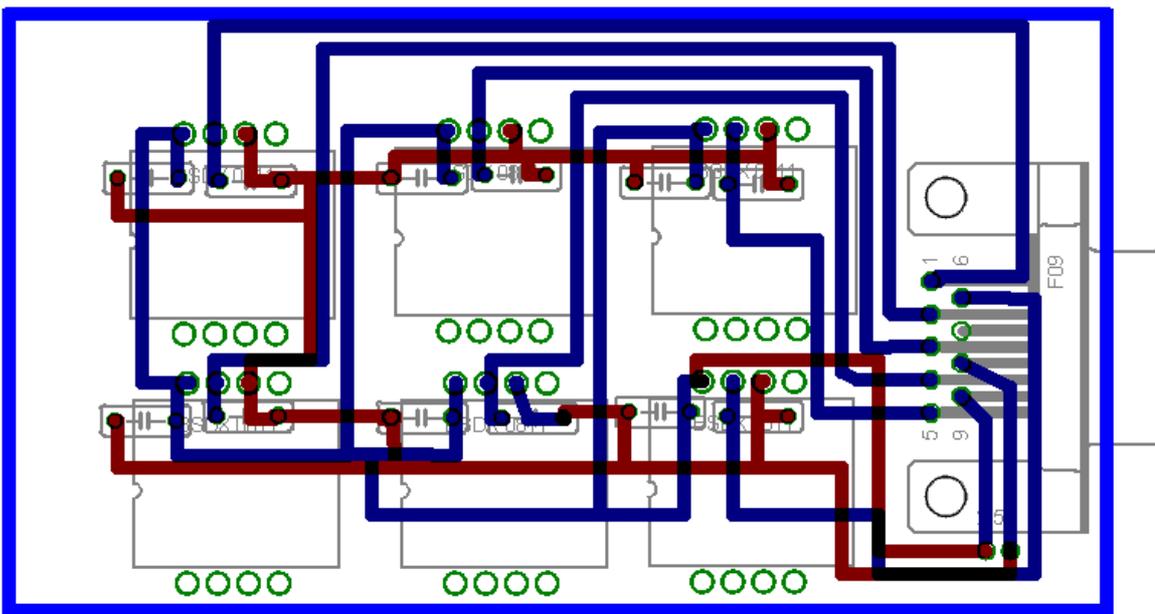


Schéma électronique de la carte des capteurs



Disposition des pistes et des composants de la carte des capteurs

CARTE DES FILTRES ET DE L'ACCELEROMETRE

Cette carte a, rappelons-le, pour objectif de filtrer les signaux en provenance des capteurs de pression (ie enlever les fréquences élevées dues à du bruit), et de fournir en sortie de carte un signal d'accélération amplifié.

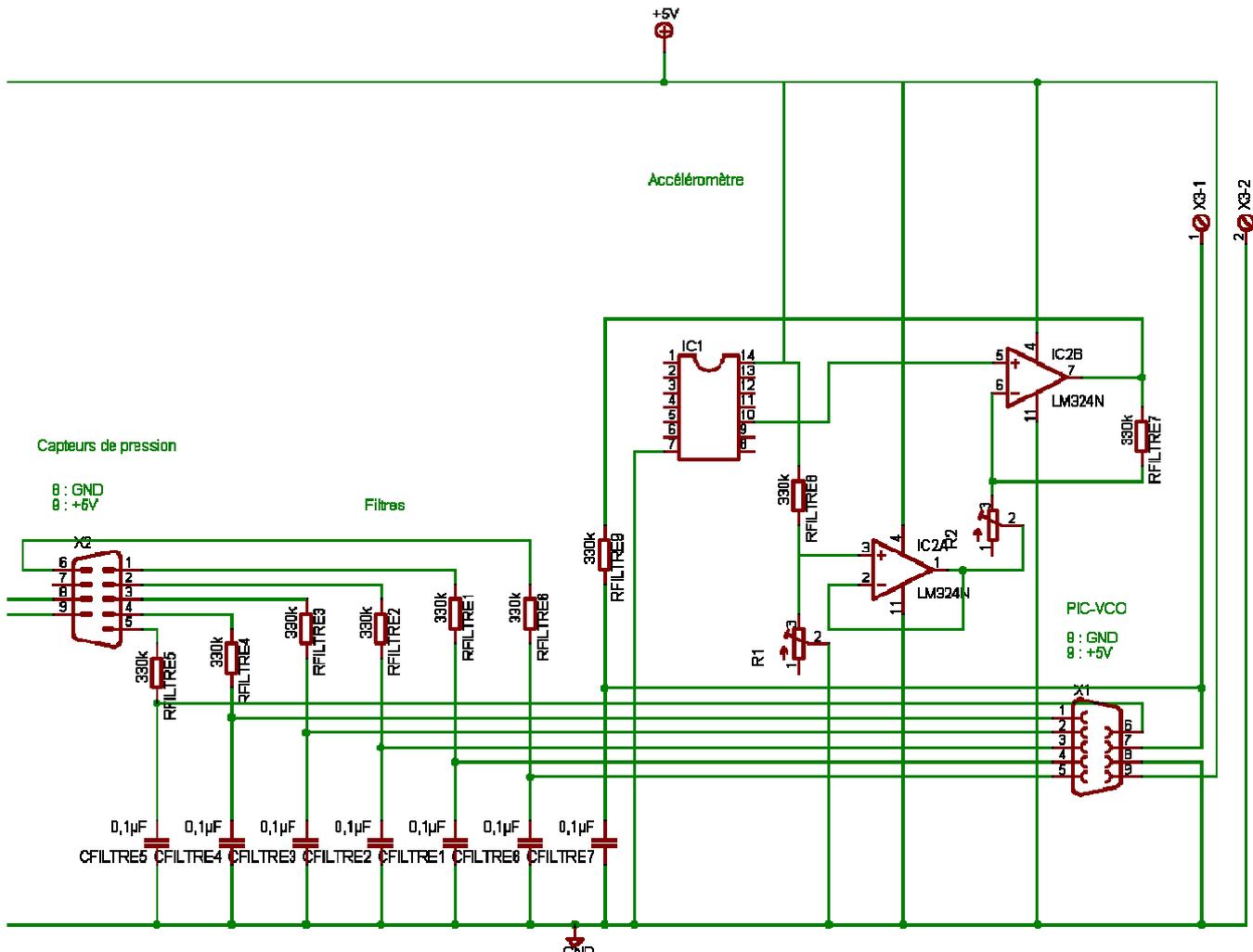
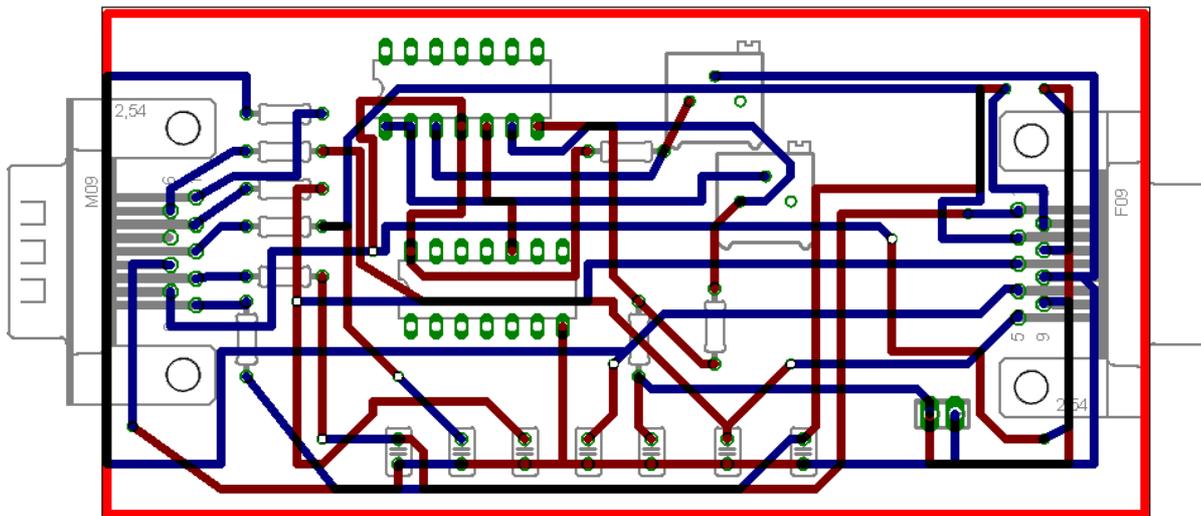


Schéma électronique de la carte filtre+accelero

Il est intéressant de distinguer les deux fonctions réalisées par la carte sur ce schéma : la partie filtre passe-bas RC, et le montage visant à amplifier la sortie de l'accéléromètre (montage amplificateur avec ajout d'une tension d'offset). Ce schéma doit être le plus clair et complet possible, c'est lui qui permettra d'identifier une erreur de conception en cas de dysfonctionnement de la carte produite. Il permet également de connaître quelles sont les connexions à réaliser et de suivre un signal de carte en carte (comme la masse ou l'alimentation 5V).

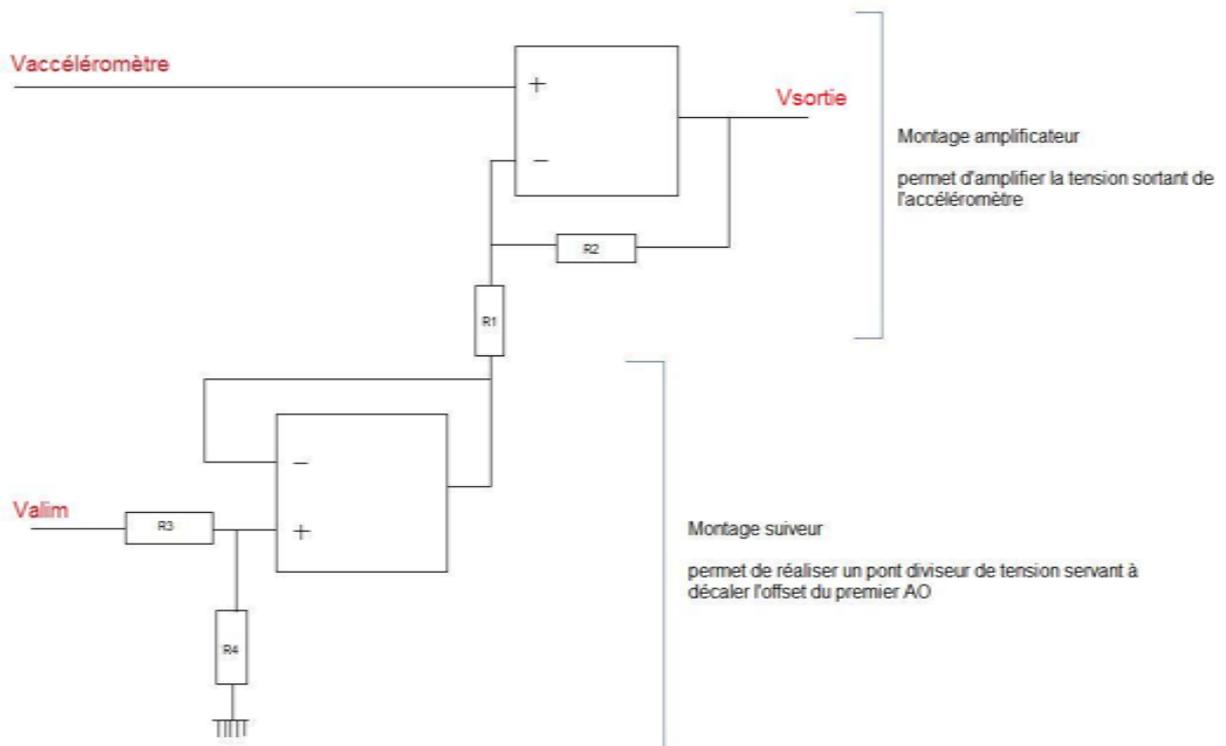


Disposition des pistes et des composants de la carte filtres+accelero

Les typons de cette carte ont été particulièrement ardues à concevoir. Au vu du nombre important de connexions à réaliser, l'assistant du logiciel (qui permet de tracer les pistes à partir du schéma électronique) s'est avéré impuissant. Manuellement, il a fallu veiller à ce qu'aucune piste ne se coupe et à ce qu'il n'y ait pas de soudures impossibles à réaliser (notamment au niveau de la prise 9 broches ce qui explique que les pistes incidentes soient en bleu c'est-à-dire sur la face du dessous).

Comme nous l'avons expliqué dans le rapport, nous avons souhaité optimiser les performances de l'accéléromètre embarqué en adaptant à notre expérience la gamme d'accélérations mesurées. Il ne nous était clairement pas nécessaire de disposer des $\pm 50g$ mesurables directement par l'accéléromètre. Durant le vol, et étant donné son orientation, l'accéléromètre est supposé mesurer des accélérations comprises entre $-14g$ et environ $1g$. L'objectif de notre montage a donc été d'obtenir la meilleure sensibilité de mesure.

Pour cela, il était évident qu'il fallait notamment amplifier le signal, la sensibilité brute de 38 mV/g étant un peu trop faible. L'utilisation d'un montage amplificateur avec AO présente une contrainte majeure : rester dans la gamme de tension imposée par ses tensions de saturation. C'est le rôle de l'offset qui recadre le signal dans une gamme de valeurs acceptables. Dans le montage suivant, l'AO en haut à droite est utilisé en amplificateur, et l'AO en bas à gauche joue le rôle d'offset. Cet offset est réglé par un pont diviseur de tension (d'où l'AO utilisé dans un montage suiveur) effectué sur la tension d'alimentation.



