

# **Compte rendu d'expériences FUSEX 2013** **École de l'Air**



**Par les Sous-lieutenants Goulet de Rugy Charles,  
Koch Thomas et Lavoix Jérôme**

**Sous la direction du Capitaine Burg Matthieu**

# Sommaire

Introduction	page 3
I) Mesure de vitesse à l'aide du capteur de pression différentielle	page 4
II) Mesure d'accélération et facteurs de charges	page 6
III) Mesure GPS	page 8
Conclusion	page 10

## **Introduction :**

Le projet de l'École de l'Air a été mené cette année par les Sous-lieutenants GOULLET DE RUGY, KOCH et LAVOIX, et supervisé par le Capitaine BURG, dans la continuité du lancement de la première Fusex de l'École de l'Air en 2012. Nous avons travaillé dans le cadre du stage d'Enseignement Par la Recherche (EPR) et ce projet a été fédérateur au sein de notre école, puisque nous avons pu nous appuyer sur le Sergent-chef AUGÉZ et M. VIDAL pour la conception du vecteur en composite et aluminium dans les ateliers du Département des Véhicules Aérospatiaux (DVA). Nous avons également bénéficié de l'aide de M. LACOMBE et du Département des Systèmes Électroniques (DSE) pour la conception de l'instrumentation embarquée.

Les objectifs que nous avions étaient d'une part de réaliser une fusée apte au vol et donc capable de résister aux contraintes mécaniques d'un vol de ce type, et d'autre part d'embarquer des expériences au sein de ce vecteur. Pour cela nous disposions de 6 semaines complètes pour mener à terme le projet, en sachant tout de même que nous devions en parallèle rédiger un rapport de stage d'une quarantaine de pages, ainsi que réaliser une présentation orale à l'issue de ces six semaines. On peut donc immédiatement voir le problème que pose ce type de rapport pour nous, puisque un projet de cet envergure est en permanente évolution de part les divers contraintes rencontrées au fil de la conception. De plus, la rédaction nous ayant retardé sur l'avancement de certaines parties de notre Fusex, nous avons donc eu à revoir notre planning initial afin de se dégager des créneaux de finalisation de notre fusée. Malgré tout, nous sommes fier du résultat obtenu puisque notre projet a été le premier, de la campagne 2013, à être validé le dimanche en début de soirée. Nous avons donc pu réaliser le premier vol de Fusex dès le lundi après-midi qui s'est conclu par un vol nominal d'une durée totale de 1min 24s, se déroulant globalement selon nos attentes pour notre plus grande satisfaction.

En effet, l'exploitation des données enregistrées par nos expériences embarquées nous a permis de montrer que les performances calculées par Stabtraj étaient très proche de celles effectivement atteintes. Concernant les expériences, nous en avons trois au total : une mesure de vitesse réalisée par un capteur de pression différentielle, des mesures d'accélération sur trois axes et enfin, des mesures GPS. Les données étaient directement stockées sur une carte micro-SD via un module Arduino Uno. Ce module était également complété par un émetteur Xbee, nous permettant de vérifier le bon fonctionnement de l'enregistrement grâce à la réception de celui-ci sur une station sol. Cependant, nous avons perdu la liaison durant le vol et les données que nous avons enregistrées sur la station sol se sont révélées être inexploitables. Nous pouvons en partie expliquer ce problème par l'antenne de notre station sol qui était bricolée avec un bout de fil, l'antenne initialement prévu n'étant jamais été reçue. Cela n'a cependant eu aucune influence sur l'analyse de nos expériences puisque toutes les données étaient enregistrées dans la fusée. Nous allons donc maintenant exploiter plus en détail ces données.

