



## Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/>  
Eprints ID: 5235

**To cite this document:** Budinger, Valerie and Beaugendre, Guillaume and Berranger, Matthieu and Vincent, François and Pascaud, Romain *Instrumentation d'une Fusée à Eau*. (2011) In: Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes (CETSI 2011), 23-26 Oct 2011, Trois-Rivières, Canada.

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: [staff-oatao@inp-toulouse.fr](mailto:staff-oatao@inp-toulouse.fr)

# Instrumentation d'une Fusée à Eau

Valérie BUDINGER<sup>1</sup>, Guillaume BEAUGENDRE<sup>2</sup>, Matthieu BERRANGER<sup>3</sup>, François VINCENT<sup>4</sup>, Romain PASCAUD<sup>5</sup>  
<sup>1</sup>valerie.budinger, <sup>2</sup>guillaume.beaugendre, <sup>3</sup>matthieu.berranger, <sup>4</sup>francois.vincent, <sup>5</sup>romain.pascaud@isae.fr  
ISAE, 10 avenue Edouard Belin, BP 54031, 31055 Toulouse Cedex 4

**RESUME :** Dans le cadre de la formation ISAE-ENSICA, un projet pédagogique autour du concept de fusée à eau a été développé. Cette fusée à eau est en fait instrumentée pour permettre l'analyse des différents paramètres de vol : accélération, vitesse et altitude en fonction du temps. Ce projet, d'un volume de 15 heures semi-encadrées, s'adresse à des étudiants d'un niveau Licence ou première année Master. En complément de la validation des notions d'électronique analogique, il permet par la même occasion d'aborder d'un point de vue pratique les principes théoriques d'aérodynamique et de mécanique du vol pour les lanceurs spatiaux. Outre l'aspect ludique évident, ce projet fait clairement apparaître les liens entre les différentes disciplines scientifiques qui constituent l'enseignement pluridisciplinaire de la formation ISAE-ENSICA.

**Mots clés :** électronique analogique, électronique embarquée, aérodynamique, mécanique du vol.

## 1 INTRODUCTION

La formation ENSICA (Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Constructions Aéronautiques) de l'ISAE (Institut Supérieur de l'Aéronautique et de l'Espace) forme des ingénieurs aptes à conduire, à terme, des projets de systèmes complexes essentiellement dans les secteurs de l'aéronautique et du spatial. Dans le cadre de leur formation, les étudiants suivent un cursus théorique autour des grandes disciplines scientifiques de l'aéronautique : mécanique, aérodynamique, électronique, automatique, mathématiques, informatique, ...

En fin de première année (niveau Licence), les étudiants ont l'occasion de mettre en pratique l'ensemble des compétences acquises dans les disciplines de l'Unité de Formation Avionique et Systèmes (UFAS : électronique, automatique, traitement du signal, ...) dans le cadre des Projets Avioniques et Systèmes (PAS). Plusieurs projets, chacun d'une durée de 15 heures semi-encadrées, sont proposés aux étudiants. Certains d'entre eux ont d'ailleurs déjà été présentés lors du Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes (CETSIS) [1-2].

Parmi ces projets, le projet « fusée à eau » concerne 18 binômes. Ce projet est intéressant car il permet de décroiser les disciplines enseignées dans la formation ISAE-ENSICA en utilisant bien entendu des notions d'électronique analogique, mais aussi des notions d'aérodynamique et de mécanique du vol.

## 2 DESCRIPTION DU PROJET

### 2.1 Objectifs

L'objectif pratique du projet « fusée à eau » est de réaliser une fusée à eau embarquant une expérience [3-5]. Dans notre cas, l'expérience concerne l'utilisation de capteurs pour mesurer l'altitude, la vitesse et l'accélération de la fusée lors des différentes étapes de son vol.

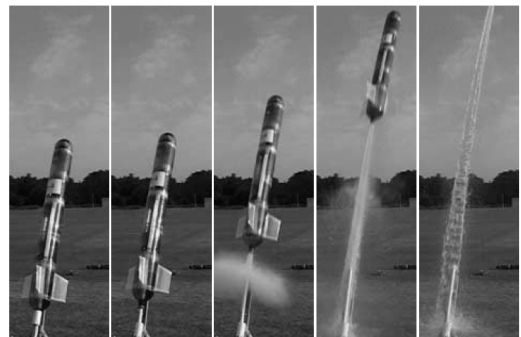


fig 1 : Fusée à eau

L'objectif pédagogique est de mettre en application les connaissances acquises au cours de l'année en électronique analogique (transistors, amplificateurs opérationnels, ...) dans le cadre d'un projet de groupe en quasi-totale autonomie.

### 2.2 Une fusée à eau, c'est quoi ?

#### 2.2.1 Principe général

Comme le montre la Figure 1, une fusée à eau est une bouteille en plastique propulsée en utilisant de l'eau et de l'air sous pression [3-5].