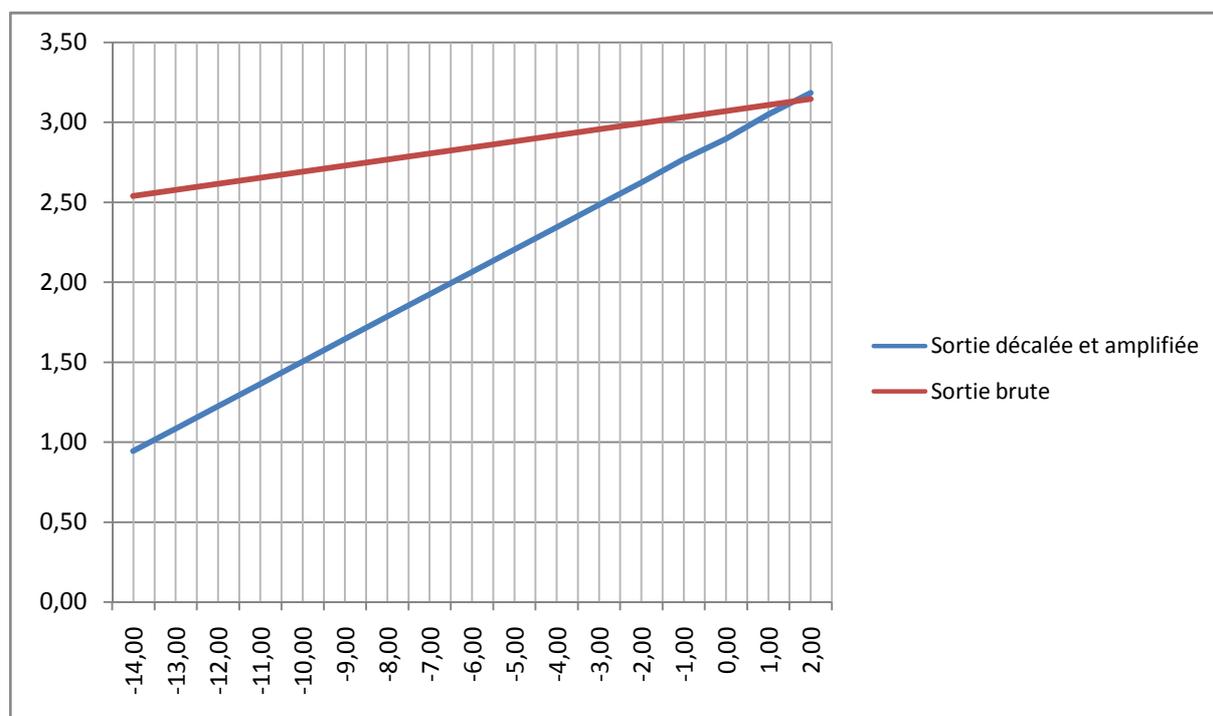
La tension de sortie s'exprime alors par :

$$V_{\text{sortie}} = \underbrace{\left(1 + \frac{R2}{R1}\right) V_{\text{accéléro}}}_{\text{Amplification}} - \underbrace{\frac{R2}{R1} * \frac{R4}{(R3 + R4)} Valim}_{\text{Décalage}}$$

Avec les alimentations utilisées, les tensions de saturation haute et basse sont respectivement de 0 Volt et 3,8 Volts. Finalement, les valeurs suivantes des résistances permettent d'obtenir un résultat presque optimal :

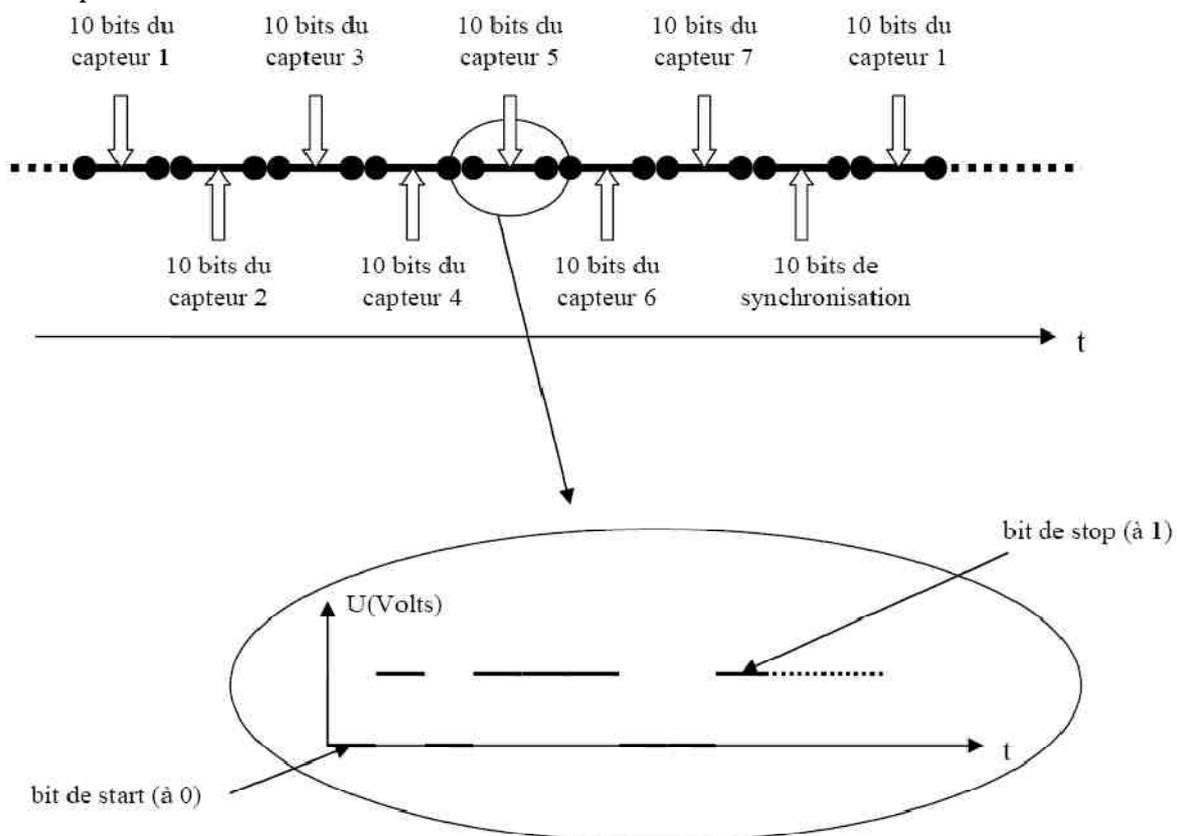
$$R1 = 2,3k\Omega ; R2 = 4,7k\Omega ; R3 = 1k\Omega ; R4 = 1k\Omega$$

En effet la sensibilité obtenue de 140 mV/g, et le décalage vers le bas qu'elles permettent d'obtenir le résultat suivant (courbe bleue), à comparer avec la droite rouge correspondant à une utilisation « brute » du capteur.

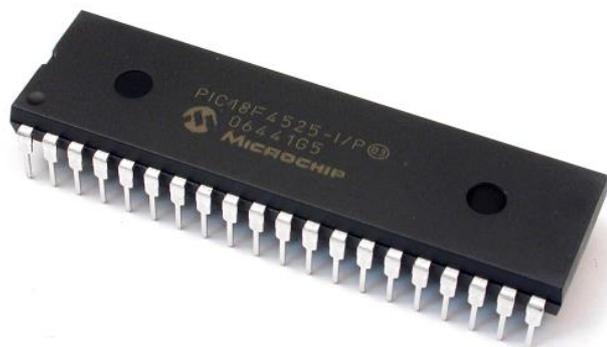


*LE MICRO-CONTROLEUR***Programmation du microcontrôleur PIC****Approche du problème**

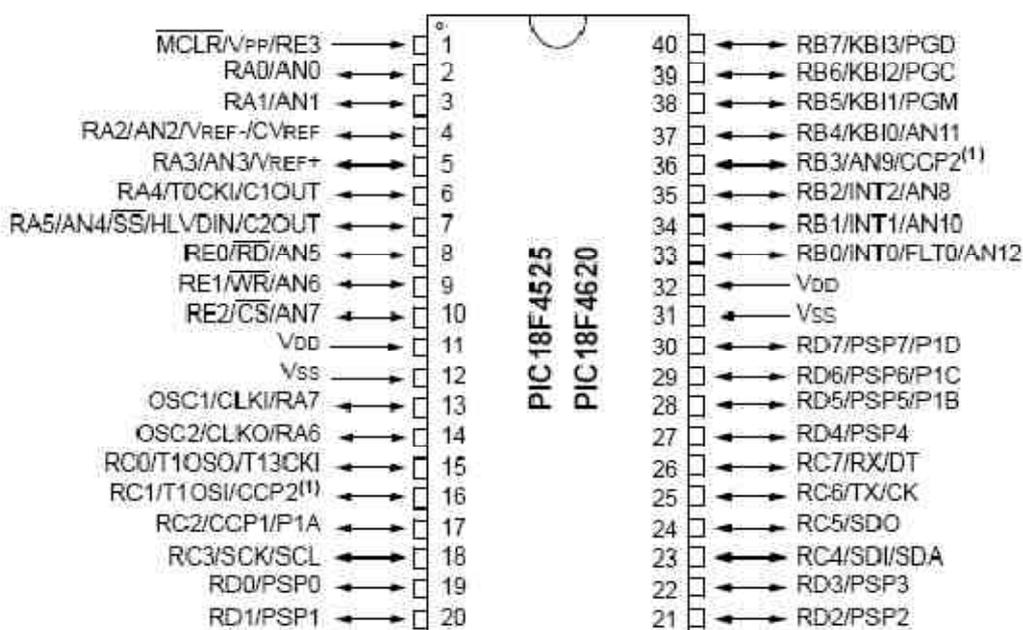
L'objectif dans la programmation du PIC est d'écrire un programme pour effectuer une conversion analogique-numérique des tensions provenant des capteurs et de l'accéléromètre, et de construire une trame de 8 octets, chaque octet donnant la valeur d'un capteur.

*LE MICROCONTROLEUR PIC 18F4525*

Afin de profiter de l'expérience de nos aînés nous avons gardé le même microcontrôleur pour poursuivre cette année. Il s'agit du PIC 18F4525 de la société Microship.



www.HWWTech.com



Choix de l'IDE :

Comme nous utilisons le PIC de Microchip, il était logique d'utiliser l'IDE de la même entreprise, à savoir MPLAB IDE v 8.10 (la dernière version), en téléchargement sur le site microchip.com.

Choix du langage de programmation :

Nous ne connaissons ni le C, ni l'assembleur. Nous avons donc choisi le langage le plus simple : le C. Ce langage a comme atouts d'être utilisé très souvent en programmation et d'être assez abordable. De plus nous avons trouvé un tutoriel très bien fait sur ce langage au site <http://www.siteduzero.com/tuto-3-8-0-apprenez-a-programmer-en-c.html>.

Choix du compilateur :

Nous avons choisi d'utiliser le compilateur C de Microchip pour les PIC 18F : Microchip C18 Toolsuite, téléchargé sur le site [microchip.com](http://www.microchip.com). Pour nous familiariser avec ce compilateur, nous avons utilisé un tutoriel en français :

<http://www.aix-mrs.iufm.fr/formations/filieres/ge/data/PIC/PICC/MCC18%20v14.pdf>

Choix du programmeur :

Nous avons choisi d'utiliser le PICSTART PLUS. Pour le prendre en main, nous avons utilisé le manuel de microchip à l'adresse :

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/51028f.pdf>.

Enfin, nous nous sommes bien évidemment souvent référé au datasheet du PIC 18F4525.

Expérience n°1 : valider les outputs

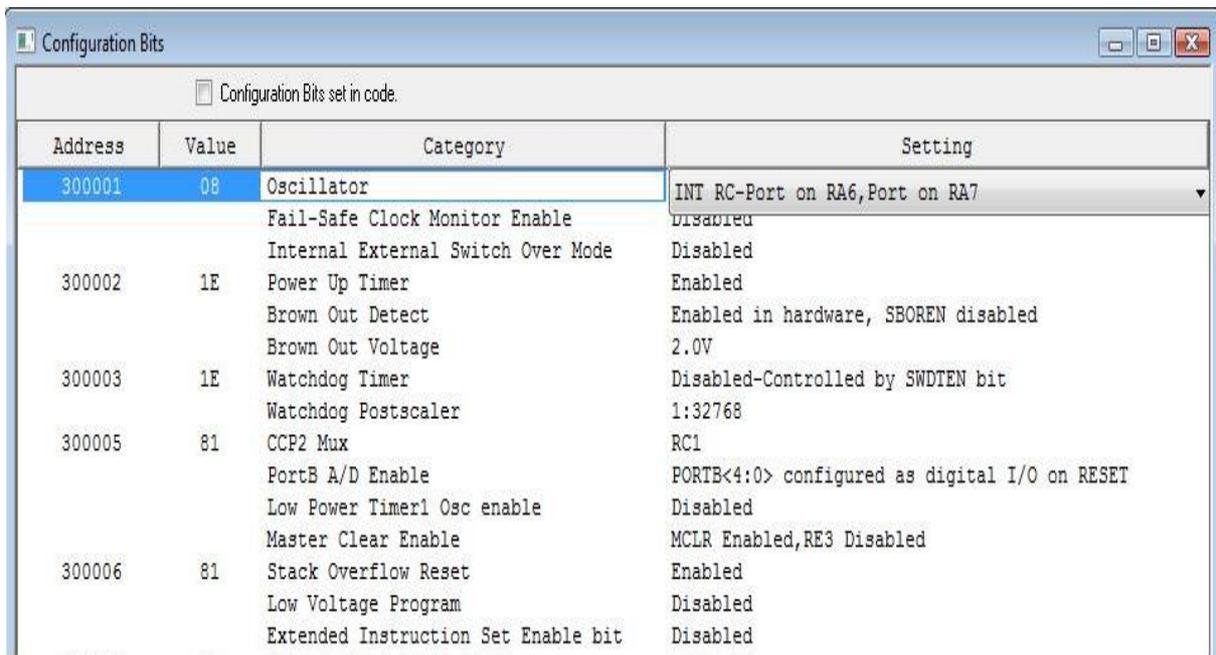
La première expérience que nous avons effectuée est de brancher simplement une LED et une résistance sur une patte du PORTB du PIC, et d'écrire un programme qui permette d'allumer cette diode. Pour cela, nous avons écrit le programme suivant :

```
#include <p18f4525.h>
void main(void)
{
  TRISB = 0; //permet de choisir l'intégralité du PORTB comme sortie digitale.
  while(1)
  {
    PORTB = 0xFF; // les 8 pattes du PORT B sont alimentées
  }
}
```