## D) Mesure de vitesse à l'aide du capteur de pression différentielle

Le capteur de pression différentielle, fabriqué par Honeywell et référencé 140PC, nous a permis d'obtenir la vitesse de notre fusée en convertissant la tension donnée par le capteur en valeur de vitesse. Le graphique obtenu sous Excel est le suivant :

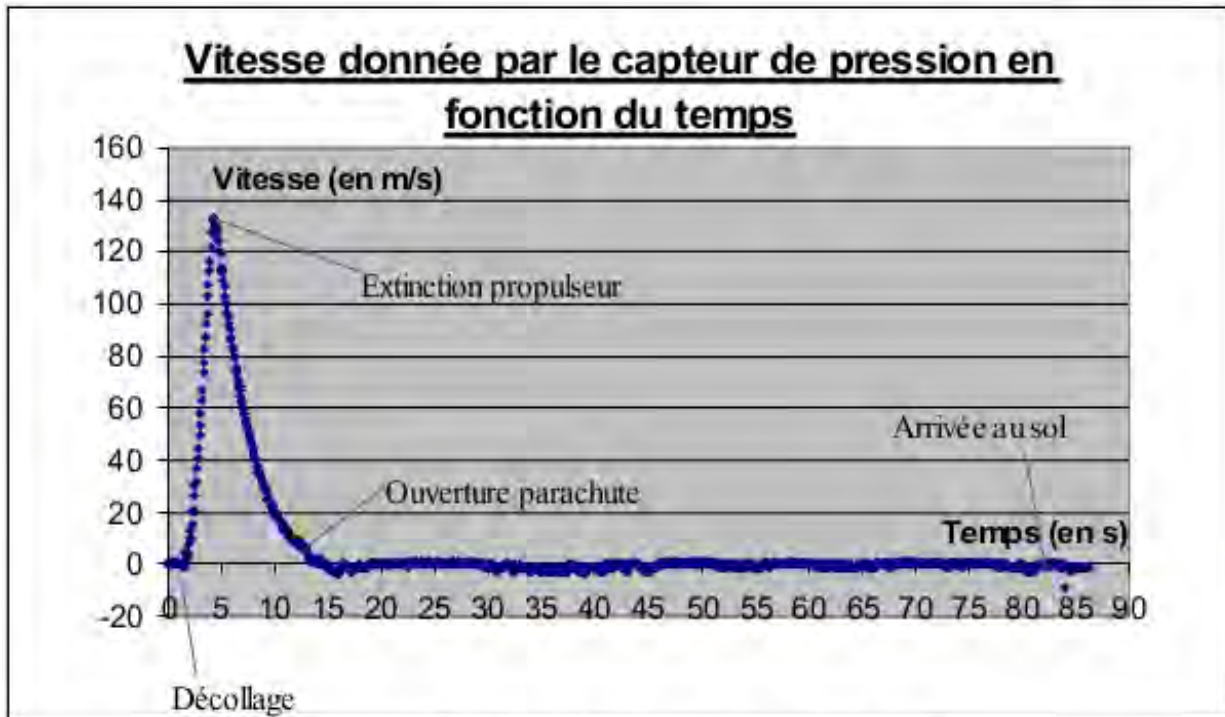


Figure 1 : Évolution de la vitesse au cours du vol

En effet, le capteur de pression envoie en sortie une tension proportionnelle à la différence de pression mesurée entre les deux sondes (totale et statique). Nous avons au préalable étalonné notre capteur en soufflerie afin de connaître la loi de fonctionnement de ce dernier et de pouvoir donc relier les valeurs de vitesse aux tensions du capteur correspondantes.