La propulsion d'une fusée à eau est basée sur le principe d'action-réaction : de la matière doit être éjectée violemment d'un conteneur, dans le sens opposé au déplacement souhaité. C'est par ce même principe qu'une fusée comme Ariane est propulsée. Dans les fusées à eau, la matière éjectée est de l'eau, le moyen pour l'éjecter est de l'air sous pression et le conteneur (la fusée proprement dite) est une bouteille en plastique. Ainsi, plus la pression de l'air dans la fusée est importante, plus l'eau est éjectée rapidement, et donc plus la force de poussée est grande.

#### 2.2.2 La fusée à eau en pratique

Une fusée à eau de base est donc constituée à minima d'une bouteille en plastique (généralement une bouteille

de soda) et d'ailerons qui permettent de régler la stabilité de la fusée en vol.

La fusée peut aussi inclure une charge utile, c'est-à-dire l'ensemble des éléments embarqués qui ne servent pas directement à son fonctionnement. Il peut s'agir de capteurs de mesure (accélération, pression, ...), d'une petite caméra, d'un appareil photo, ...

Lorsque la charge utile est suffisamment évoluée, il est souhaitable de la récupérer sans dommage. Pour cela on utilise un système de récupération, classiquement un parachute, qui a pour rôle de ralentir la vitesse de chute de la fusée. Plus la vitesse de chute est faible, moins le choc sera violent.

### 2.2.3 Les étapes du vol d'une fusée à eau

Le réservoir de la fusée est initialement rempli de 30 % à 40 % d'eau avant de placer la fusée sur un support de lancement. Le reste d'air contenu dans la bouteille est alors mis sous pression (généralement entre 3 et 8 bars) à l'aide d'une pompe ou d'un compresseur. Une fois la pression adéquate atteinte, la fusée peut être propulsée.

La phase de propulsion d'une fusée à eau est en général très courte. Cependant, après avoir fini de se propulser, la fusée à eau continue son ascension grâce à l'énergie cinétique acquise. Au final, les différentes étapes du vol d'une fusée à eau simple (un seul étage de propulsion) sont résumées sur la Figure 2, soit :

- Propulsion par éjection de l'eau puis de l'air,
- Ascension non propulsée ou phase balistique (décélération due à la gravité et à la traînée),
- Atteinte de l'apogée (altitude maximale, vitesse verticale nulle),
- Chute jusqu'au sol (freinée ou non par un parachute).

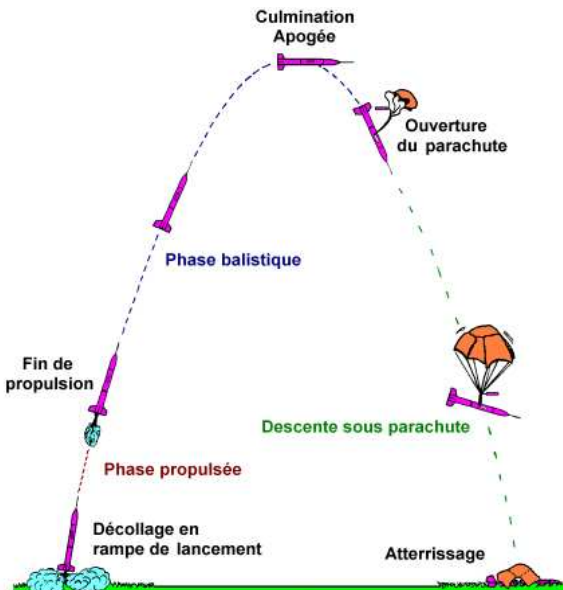


fig 2 : Etapes du vol d'une fusée à eau [3]

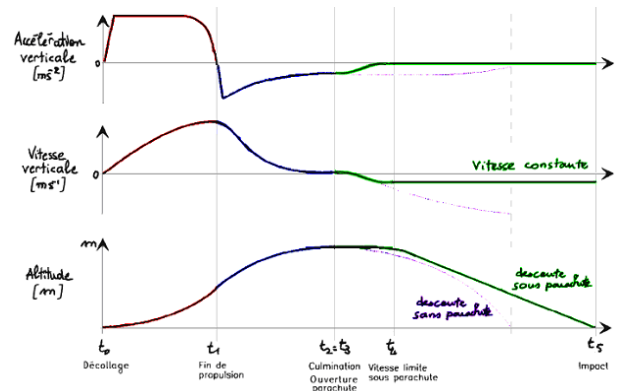


fig 3 : Evolution des paramètres lors du vol de la fusée [3]

Comme le montre la Figure 3, lors des différentes étapes du vol, l'altitude, la vitesse et l'accélération de la fusée varient fortement. Il convient de noter que l'échelle de temps n'est pas linéaire : la phase propulsée est très courte (inférieure à 1 s dans notre cas), la culmination est atteinte en quelques secondes et la descente sous parachute peut durer quelques dizaines de secondes.