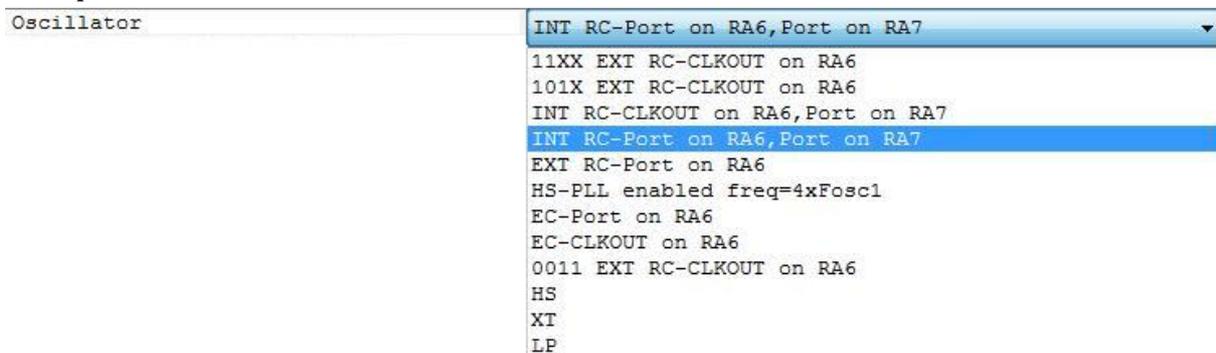
Ce petit programme, pourtant très simple, n’a pas fonctionné tout de suite. En effet, nous ne parvenions pas à faire allumer les diodes situées sur le PORTB.

C’est alors que nous avons fait appel à l’aide d’Ahmad Berjaoui, élève de 2^e année membre du club de robotique de Centrale ayant déjà travaillé sur un microcontrôleur PIC de Microchip.

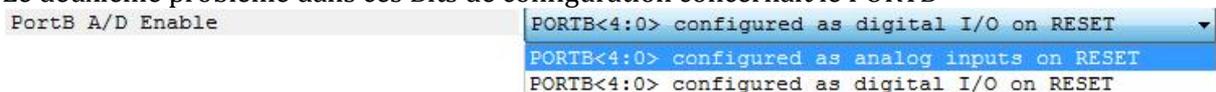
Il nous a montré l’utilité des Bits de configuration du PIC. Le réglage de ces bits de configuration, qui se règlent soit par des lignes de code soit par une fenêtre sous MPLAB, est indispensable au bon fonctionnement du microcontrôleur.



Le problème principal que je rencontrais était lié à l’oscillateur. La première ligne de Configuration Bits était en effet réglée sur un oscillateur externe et le PIC ne pouvait donc pas fonctionner seul.



Le deuxième problème dans ces Bits de configuration concernait le PORTB



Il fallait ici régler le PORTB sur « PORTB<4 :0> configured as digital I/O on RESET pour pouvoir utiliser le PORT B comme sortie numérique.

Enfin, il fallait désactiver le Low Voltage Programmer sinon le PORTB.RB2 ne fonctionne pas. Ces derniers réglages effectués, une diode s'allume quelque soit sa position sur le PORTB.

Expérience n°2 : valider les inputs

Cette deuxième expérience consiste à allumer une diode situé sur le PORTB à condition qu'une tension soit appliquée sur une patte du PORTA. Le programme est le suivant :

```
#include<p18f4525.h>
void main(void)
{
  TRISA = 0b00010000 ; //RA4 est choisi comme entrée analogique
  TRISB = 0; // le PORTB est choisi comme sortie numérique
  PORTB = 0; // Les diodes sont initialisées à 0
  while(1)
  {
    if (PORTA & 0x10) PORTB = 0xFF; // si RA4 est alimenté, le PORTB est alimenté aussi
    else PORTB = 0;
  }
}
```

Expérience 3 : conversion analogique-numérique d'une tension

La troisième étape était de faire fonctionner la conversion analogique-numérique du microcontrôleur. Pour cela nous avons écrit un programme permettant de tester cette fonction. L'idée de ce test est d'envoyer une tension sur une patte du port A du PIC, de convertir ce signal analogique en numérique, et d'afficher la valeur en binaire de cette tension sur 8 diodes branchées sur les 8 pattes du PORTB du PIC.

Voilà le programme :

```
#include "p18f4525.h"

void main(void){
//
//Configuration de l'oscillateur
OSCCONbits.IRCF2 = 1 ; //permet de choisir la fréquence du quartz (ici on prend 8MHz)
OSCCONbits.IRCF1 = 1 ;
OSCCONbits.IRCF0 = 1 ;

TRISB = 0 ; // définit le port B comme output
PORTB = 0 ;
//Configuration de la CAN
//
//définition de ce que sont les entrées et les sorties
TRISA = 0b00000001 ; //RA0 entrée analogique
//
ADCON0bits.ADON = 1 ; //permet de "enable" la conversion
//
ADCON1bits.VCFG1 = 0 ; //la tension de référence sera Vss
ADCON1bits.VCFG0 = 0 ; //la tension supérieure de référence sera celle de Vdd
//
ADCON1bits.PCFG3 = 0 ; //on choisit tout le PORTA comme analogique
ADCON1bits.PCFG2 = 0 ;
ADCON1bits.PCFG1 = 0 ;
ADCON1bits.PCFG0 = 0 ;
//
ADCON2bits.ADFM = 0 ; // les bits seront justifiés à gauche

//
ADCON2bits.ACQT2 = 0 ; // permet de faire une pause de 2TAD avant la conversion
ADCON2bits.ACQT1 = 0 ;
ADCON2bits.ACQT0 = 1 ;
//
ADCON2bits.ADCS2 = 1 ; // donne la fréquence d'acquisition des valeurs (1/f = 1TAD = temps de
conversion de 1bit). On prend ici une fréquence de 8/16 MHz
ADCON2bits.ADCS1 = 0 ;
ADCON2bits.ADCS0 = 1 ;
//
//
while(1){
// Conversion analogique numérique du signal sur A0
ADCON0bits.CHS3 = 0 ; // choisit la chaîne (A0)
ADCON0bits.CHS2 = 0 ;
ADCON0bits.CHS1 = 0 ;
ADCON0bits.CHS0 = 0 ;
ADCON0bits.GO = 1 ; // lance la conversion
while(ADCON0bits.GO==1){ //attend la fin de la conversion
}
PORTB = ADRESH ; // envoie le résultat de la conversion sur le PORTB
}
}
```

Ce programme se divise en plusieurs étapes. Tout d'abord, il faut configurer la vitesse de l'oscillateur interne du microcontrôleur. Ensuite, il faut définir le PORTB, où sont placées les diodes, comme sortie numérique et la patte 0 du PORTA, sur laquelle est envoyée la tension variable, comme entrée analogique. Reste enfin à déterminer le temps d'acquisition des valeurs. Je n'ai malheureusement pas réussi à faire fonctionner ce programme par manque de temps.

Expérience 4 : transmission de données

La deuxième partie du programme final est la transmission des trames données par la conversion analogique-numérique par le port série du microcontrôleur. Nous avons donc écrit un programme pour tester cette partie. Ensuite on peut brancher directement le PIC au port série d'un ordinateur et lire ce qui est envoyé grâce à un terminal.

```
#include "p18f4525.h"
```

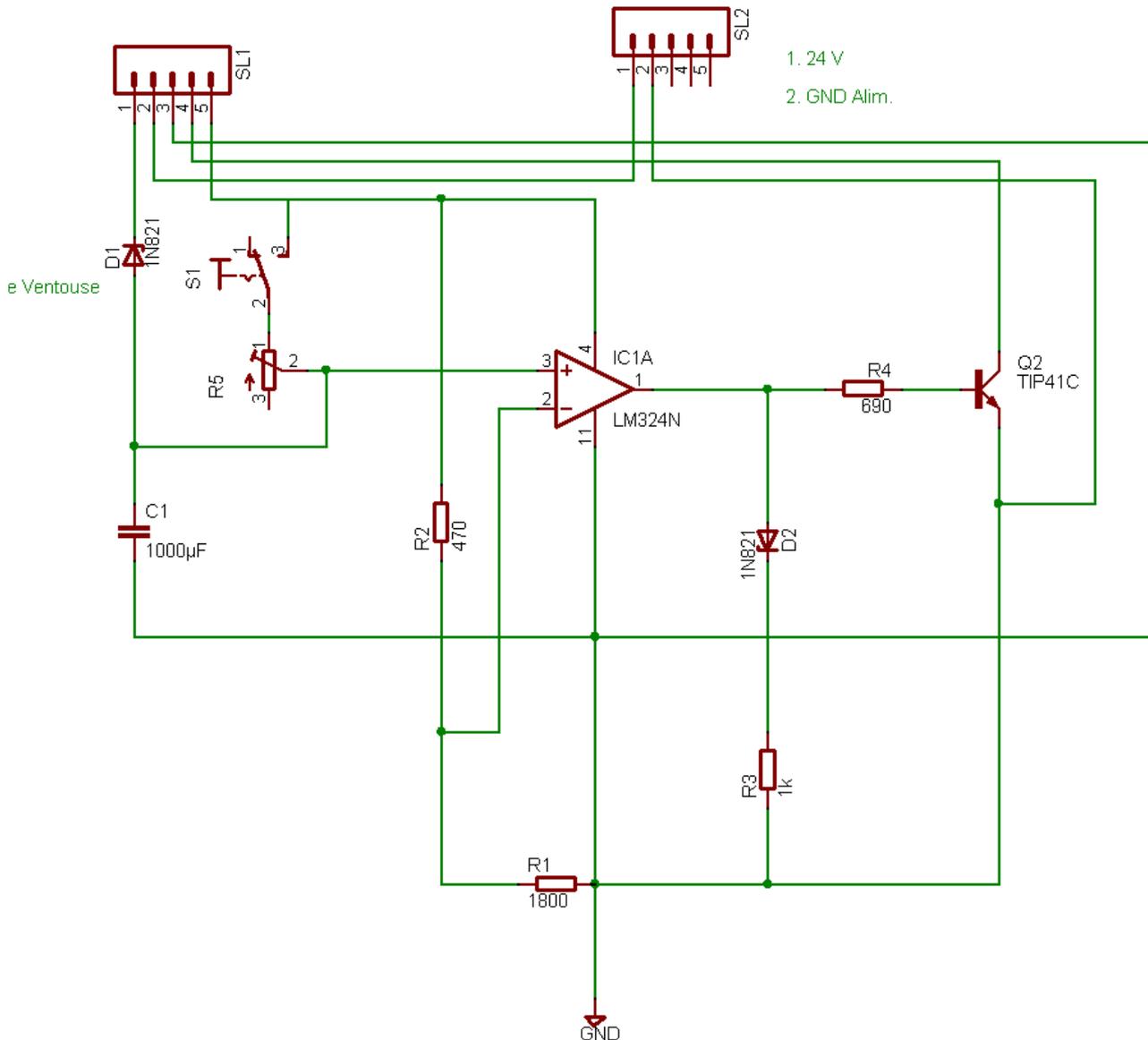
```
void main(void){
//Configuration de l'emetteur
//
TRISCbits.TRISC7 = 1;
TRISCbits.TRISC6 = 0; // On transmet par le port série sur la patte TX
RCSTAbits.SPEN = 1 ;
//
TXSTAbits.BRGH = 1 ; //permet de choisir le type de précision fort
BAUDCONbits.BRG16 = 1 ; //On veut prendre en compte SPBRGH
SPBRGH = 0b00000001 ; // donne la vitesse de transmission (on a choisi N=416 pour avoir 60
SPBRG = 0b10100000 ; // trames par seconde avec une fréquence d'horloge de 8Mhz)
//
TXSTAbits.SYNC = 0 ; // mode asynchrone
//
TXSTAbits.TX9 = 0 ; //on fait un envoi sur 8 bits et pas 9
//
TXSTAbits.TXEN = 1; //on met en service le module EUSART
//
//Configuration de l'oscillateur
OSCCONbits.IRCF2 = 1 ; //permet de choisir la fréquence du quartz (ici on prend 8MHz)
OSCCONbits.IRCF1 = 1 ;
OSCCONbits.IRCF0 = 1 ;

unsigned char trame[8] ;
trame[0] = 0x00 // dans le programme final, la trame fera 8 octets. Pour ce programme de test, on
utilise donc aussi une trame de 8 octets, mais dont on définit la valeur.
trame[1] = 0x02
trame[2] = 0x04
trame[3] = 0x06
trame[4] = 0x08
trame[6] = 0x0A
trame[7] = 0xFF

//envoi de la trame
```

```
TXREG = trame[0] ;
while(PIR1bits.TXIF=0){
}
while(TXSTAbits.TRMT==0){//on attend que le dernier bit soit transmis
}
TXREG = trame[1] ;
while(PIR1bits.TXIF=0){
}
while(TXSTAbits.TRMT==0){//on attend que le dernier bit soit transmis
}
TXREG = trame[2] ;
while(PIR1bits.TXIF=0){
}
while(TXSTAbits.TRMT==0){//on attend que le dernier bit soit transmis
}
TXREG = trame[3] ;
while(PIR1bits.TXIF=0){
}
while(TXSTAbits.TRMT==0){//on attend que le dernier bit soit transmis
}
TXREG = trame[4] ;
while(PIR1bits.TXIF=0){
}
while(TXSTAbits.TRMT==0){//on attend que le dernier bit soit transmis
}
TXREG = trame[5] ;
while(PIR1bits.TXIF=0){
}
while(TXSTAbits.TRMT==0){//on attend que le dernier bit soit transmis
}
TXREG = trame[6] ;
while(PIR1bits.TXIF=0){
}
while(TXSTAbits.TRMT==0){//on attend que le dernier bit soit transmis
}
TXREG = trame[7] ;
while(PIR1bits.TXIF=0){
}
while(TXSTAbits.TRMT==0){//on attend que le dernier bit soit transmis
}
}
}
}
```

LA CARTE DU MINUTEUR



La minuterie qui déclenche l'alimentation de la ventouse (émettant ainsi un champ opposé à celui de l'aimant permanent et libérant ainsi la trappe retenant le parachute prisonnier dans la fusée) fonctionne à l'aide d'un AO en mode comparateur qui bascule de $-V_{sat}$ à $+V_{sat}$ lorsque la charge du circuit RC permet à la tension de l'entrée + de dépasser celle de l'entrée inverseuse. Le transistor devient alors passant, ce qui permet d'alimenter la ventouse.