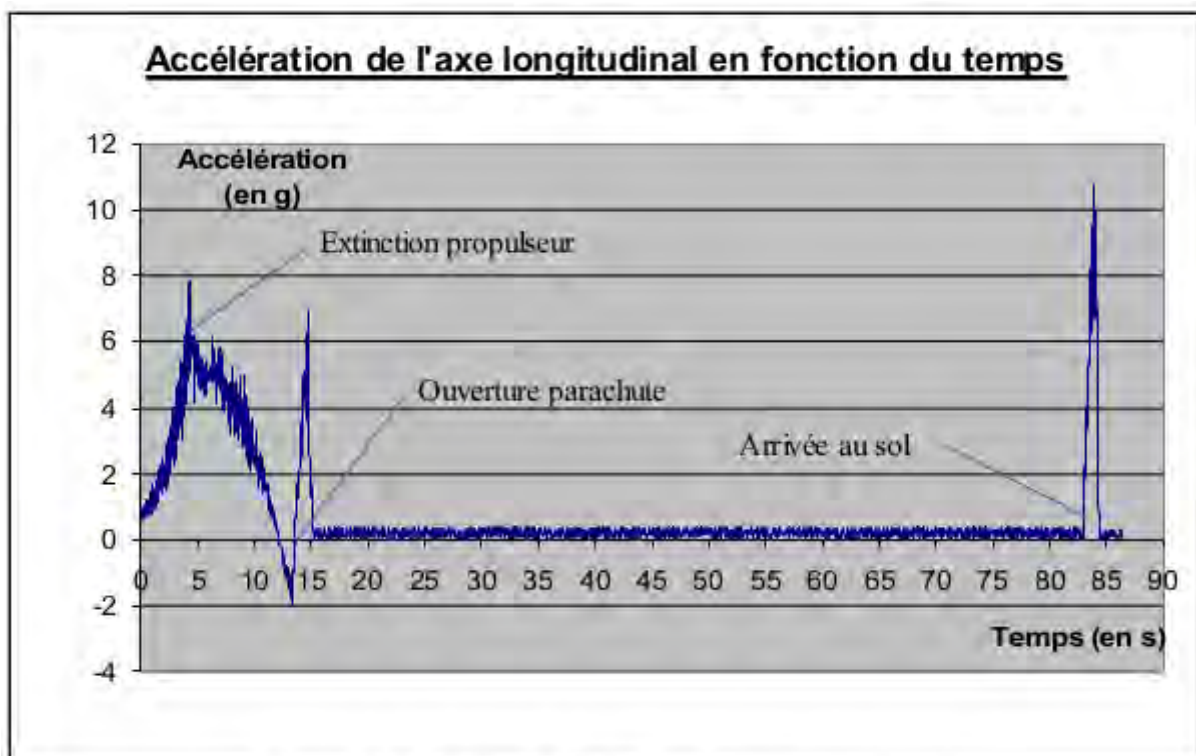
En observant l'allure générale de la courbe, il est tout d'abord possible de bien voir la forte augmentation de vitesse au départ de la fusée puis la décélération de celle-ci après l'extinction du propulseur. En revanche, il semblerait que les mesures du capteur soient erronées concernant la fin du vol car on distingue un problème dans la phase de descente sous parachute qui correspondrait à un palier d'une vitesse d'environ 10 m/s entre 14s (ouverture du parachute) et 83s (arrivée au sol), temps au bout duquel la vitesse aurait dû devenir nulle. Comment donc expliquer cette erreur de mesure du capteur ? Après observation de la phase de descente sous parachute lors du vol, nous avons pu constater que la fusée avait tendance à tourner autour de son axe longitudinal, tout en se balançant sous le parachute. Or dans cette attitude de vol, la disposition de nos sondes de pression ne pouvait pas permettre de réaliser une mesure concluante, le plus gênant étant le balancement. Pour l'an prochain, il conviendrait donc de réaliser un trou plus gros au centre du parachute ce qui permettrait d'éviter ce phénomène de balancement.

Nous allons donc maintenant analyser la partie exploitable du graphique (phase balistique du vol). Comme nous le montre la courbe, la vitesse maximale mesurée par le capteur est de 133,18m/s après un temps de vol de 4,28s. Le logiciel Stabtraj prévoyait lui une vitesse maximale de 141,6m/s, ce qui nous donne une erreur de 5,9 % tout à fait acceptable. Cette différence peut s'expliquer par deux raisons principales. La première étant que la prise de pression statique se trouvait en dessous de la fusée durant cette phase de vol, et que par conséquent le capteur mesurait une différence de pression moindre du fait de la pression d'air portante du corps de la fusée. La deuxième étant que le logiciel calcule une valeur idéale, dans le cas d'une ogive parfaitement réalisée et d'un corps parfaitement lisse. Or ceci n'était pas notre cas puisque nous avons une ogive fait main, moulée au doigt, et un corps qui présentait des aspérités venant dégrader les performances aérodynamiques de notre fusée.