Dans le cadre de ce projet, on propose d'instrumenter la fusée afin de reconstruire en post-traitement les paramètres de son vol.

### 2.3 Instrumentation de la fusée à eau

Plusieurs instruments de mesure peuvent être envisagés au sein de la charge utile de la fusée. Pour ce projet, deux capteurs équipent la fusée.

Le premier capteur est un accéléromètre (modèle MMA1200EG de chez Freescale [6]) qui délivre une tension proportionnelle à l'accélération dans une direction de l'espace. Le second est un capteur de pression (modèle MPX4115 de chez Freescale [6]) qui délivre une tension proportionnelle à la pression mesurée. Pour récolter les informations provenant de ces deux capteurs, on utilise un module de transmission sans-fil XBeePRO de chez Digi [7]. Ce module possède jusqu'à 6 voies analogiques multiplexées sur un convertisseur analogique/numérique (CAN) 10 bits. Pour un fonctionnement optimal, la dynamique du signal analogique en entrée doit être comprise entre 0 et 3.3 V. En ce qui concerne la fréquence d'échantillonnage, elle est maximale lorsqu'une seule voie du CAN est utilisée, et vaut alors 1 kHz.

Enfin, la problématique au niveau électronique concerne la dynamique des deux capteurs utilisés. En effet, en considérant un point de culmination aux alentours de 30 m, une vitesse maximale de 50 m/s et une accélération maximale de 20g, la dynamique supposée du capteur de pression est de 20 mV et celle de l'accéléromètre de 320 mV. Les étudiants ont donc pour objectif principal d'adapter la dynamique supposée des capteurs à la dynamique des entrées analogiques du

module XBeePRO afin de profiter de la plus grande plage de numérisation.

Le choix de la solution finale est laissé libre, mais il doit être argumenté lors de la présentation des résultats obtenus. Les solutions les plus simples utilisent des fonctions d'amplification et de correction d'offset à partir d'amplificateurs opérationnels (montages soustracteur, additionneur, amplificateur, ...).

Au niveau pratique, les étudiants réalisent et testent tout d'abord leur circuit sur une platine Labdec. Une fois le fonctionnement validé, ils soudent l'ensemble de leur circuit sur une plaquette d'études qui est finalement connectée à la carte principale commune à tous les binômes (cf. Figure 4). La carte principale contient en fait l'émetteur XBeePRO et les alimentations électriques (alimentation générale par pile non représentée sur la Figure 4). Le poids total de l'électronique embarquée (cartes, capteurs et batterie) est d'environ 200g qu'il faut prendre en compte lors du dimensionnement de la fusée.

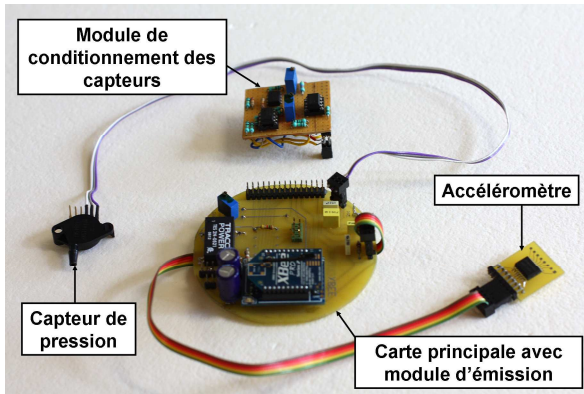


fig 4 : Instrumentation électronique de la fusée à eau

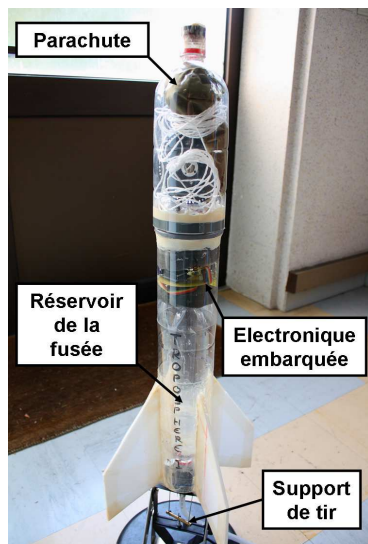


fig 5 : Fusée assemblée sur son support de tir

## 2.4 Assemblage et intégration

Une fois l'instrumentation électronique terminée, les étudiants réalisent l'assemblage des différents étages de la fusée. La Figure 5 présente une fusée dans son intégralité avant lancement.