La diode LED2 doit être visible depuis l'extérieur de la fusée car elle indique que le circuit est correctement alimenté. L'ouverture du parachute étant un élément crucial de sécurité, la minuterie doit fonctionner à coup sûr : la diode LED3 est ainsi un moyen supplémentaire de déceler d'éventuels dysfonctionnements.

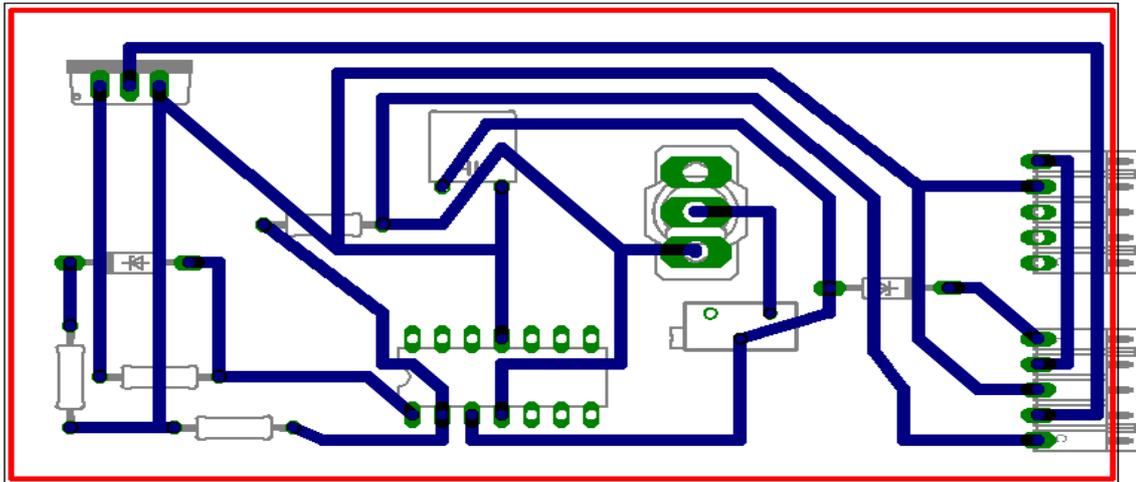
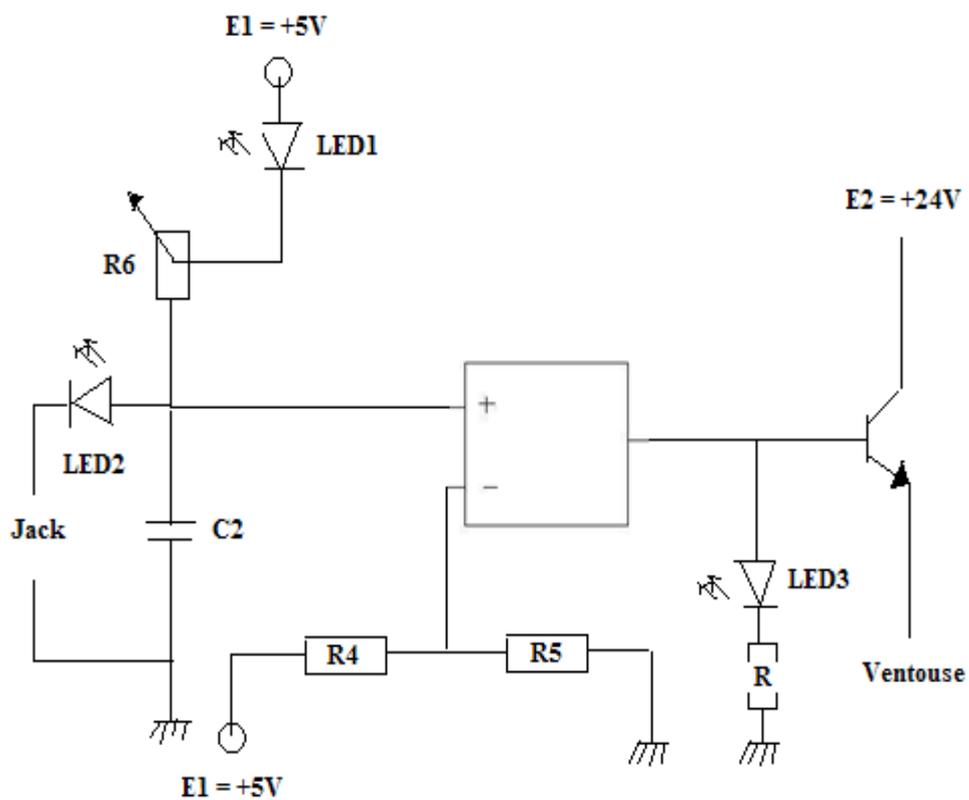


Schéma électronique de la carte minuterie



La première chose à noter est le fonctionnement en mode « comparateur » de l'AO. Deux cas sont à distinguer :

- $V^- > V^+$: Alors l'AO est en saturation basse (0 Volts), et le transistor est donc bloqué. La ventouse n'est donc pas alimentée par E2, et aucun courant ne la traverse : la trappe est maintenue.

- $V^- < V^+$: Alors l'AO est en saturation haute (environ 3,8 Volts), et le transistor devient passant. La ventouse, alimentée, est parcourue par un courant important, ce qui crée un champ magnétique qui compense le champ permanent de l'aimant : la trappe est libérée.

Le principe de fonctionnement de la minuterie repose sur la transition entre ces deux états. Il est facile de calculer V^- car on a un simple pont diviseur de tension.

$$V^- = \frac{R5}{R4 + R5} * E1$$

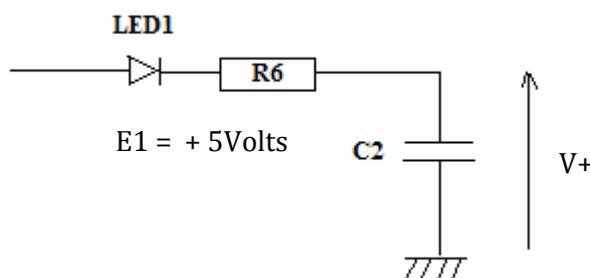
On peut donc facilement faire varier cette tension (astreinte tout de même à rester entre 0 et E1). En fixant :

$$R4 = 465 \Omega ; R5 = 1,725 k\Omega ; E1 = 5V$$

on obtient $V^- = 3,94$ Volts.

Intéressons-nous désormais au circuit de gauche. Lorsque le Jack est branché, les diodes LED1 et LED2 sont allumées, R6 est parcourue par un courant et C2 est chargée sous une tension, notée V_0^+ , égale à la tension de seuil de la diode LED2. Cette dernière varie assez peu avec le courant qui la traverse, et vaut environ 2 Volts. Ceci étant inférieur à V^- , l'AO est en saturation basse et la trappe est maintenue lorsque le jack est branché.

Désormais, on débranche le jack. On obtient alors, comme montage équivalent, le même montage à ceci près qu'on y a enlevé la branche avec le jack et la diode LED2. La partie gauche se résume très simplement à un circuit de charge RC série. La tension sous laquelle ce condensateur se charge est égale à $E1 - V_{seuil}(LED1)$, et en théorie, elle varie donc avec le temps, car la tension seuil d'une diode dépend faiblement du courant qui la traverse. Toutefois, ceci est presque impossible à évaluer numériquement, et a priori on peut le négliger dans un premier temps. L'étude se résume alors au simple montage suivant :



Un élément auquel n'avaient pas pensé nos prédécesseurs, en négligeant complètement la tension de seuil aux bornes de la LED1 est le fait que la tension efficace de charge ne serait pas suffisante pour faire basculer l'AO en saturation haute ! En effet, C2 se charge sous $E1 - V_{\text{seuil}}(\text{LED1})$, soit environ $5 - 2 = 3$ Volts, ce qui est inférieur à V^- , et on ne peut donc pas espérer la moindre réponse au débranchement du jack. Il nous a donc fallu retirer LED1, par ailleurs peu utile, de manière à charger C2 sous 5 Volts.

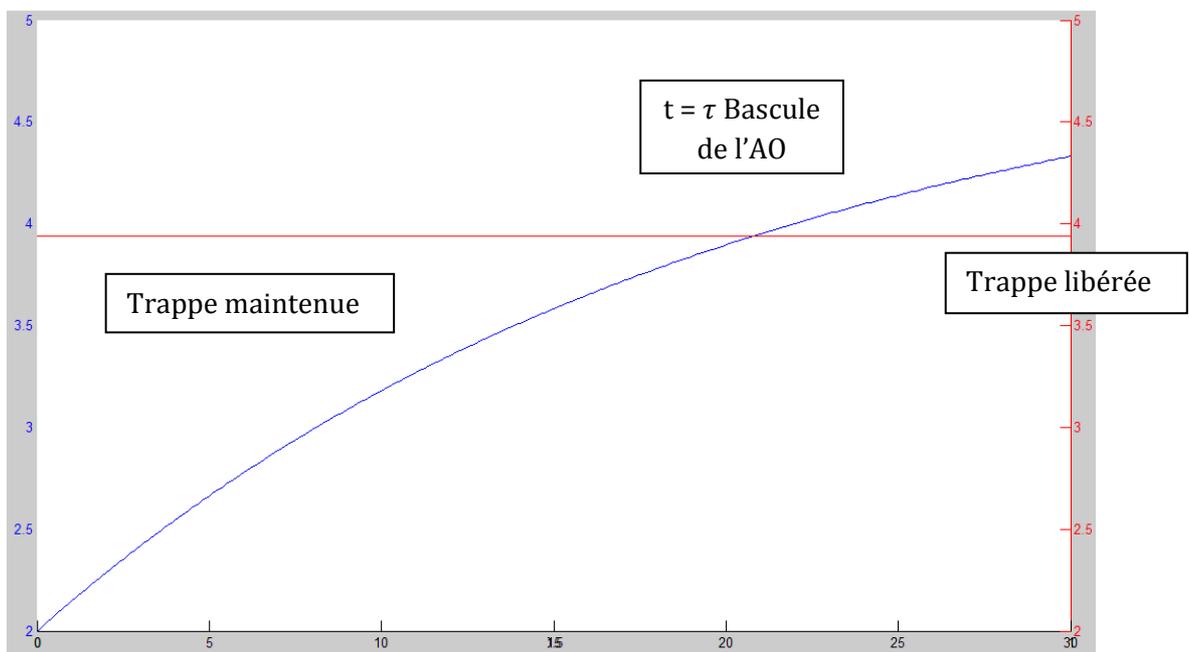
La solution est alors, par simple résolution de l'équation différentielle du premier ordre en V^+ , en notant $V0$ la tension V^+ avant débranchement du Jack.

$$V^+ = E1 + (V0 - E1)e^{-\frac{t}{R6C2}}$$

dont on peut facilement vérifier qu'elle dépasse effectivement V^- , notée V , à une date τ , telle que

$$\tau = R6 * C2 * \ln \frac{E1 - V0}{E1 - V}$$

La modification de $R6$, grâce à l'utilisation d'un potentiomètre, permet de modifier τ , date d'ouverture du parachute.



II- ESSAIS EN SOUFFLERIE

Il nous a paru intéressant de profiter de l'opportunité d'être au laboratoire EM2C pour utiliser la soufflerie afin de tester divers paramètres sur différentes configurations de la fusée. Nous allons présenter dans cette partie quelles expériences nous avons envisagées, comment nous les avons mises en œuvre, quels résultats nous avons obtenus, et quelles difficultés nous avons rencontrées.