Cette mesure de vitesse nous permet également de faire une première estimation du facteur de charge maximal subit par la fusée selon son axe longitudinal. En effet, l'accélération correspondant à une différence de vitesse entre deux instant, il nous suffit de prendre deux points du graphe situé sur la partie croissante de la vitesse, qui peut s'approximer par une droite. Nous avons donc pris les points (4,268 ; 133,182) et (2,428 ; 20,294) qui se trouvaient sur la droite de régression linéaire de cette phase de vol et le calcul simple  $\Delta y/\Delta x$  nous donne une accélération de 61,35 m/s<sup>2</sup> ce qui correspond à un facteur de charge de 6,254g (avec une accélération gravitationnelle de 9,81 m/s<sup>2</sup>). Stabtraj prévoyait lui une accélération maximale de 69 m/s<sup>2</sup>, ce qui correspond à un écart de 7 m/s<sup>2</sup> imputable aux mêmes raisons qui expliquent la différence de vitesse maximale observée (prise de pression statique, et aérodynamique globale de la fusée). En ce qui concerne la décélération de la fusée durant la phase balistique, rien de particulier n'est à remarquer, la vitesse diminuant bien progressivement. Passons alors à notre deuxième expérience, une mesure d'accélération.

## II) Mesure des accélérations et facteurs de charges

Notre accéléromètre, de type 9 DOF – Razor IMU commercialisée par Sparkfun, est un accéléromètre électronique trois axes ADXL345. Nous nous intéresserons ici principalement aux accélérations subies selon l'axe longitudinal de la fusée. Ce capteur pouvait être étalonné selon plusieurs plages de mesures différentes, notre problème ayant été de choisir entre la plage  $\pm 8g$  ou  $\pm 16g$ . En effet, une plage de mesure inférieure assure des mesures plus précises, mais limite l'amplitude de la mesure. Stabtraj prévoyait une accélération maximale théorique de  $69 \text{ m/s}^2$  ce qui était donc dans la plage de mesure  $\pm 8g$ . Pourtant, nous avons préféré choisir la plage  $\pm 16g$  notre argument étant que la fusée risquait de subir un choc d'environ  $10g$  à l'atterrissage. Nous allons donc voir si notre choix s'est avéré pertinent ou non. Voici les données récapitulées sous forme de graphe avec Excel :



*Figure 2 : Évolution de l'accélération au cours du vol*

En observant l'allure générale de la courbe, il est cette fois ci immédiatement possible de différencier les différentes phase du vol nominal de notre fusée. En effet, on peut découper le vol comme ceci : phase propulsée de 0s à environ 4s, phase de vol « libre » de 4s à 13s, ouverture du parachute entre 13 et 14,5s puis descente sous parachute jusqu'au contact avec le sol après 83 secondes de vol. Cette temporisation de vol correspond parfaitement à nos prévisions et à celles de Stabtraj puisque par exemple, le logiciel prévoyait une durée de vol balistique de 13,5s et que nous avons réglé notre temporisation d'ouverture de la trappe parachute à 13,5s. On retrouve donc bien cette chronologie sur le graphique en particulier si l'on considère le délai entre l'ouverture de la trappe parachute et le plein déploiement de celui-ci. De plus, d'après la dimension de notre parachute et le poids de notre fusée, Stabtraj prévoyait l'impact au sol 82s après le décollage, ce qui s'est également vérifié.

Enfin, pour ce qui est des valeurs remarquables du graphique, notons surtout les 6,38g au maximum de la phase propulsée, les 5,24g que l'ouverture du parachute a engendrée et enfin les 9,75g lors de l'impact au sol. Cette dernière valeur vient donc justifier notre choix d'étalonnage sur la plage maximale de mesure.

Nous allons maintenant passer à notre troisième et dernière expérience qui consistait en une mesure GPS.