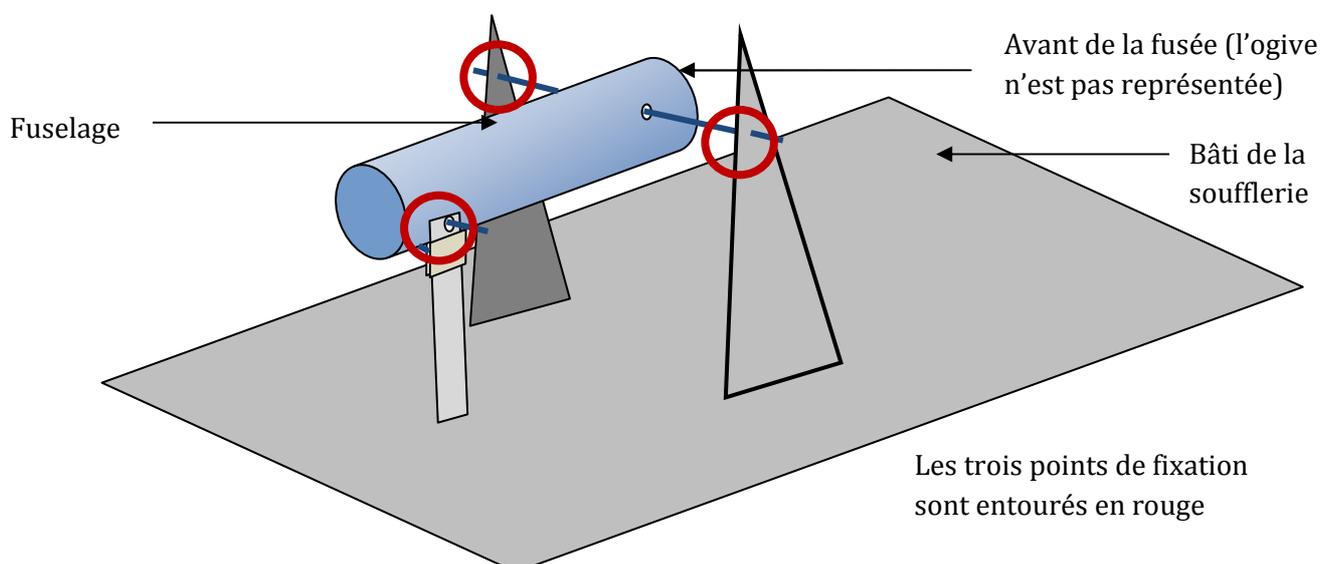
EXPERIENCES ENVISAGEES

Parmi les expériences possibles nous avons envisagé de :

- Tester tout d'abord le bon fonctionnement des capteurs
- Tester l'influence de l'angle d'incidence sur le profil de pression le long de l'ogive
- Mesurer la traînée (différence entre une ogive conique et la nôtre)
- Mesurer le couple de rappel induit par les ailerons en fonction de l'angle d'incidence

MISE EN ŒUVRE

La fusée ne rentrait pas en intégralité dans la partie utilisable de la soufflerie (elle était de plus trop lourde pour la potence, et on ne voulait pas la détériorer en ajoutant sur le fuselage des mécanismes de fixation). On a donc récupéré un morceau de tube de même diamètre sur que l'on a équipé de trois points d'attache (cf. schéma ci-dessous).

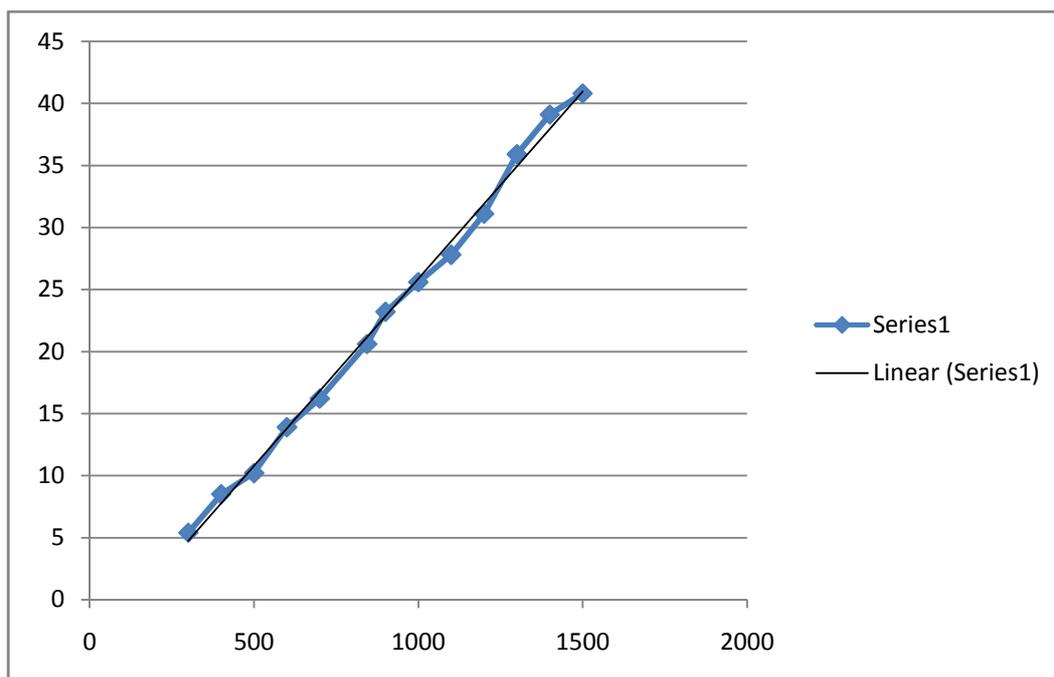


RESULTATS

Etalonnage de la soufflerie

Nous avons réalisé toutes nos expériences dans la grande soufflerie du laboratoire EM2C. Celle-ci permet d'une part de mettre des objets de taille importante comme un morceau de fuselage de fusée avec une ogive, et permet d'autre part d'atteindre des vitesses d'écoulement de 40 m.s^{-1} .

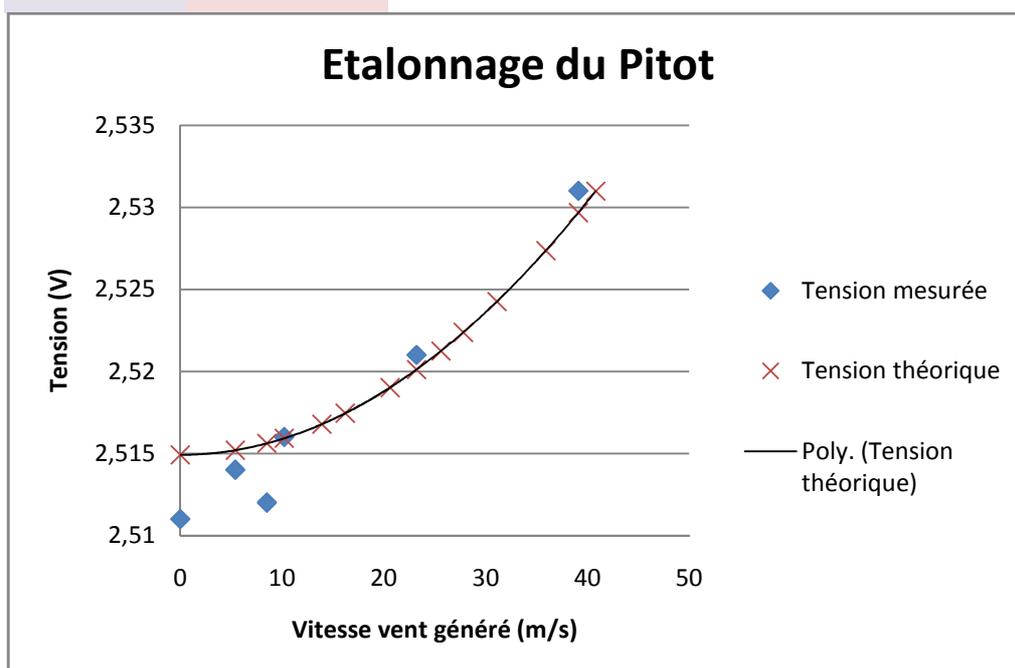
La correspondance entre la vitesse de rotation du ventilateur et la vitesse du vent généré dans la veine d'essai (mesurée avec un fil chaud) est la première chose qu'il nous a paru nécessaire d'établir avant d'entamer nos essais. Cela permet par la suite de se contenter de lire la valeur affichée par le tachymètre et de ne pas avoir à mesurer la vitesse de l'air à chaque nouvelle mesure.



Résultats

Voici les résultats que nous avons obtenus au niveau du tube Pitot en faisant varier progressivement la vitesse de l'air dans la veine d'essai, la fusée restant à incidence nulle.

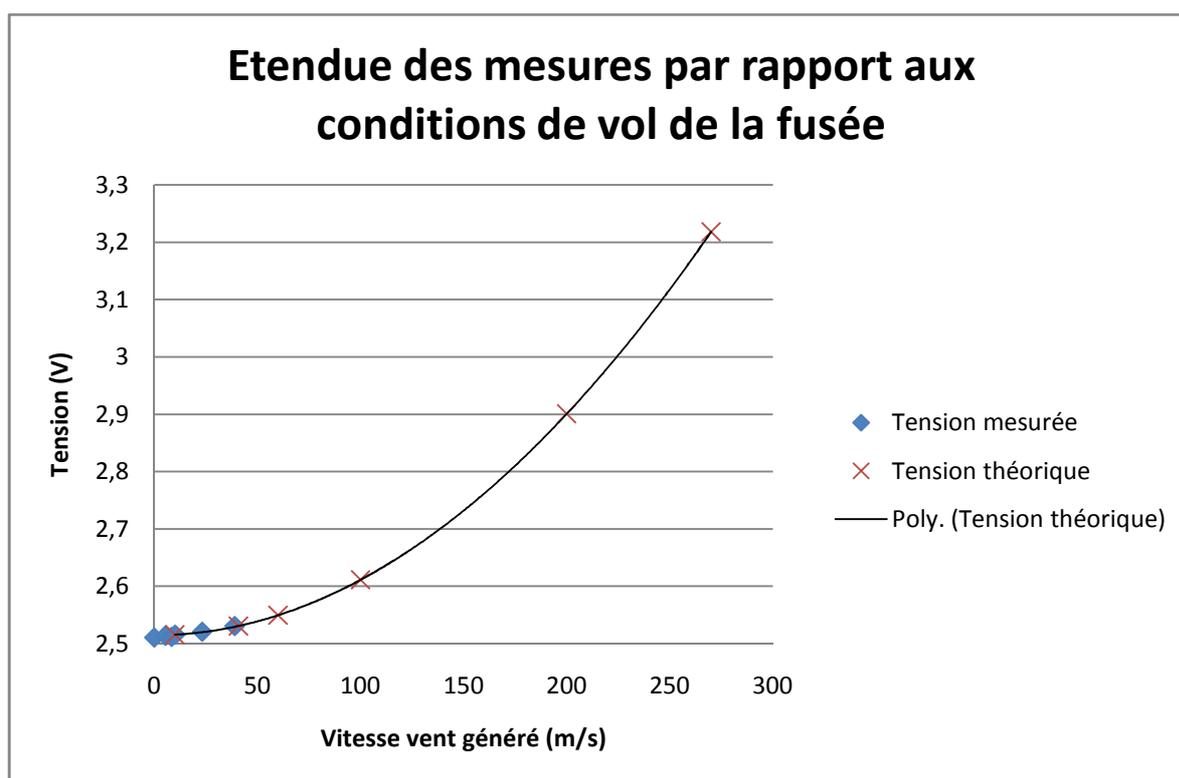
Vitesse vent (m/s)	Tension théorique (V)	Tension du capteur du Pitot (en V)
0	2,5149	
5,4	2,5152	2,511
8,5	2,5156	2,514
10,2	2,5159	2,512
13,9	2,5168	2,516
16,2	2,5175	
20,6	2,5190	
23,2	2,5201	
25,6	2,5212	2,521
27,8	2,5224	
31,1	2,5243	
35,9	2,5274	
39,1	2,5297	
40,8	2,5310	2,531



La tension théorique est obtenue à l'aide de la feuille de donnée constructeur du capteur du tube Pitot. Ce dernier a une sensibilité de 0,133 V par PSI (avec l'équivalence 1 bar=14,51 PSI) et une tension d'offset voisine de 0,5V (que l'on mesure plus précisément à l'aide de la tension obtenue pour 1,013 bar). D'autre part on a avec le théorème de Bernoulli : $P=P_0+1/2*\rho*V^2$, ce qui permet de relier la tension que l'on devrait obtenir à la vitesse d'écoulement de l'air en entrée de veine d'essai.

CRITIQUES

A première vue les résultats obtenus ne semblent pas très concluants. Cependant, il faut bien voir que les variations de tensions observées sont très faibles, mais varient avec le carré de la vitesse de l'air incident, donc deviennent plus tangibles à partir de 50m.s⁻¹. Voici une courbe représentant la tension sur la gamme de vitesse typique du vol de la fusée afin de fixer les idées (on voit que la soufflerie couvre une maigre partie à faible vitesse).



Comme nous l'avons dit lors de la présentation des cartes électroniques, le choix des capteurs effectué l'an dernier n'est pas très judicieux car il varie seulement de l'ordre de 1V au cours du vol et sa sensibilité n'est pas optimale. Nous nous sommes malheureusement rendus compte de cela trop tard et acheter de nouveaux capteurs aurait considérablement retardé nos essais en soufflerie.

CONCLUSION

Nous regrettons de ne pas avoir effectué toutes les expériences que nous souhaitions, ce à cause de la faible sensibilité des capteurs (ou de la trop faible vitesse d'écoulement de la soufflerie). Nous sommes cependant satisfaits d'avoir pu découvrir cet outil largement utilisé en aéronautique qu'est la soufflerie. Ce fut par ailleurs enrichissant de concevoir une expérience, de la réaliser, et d'exploiter les résultats.



ECOLE CENTRALE PARIS

COMPTE-RENDU DE LANCEMENT
FUSEX SHEHERAZADE - 2008

Arthur Droit
Eric Joffre
Marc Locheron

Préambule

Le présent rapport décrit la finalisation de notre fusée expérimentale Shéhérazade, son vol au site de la Courtine le 31 Juillet 2007, et présente les résultats obtenus.

Avant tout, nous tenons à remercier chaleureusement Clément Marion, notre référent Planète-Science qui nous a accompagnés tout au long de l'année, ainsi que toutes les personnes de l'association qui nous sont venues en aide au cours de cette fabuleuse aventure. Nous avons vraiment passé des instants formidables, depuis l'enthousiasme des débuts du projet jusqu'à l'excitation des quelques nuits blanches passées à souder au cours des dernières semaines. Les nombreuses frayeurs que nous avons pu avoir ainsi que les difficultés techniques parfois déroutantes que nous avons traversées ont rendu immense le plaisir que nous avons eu à voir notre fusée s'envoler.

Nous n'allons pas détailler ici toute la genèse du projet qui a été décrite dans d'autres documents, mais nous décrirons plutôt les derniers moments qui nous ont permis de valider le cahier des charges et de lancer Shéhérazade sur son vol nominal. Les rapports d'avancement avant la Courtine n'ont pas été modifiés a posteriori ce qui explique certaines explications fausses comme le fait que nous devons rajouter des hublots en plexiglas (nous pensions alors que cela était nécessaire).

Contents

Préambule	2
Finalisation du projet à la Courtine	4
Présentation de Shéhérazade	4
Etat d'avancement au début du programme de lancement à la Courtine	5
Le vol	6
Résultats pour le profil de pression	9
Filtrage des données	9
La théorie.....	11
Résultats pour l'accélération.....	13
Reconstitution d'un scénario de vol.....	13
Conclusion	16

Finalisation du projet à la Courtine

Présentation de Shéhérazade

Notre projet est tout ce qu'il y a de plus banal en termes d'architecture. En effet notre fusée expérimentale est constituée d'un tube d'aluminium, muni d'ailerons classiques, d'un parachute cruciforme retenu dans sa case par une trappe verrouillée par une ventouse magnétique. La spécificité de notre fusée réside plutôt dans notre expérience embarquée. En effet notre ogive, usinée en ABS par prototypage rapide présente six orifices reliés à des tuyaux branchés sur des capteurs de pression. Nous avons par ailleurs étudié les caractéristiques théoriques d'un écoulement autour d'une ogive comme la nôtre. L'objectif de notre projet est donc d'établir une corrélation entre théorie et expérience. D'autre part nous avons embarqué un accéléromètre mesurant l'accélération verticale de la fusée. Cette information était censée valider l'information de vitesse fournie par le tube Pitot (prise de pression située à la pointe de l'ogive). Notons également que nous avons muni la fusée d'un GPS à clé USB dont nous n'avons malheureusement pas pu récupérer les données puisque nous n'avons pas retrouvé notre engin !

Les tensions fournies par les capteurs sont filtrées puis numérisées et multiplexées par un microcontrôleur sur une trame constituée de 10 bits de synchronisation suivis par 10 bits par capteur (8 bits de donnée et 2 bits de parité). A chaque bit (0 ou 1) correspond une fréquence. Ainsi les données sont modulées en fréquence par un VCO avant d'être émises en signal radio par le Kiwi.

L'électronique de la fusée est scindée en deux grandes parties indépendantes, la télémétrie que l'on vient d'évoquer et l'électronique de récupération visant à alimenter la ventouse 20 secondes après le décollage afin d'ouvrir le parachute. Cette dernière est constituée d'un simple circuit RC se chargeant avec une constante de temps connue jusqu'à faire basculer en saturation haute un AO, ce qui provoque l'ouverture d'un transistor.

Etat d'avancement au début du programme de lancement à la Courtine

Là encore nous ne détaillerons pas la réalisation technique de notre fusée présentée dans un précédent rapport. En revanche nous présenterons les points-clefs qui ont posé problème quelques jours avant le lancement.

L'antenne

En arrivant à la Courtine, notre fusée était globalement viable. Il manquait essentiellement l'implantation de l'antenne. Nous pensions que sa mise en place ne poserait pas de problème (imaginant qu'il s'agissait d'un fil mou). L'architecture déjà en place dans la fusée ne permettant pas beaucoup de marge de manœuvre, nous avons eu recours à une antenne fixée le long du fuselage sur son flanc extérieur.

Alésage de la bague de retenue moteur

Lors du dernier rendez-vous à Ris-Orangis avant la Courtine nous nous sommes aperçus que le moteur dépassait de la fusée. La bague de retenue a dû être alésée pour être transformée en bague de guidage, et il a donc fallu ajouter une patte de retenue amovible pouvant être fixée par le pyrotechnicien en rampe.

Mise en place de témoins

En arrivant à la Courtine, il nous manquait des circuits de témoins lumineux prouvant le bon déroulement de la mise en route des cartes. Cette étape n'a pas posé de problème.

Une électronique capricieuse...

Finalement en allant à la Courtine il ne nous restait plus qu'à tester l'intégration. Tous les éléments d'électronique fonctionnaient séparément. Il suffisait de tester la chaîne globale montée dans la fusée. Nous avons pensé à tort que c'était un détail...

En effet, un régulateur de tension (nécessaire pour les éléments sensibles à toute variation d'alimentation comme les capteurs ou la minuterie) qui fonctionnait pour l'alimentation de telle ou telle carte séparément, défaillait lorsque la chaîne était testée dans sa totalité. Il nous a fallu beaucoup d'essais et l'aide d'Olivier de Planète Sciences pour localiser la source de la panne.

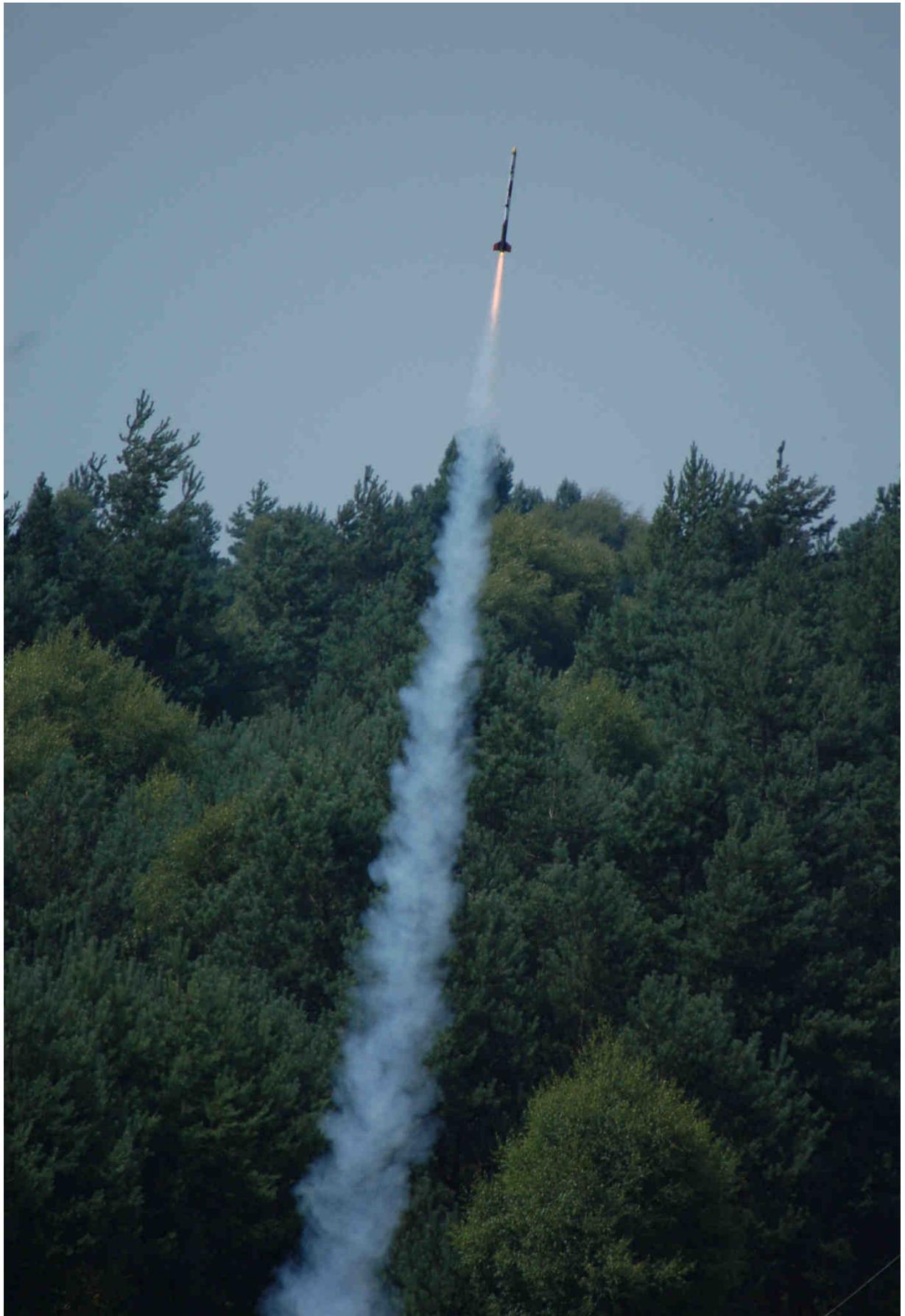
Le vol

Shéhérazade a été certifiée le mercredi 30 Juillet pour voler le 31 juillet. Son vol fut nominal mais malheureusement nous ne l'avons jamais retrouvée. En effet elle était particulièrement bien motorisée pour son poids ce qui explique qu'elle soit partie extraordinairement vite et haut !

Voici quelques photos du décollage :