### III) Mesure GPS

Notre dernière expérience consistait donc en un traçage GPS avec une mesure d'altitude. Notre GPS était en fait une caméra Contour, ce qui était interdit par le cahier des charges. Nous avons donc masqué totalement l'objectif afin de ne rien filmer mais de pouvoir tout de même obtenir notre enregistrement GPS. La société Contour fournissait le logiciel Storyteller qui permet de compiler directement les données recueillies durant le vol et de retracer le parcours sur Google Maps. Le résultat est le suivant :



Figure 3 : Parcours de la Fusex sur Google Maps



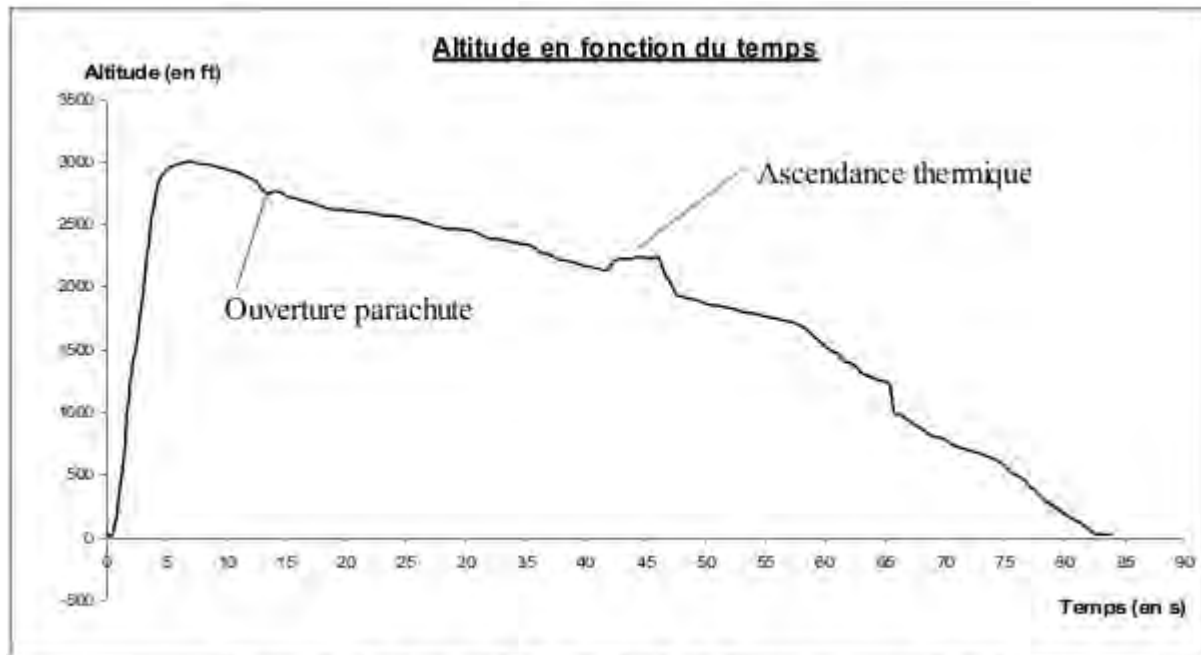


Figure 4 : Évolution de l'altitude de la Fusex au cours du vol

Comme nous pouvons donc le constater, la fusée a suivi un plan de vol relativement propre lors de toute la phase propulsée, jusqu'à atteindre l'altitude maximale de 3007ft après 6,76s soit 916,53m. Stabtraj prévoyait une altitude de culmination à 953m, ce qui est donc de 36,40m plus élevé que l'altitude réellement atteinte (erreur de 3,8%). Cela peut s'expliquer par le profil peu aérodynamique de notre ogive et de certaines parties du corps de notre fusée, dégradant un peu les performances générales, toutefois très bonnes.

Notons ensuite qu'une fois le parachute ouvert, la fusée est descendue en suivant le sens du vent qui était de Nord Ouest lors de notre tir. Toutefois, il est intéressant de voir que le vent en altitude n'est pas le même que celui quelques pieds plus bas puisque vers 2143ft, la fusée a changé de direction, suivant un flux de Sud Est. Ces données GPS correspondent bien à ce que nous avons pu voir lors du lancement, puisque la fusée a relativement bien suivi l'axe de la piste en bitume avant de se voir déportée et éloignée par le vent.