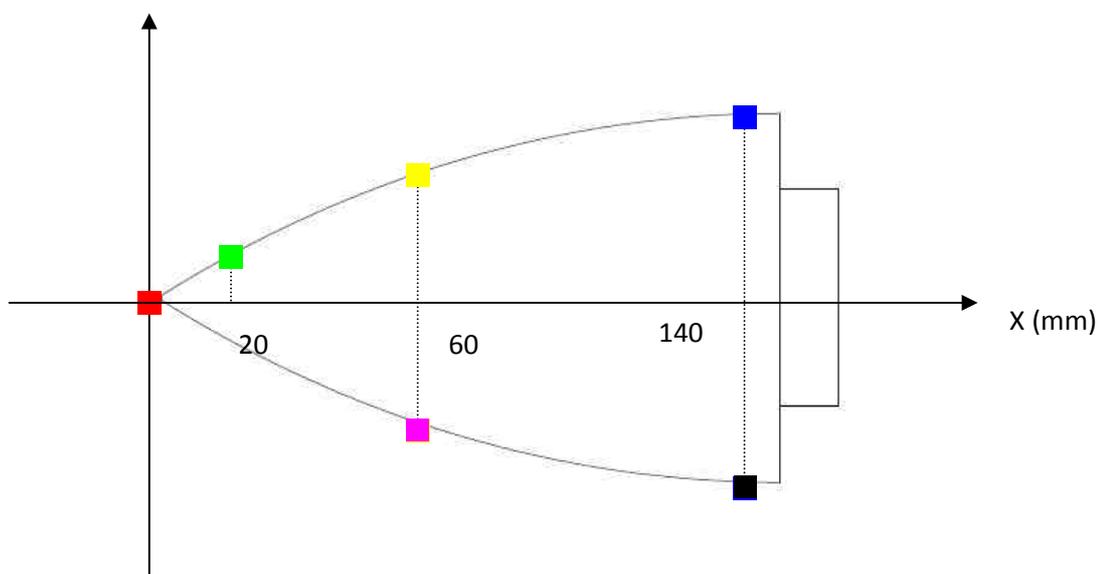


Résultats pour le profil de pression

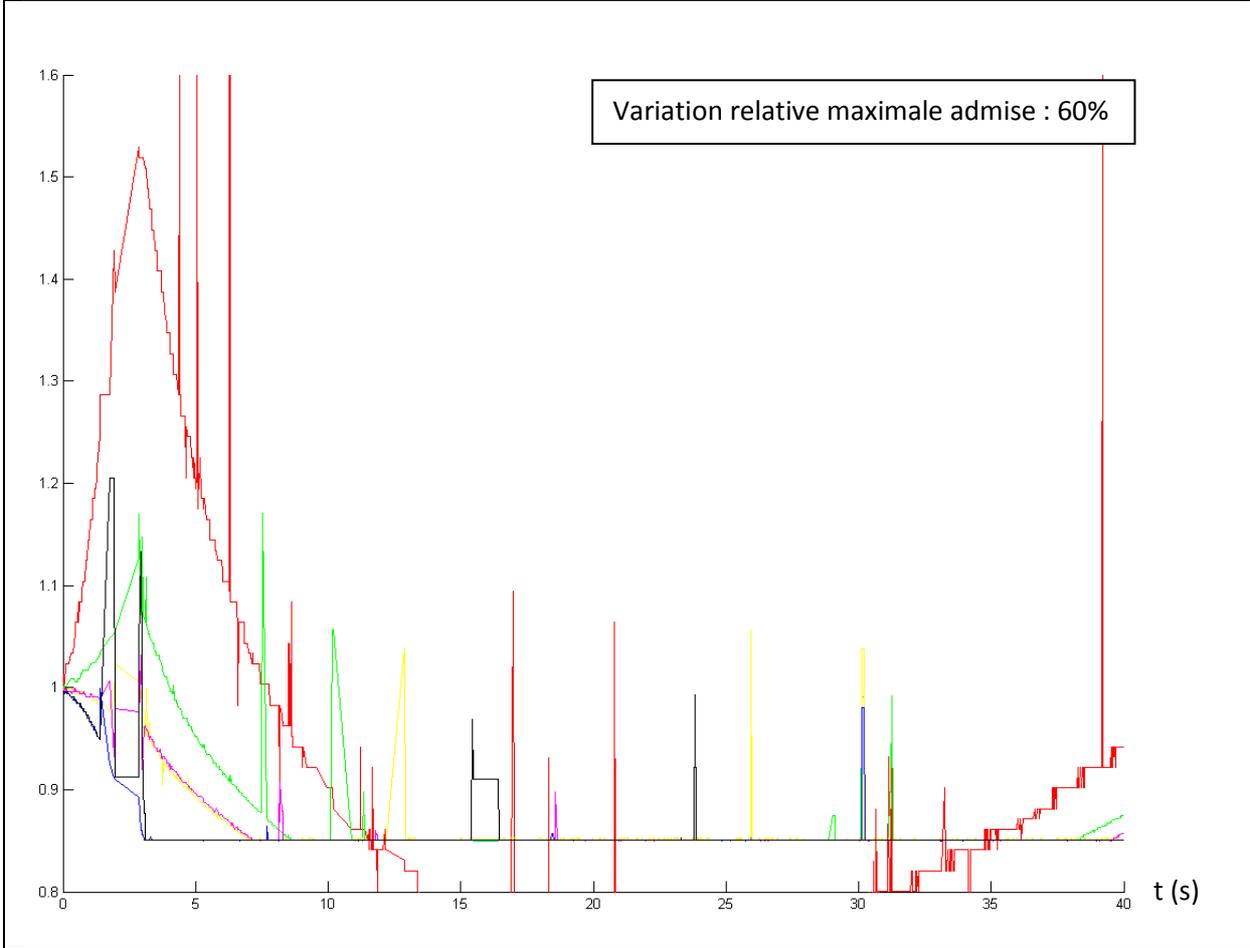
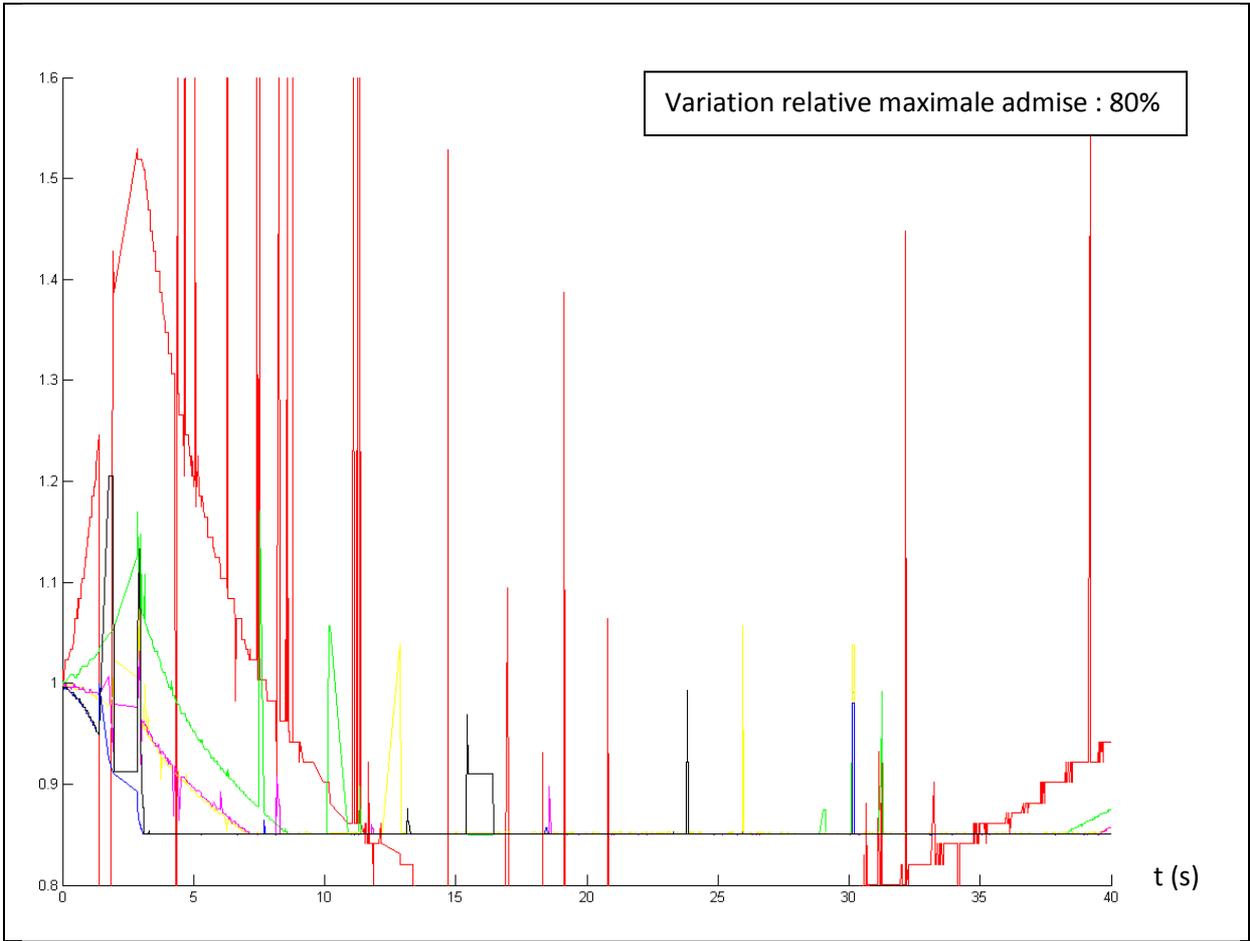
Nous en arrivons enfin à l'aboutissement de notre projet : l'exploitation des résultats. Les données fournies par la station de réception au sol sont brutes, c'est-à-dire qu'elles nous reviennent sous forme de tableau Excel à 7 colonnes (une colonne par capteur), chaque valeur étant un entier entre 1 et 256. Les lignes du tableau sont les différentes trames (espacées d'un pas de temps de 0,02 secondes en moyenne). La date de chaque trame est donnée par l'horloge du récepteur mais des sauts de temps apparaissent (probablement dus à des mesures non transmises par intermittence sous l'effet par exemple du masquage de l'antenne par le fuselage).

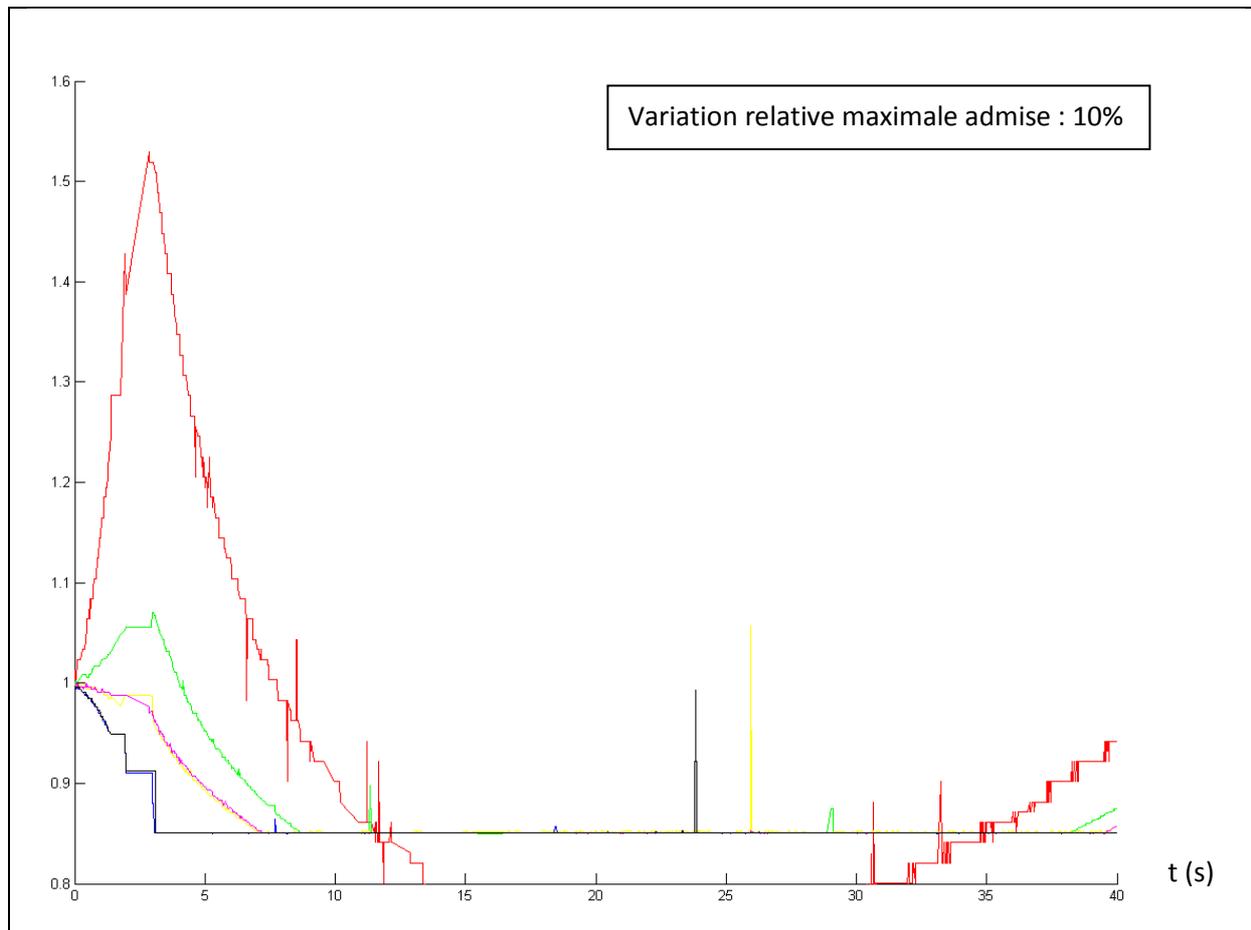
Filtrage des données

La première étape consiste à filtrer les données, c'est-à-dire que nous éliminons tous les points trop écartés de la moyenne locale (calculée sur les deux plus proches voisins par exemple). Le graphe suivant montre l'évolution de nos signaux avec divers degrés de filtrage. Chaque courbe a la couleur du capteur, positionné sur le schéma ci-dessous, auquel elle correspond.



Position des différents capteurs de pression sur l'ogive





On remarque que nous n'avons pas judicieusement choisi les capteurs situés le long de l'ogive puisque ces derniers ont saturé à environ 0,85 bar. La courbe complète du signal donné par le Pitot filtré est présentée plus loin dans la reconstitution du scénario de vol.

La théorie

Une évaluation de la pression au cours du temps pour chaque capteur a été obtenue en couplant une estimation de la trajectoire avec une expression donnant la pression en un point d'abscisse x du fuselage en fonction de la vitesse d'écoulement.

Détermination de la trajectoire

La trajectoire s'obtient simplement en écrivant la relation fondamentale de la dynamique appliquée à la fusée. Cette dernière est soumise à son poids, à la poussée du moteur, à un terme de portance (qui dépend de l'incidence) et un terme de traînée. On projette les équations de quantité de mouvement selon les axes horizontaux et verticaux. On écrit également l'équation du moment. Notons que la masse dépend du temps car la consommation de carburant (poudre) a un effet non-négligeable sur le mouvement.

Pour simplifier, on suppose que la fusée est stable et ne prend pas d'incidence au cours du temps. On connaît par ailleurs la loi de poussée du moteur et sa consommation :

$$\begin{aligned}
 F(t) &= 900-167 \times t \text{ pour } t < 3\text{s} \text{ (F donnée en N);} \\
 &= 400 \times (1-1.67(t-3)) \text{ pour } 3\text{s} < t < 3.6\text{s} \\
 &= 0 \text{ sinon.}
 \end{aligned}$$

Enfin on suppose que le coefficient de traînée de la fusée est constant égale à $C_a=0,6$ et sa surface de référence $S=4985\text{mm}^2$. La traînée s'exprime : $R_a = \frac{1}{2} \rho S C_a$ où ρ varie avec l'altitude selon la loi souvent utilisée en mécanique du vol : $\rho=(20-z)/(20+z) \times \rho_0$ où z est l'altitude en km.

On obtient les équations suivantes (v signifie bien évidemment vitesse, a l'accélération, les indices x et z signifient respectivement horizontal et vertical, et θ est l'angle entre l'axe de la fusée et la verticale :

$$m(t) \cdot a_x = (F(t) - R_a) \cdot \sin(\theta);$$

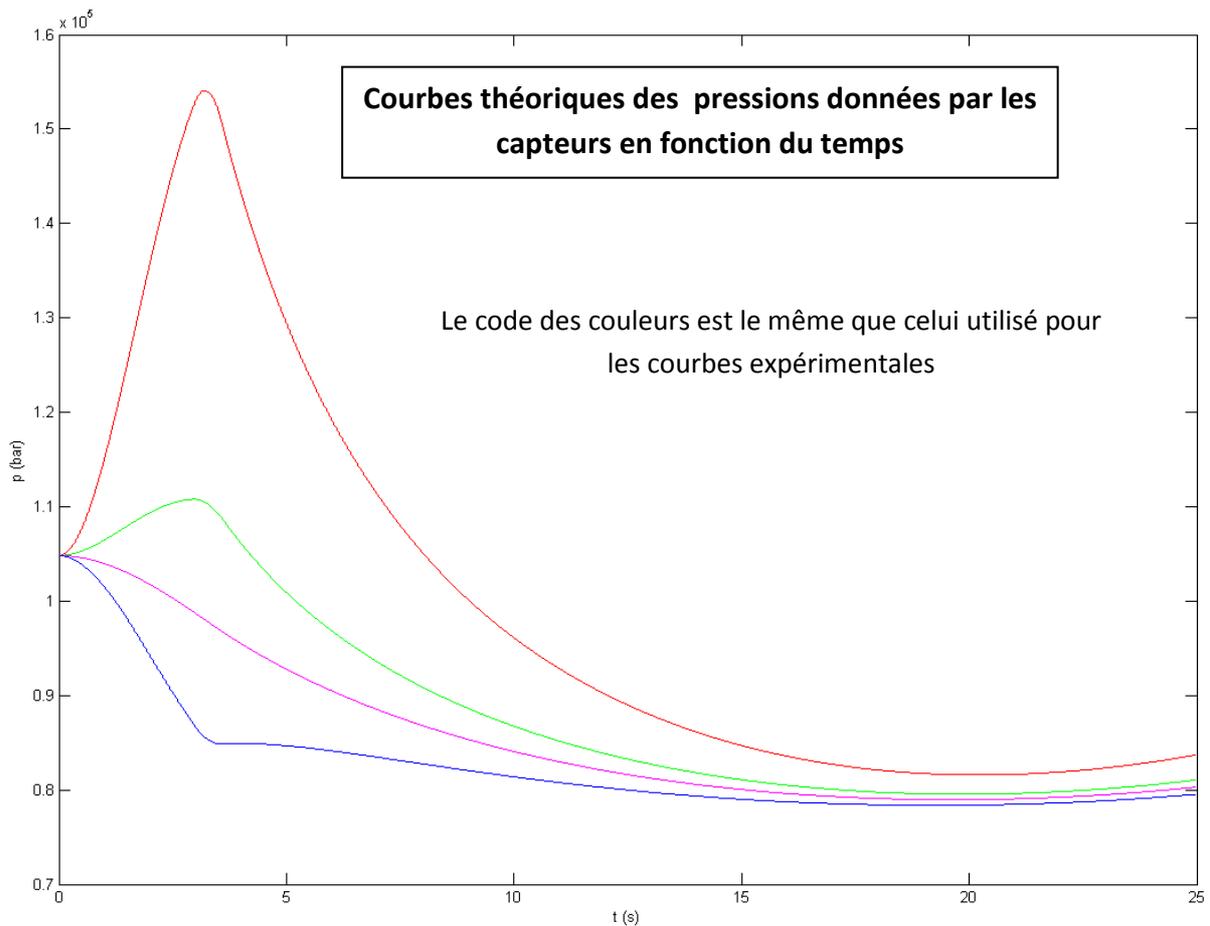
$$m(t) \cdot a_z = (F(t) - R_a) \cdot \cos(\theta) - m(t) \cdot g;$$

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{v_z}{\sqrt{v_x^2 + v_z^2}} \right)$$

Détermination de la pression en fonction de la vitesse incidente

On utilise la théorie des corps élancés pour estimer le champ de pression autour de l'ogive. Cette théorie n'est valable que pour des nombres de Mach assez faible et loin de l'extrémité du corps étudié. Aucune de ces conditions n'est vérifiée, et pourtant cette théorie comparée à des simulations numériques sous Fluent s'avère satisfaisante dans notre cas.

Connaissant la trajectoire donc la vitesse au cours du temps nous pouvons tracer la pression donnée par chaque capteur en fonction du temps.



Il est intéressant de noter que l'on obtient expérimentalement des courbes à l'allure très proche de celle des courbes théoriques. Il ne faut cependant pas trop chercher à comparer numériquement ces courbes puisque la théorie est obtenue avec de nombreuses approximations.

Résultats pour l'accélération

L'accéléromètre mesure l'accélération selon l'axe de la fusée dirigé vers le bas. Les données obtenues sont très bruitées. En appliquant un filtre passe-bas d'ordre 1 de gain 1 et de fréquence de coupure $f=5\text{Hz}$, on obtient un signal plus propre et lisible. On retrouve un pic d'accélération à 13g au décollage voisin des 15g prévus théoriquement. Les courbes sont présentées plus loin dans la reconstitution du scénario de vol.

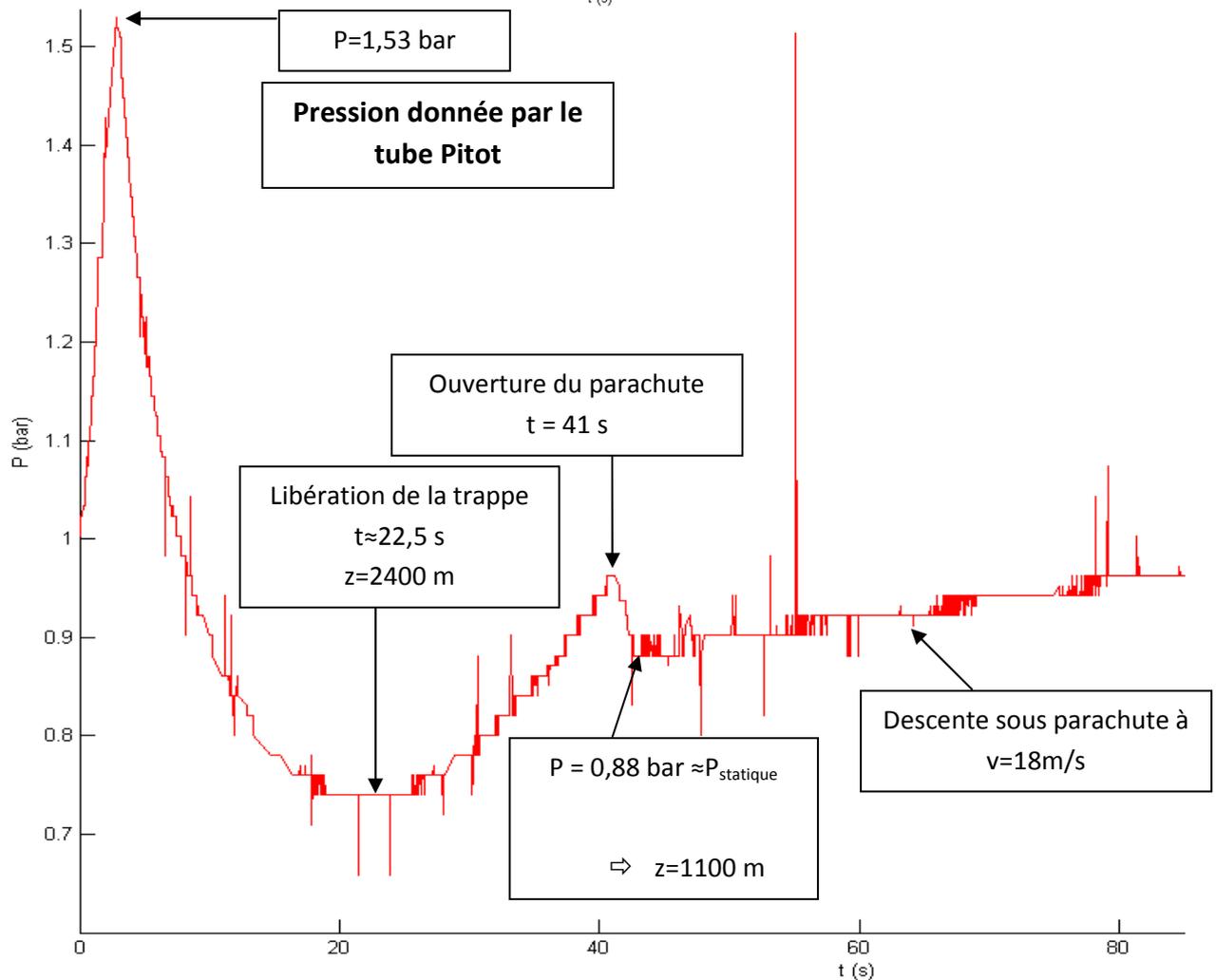
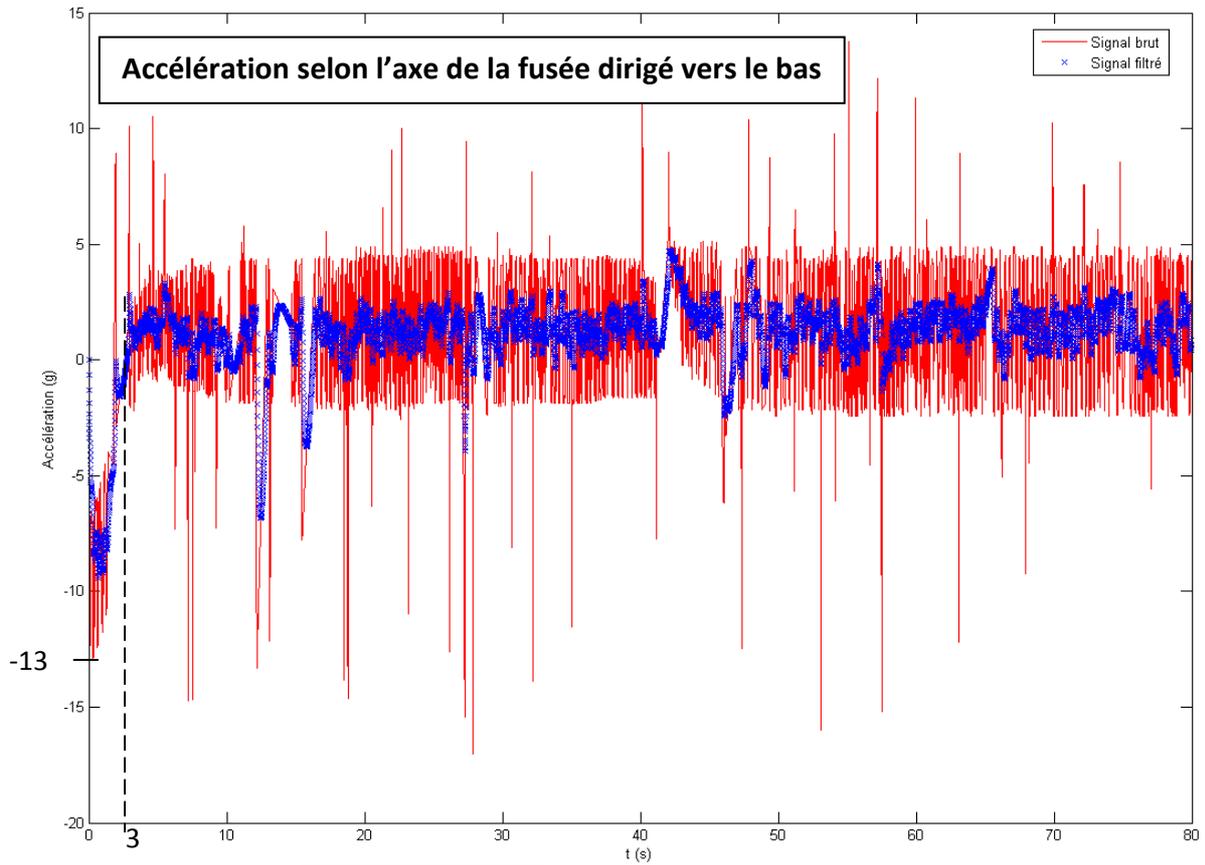
Reconstitution d'un scénario de vol

Nous avons tenté d'établir le scénario du vol de la fusée à partir des différents signaux filtrés fournis par les capteurs.

Le décollage se déroule comme prévu, la fusée subit une accélération vers le haut pendant environ 3 secondes comme la théorie le prévoyait. Elle culmine au bout de 22,5 secondes (là encore nous

retrouvons la valeur prévue par la trajectoire). La vitesse de la fusée est alors quasi-nulle, et la pression mesurée en pointe d'ogive est quasiment la pression statique. Nous trouvons 0.74 bar. On utilise une loi de pression linéaire en fonction de l'altitude (hypothèse tout à fait acceptable aux faibles altitudes auxquelles nous évoluons) : $P \text{ (bar)} = 1 - 0,108 * z \text{ (km)}$, on trouve une altitude d'apogée de 2400m.

A l'apogée, la ventouse magnétique libère la trappe, mais cette dernière reste plaquée contre le fuselage. La fusée retombe en chute libre. A $t=41s$ le parachute parvient enfin à s'ouvrir. La pression mesurée par le Pitot est la pression statique car l'ogive est dirigée vers le haut et se trouve donc abritée de l'écoulement incident. Ceci est confirmé par le fait que tous les capteurs donnent la même valeur durant cette phase (dès lors que l'on repasse au-dessus du seuil de saturation pour les capteurs 2 à 6). On trouve une altitude d'ouverture de parachute $z=1100$ m environ. La fusée chute ensuite à vitesse constante $v=18m/s$ (on remonte à cette valeur d'après la loi pression/altitude et la pente de la droite de la pression en fonction du temps à partir de $t=41s$).



Conclusion

Notre objectif initial a été atteint : la qualité des courbes expérimentales obtenues dépasse nos espérances. Au vu de tous les problèmes que nous avons eu à régler pour obtenir une chaîne de télémétrie qui fonctionne, nous n'imaginions pas récupérer des données, certes bruitées, mais exploitables, au cours d'un vol imposant tant de contraintes mécaniques à toute l'électronique.

L'expérience Fusex nous a vraiment comblés en tout point de vue. Nous avons acquis des compétences dans de nombreux domaines et eu la satisfaction de voir voler un objet complexe (à notre petite échelle !) et de mener à bien notre expérience embarquée. Nous remercions encore une fois Planètes Sciences pour nous avoir permis de vivre cette formidable aventure.