De plus, il est intéressant de relever un phénomène de vol essentiel pour les planeurs : l'ascendance thermique. En effet, lors de la descente sous parachute, on constate que l'altitude de la fusée remonte légèrement (42s de vol). Or cela est normal car c'est à ce moment précis que la fusée est passée au dessus (Sud Est) de la piste en béton qui réverbère beaucoup la chaleur du soleil. Ajoutez à cela le vent de Nord Ouest qui « poussait » cette ascendance vers les Sud Est et vous avez tous les éléments qui sont réunis pour faire en sorte que la fusée profite de ce phénomène thermique bien connu des vélivoles.

Enfin, il est intéressant de noter que la chronologie de vol se retrouve une fois encore sur le graphique donnant l'évolution de l'altitude puisque l'on retrouve la phase propulsée avec une croissance rapide, suivie de la phase de vol libre avec un début de chute libre que l'on peut deviner plonger de plus en plus rapidement si le parachute ne s'était pas ouvert aux alentours de 14s. On reconnaît en effet à cette date une petite cassure sur la courbe, le parachute assurant à la fusée une descente plus douce.

## **Conclusion :**

Il est donc maintenant temps de conclure plus généralement avec notre ressenti et les points à améliorer pour l'an prochain. Dans l'ensemble, nous sommes très satisfait de la manière dont s'est déroulée cette campagne de tir. Nous avons pu apprécier l'excellente organisation de l'événement au sein de la base et sur l'esplanade de la plage, ainsi que le profond engagement de tous les bénévoles qui ont su fournir un travail de grande qualité. Nous en profitons donc pour les remercier chaleureusement. Nous n'avons pas de recommandation particulière à faire sur l'organisation, d'autant plus que vous avez su faire preuve d'adaptabilité en nous prévoyant un créneau de tir plus tôt qu'initialement prévu.

Concernant notre projet, nous sommes tous satisfait des résultats obtenus et du déroulement de notre tir. Nous étions venus dans l'objectif de valider et tirer notre FUSEX le plus tôt possible, sur ce plan donc, la mission est pleinement accomplie. Enfin, pour ce qui devrait être absolument à améliorer pour l'an prochain, parlons surtout de la minuterie pour commander l'ouverture du parachute. En effet, nous disposions d'un minuteur acheté sur étagère qui était très fiable puisque depuis le début que nous l'utilisons, il ne nous a jamais fait défaut. En revanche, il n'était régler que sur un pas de 5s, ce qui est beaucoup trop à l'échelle d'un vol de FUSEX. En effet, nous nous étions arrangé pour que la culmination de la fusée corresponde à un pas programmable de notre minuteur, ce qui a permis de faire le vol dans de bonnes conditions. Mais il sera indispensable pour l'an prochain de trouver le même type de minuteur réglable à la seconde au minimum. Si je dis le même type de minuteur, c'est parce que nous avons intégré le nôtre dans un circuit plus global comportant toutes les spécifications du cahier des charges (LEDs, interrupteur, électroaimant, alimentation, relais électronique) et que ce circuit plus global s'est montré très performant en terme de fiabilité temporelle et surtout en terme de consommation énergétique : avec nos deux piles 9V en série, nous avons de quoi tenir facilement 4h, l'autonomie étant un point indispensable dans ce genre de tir. Ce dernier point est bien entendu valable pour l'alimentation des expériences, l'idéal étant d'avoir au moins deux heures d'autonomie. Les batteries Lipo nous semblent donc particulièrement recommandées, même s'il convient de prendre quelques précautions à l'intégration pour prévenir les cas d'inflammation (une recommandation devrait d'ailleurs être rajoutée au cahier des charges). De plus, notre parachute et notre trappe ont permis une récupération en un seul morceau de notre fusée, ces points sont donc à conserver. Notons enfin l'importance du pliage du parachute dans sa trappe lors de la fermeture définitive. Il nous semble indispensable de suivre la méthode fournie dans la documentation de Planète Science. puisque cela conditionne en grande partie le bon déploiement de celui-ci. Si les parachutes militaires et autres sont pliés selon une méthode bien précise, ce n'est pas le fait du hasard !