La fusée est finalement composée de trois étages : le réservoir (qui supporte aussi les ailerons), la charge utile et la coiffe qui abrite le parachute. Le déclenchement de ce dernier est mécanique. Pour cela on utilise une coiffe lestée, non solidaire de la fusée. Le lest a pour effet d'augmenter l'énergie cinétique de la coiffe vis-à-vis du corps de la fusée et il garantit la séparation du dernier étage lors de l'apogée, libérant ainsi le parachute. A noter que ce lest a aussi pour fonction de stabiliser le vol de la fusée lors de la phase balistique.

## 2.5 Exploitation des résultats

Une fois la séance de tir terminée, les étudiants ont pour mission d'exploiter les résultats bruts à l'aide du logiciel Matlab de chez MathWorks [8]. Ils peuvent ainsi afficher les différentes courbes, transformer les tensions mesurées en données réelles (pression et accélération), comparer les résultats obtenus à partir des deux capteurs, filtrer le bruit présent sur les données, calculer l'altitude à partir de la pression ou la vitesse en intégrant l'accélération mesurée, ...

## 3 DEMARCHE PEDAGOGIQUE

Le Projet Avionique et Systèmes de la formation ISAE-ENSICA est articulé autour de 6 séances de 2h30 dont la moitié est encadrée. Le séquençage est le suivant :

- Lors de la séance 1 du projet fusée à eau, les étudiants tirent trois fusées à eau différentes pour observer les effets des éléments dimensionnant au niveau aérodynamique (ailerons, lest, ...). La première fusée à eau consiste simplement en une simple bouteille vierge de tout élément supplémentaire. La deuxième fusée tirée possède des ailerons mais n'est pas équilibrée. Enfin le dimensionnement de la dernière fusée est optimisé avec des ailerons et un lest pour rendre le vol stable. Une fois la séance de tir terminée, les étudiants ont accès à un document synthétique résumant les étapes primordiales pour réaliser un lanceur stable. Les étudiants doivent finalement fournir un dimensionnement optimisé.
- Durant les séances 2 et 3, les étudiants montent et testent l'accéléromètre et le capteur de pression dans un premier temps sur platine Labdec, puis ensuite soudent le circuit sur une plaquette d'études.
- L'assemblage de la fusée et l'intégration de l'électronique et du parachute se déroulent pendant la séance 4. Pour cela, les étudiants disposent de



bouteilles de soda pour le corps de la fusée, et de plaques de polystyrène pour réaliser les ailerons.

- Les tirs de fusée ont lieu au début de la séance 5. Les données sont enregistrées lors de différents vols.
- La fin de la séance 5 et la dernière séance sont consacrées à l'exploitation des mesures sous Matlab afin d'extraire les paramètres d'altitude, de vitesse et d'accélération.

A l'issue de ces six séances, les étudiants doivent présenter leurs résultats sous la forme d'un rapport synthétique et d'une présentation orale de 20 minutes. La note finale tient compte des résultats obtenus, mais aussi de la qualité du rapport et de la soutenance.

#### 4 RETOUR SUR EXPERIENCE

Outre l'aspect ludique évident de ce projet, les étudiants apprécient la concrétisation des concepts théoriques d'électronique, d'aérodynamique et de mécanique du vol. Il est très gratifiant pour les étudiants de réaliser par leurs propres moyens un circuit complexe qui remplit sa fonction.

De plus, une compétition amicale très stimulante s'installe très vite entre les binômes pour voir quelle fusée ira le plus haut. Ceci génère un investissement important de leur part qui se traduit par une meilleure acquisition des notions théoriques en jeu.

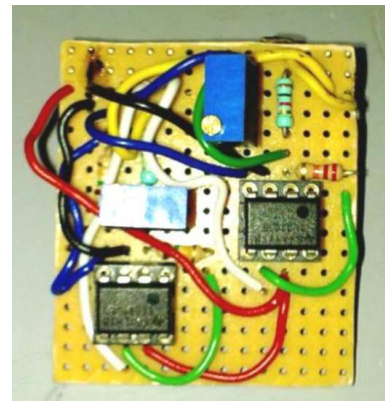
Qu'il s'agisse du dimensionnement de la fusée ou de la réalisation du circuit électronique, les étudiants ont la liberté totale sur le choix des solutions. Ceci a pour but de les familiariser avec la prise de décision, mais aussi avec la justification de leurs choix lors de la confrontation avec le jury de fin de projet.

La Figure 6 présente à titre d'illustration quelques photos prises par les étudiants lors de la réalisation du projet. L'étape (a) correspond au test du conditionnement des capteurs sur platine Labdec. L'étape (b) montre le circuit de conditionnement une fois soudé sur une plaquette d'études. Enfin, l'étape (c) montre la fusée dans son intégralité avant son lancement.

La Figure 7 présente quelques résultats obtenus par les étudiants pour l'altitude et de l'accélération de la fusée en fonction du temps. Les perturbations sur les résultats au moment de l'apogée s'expliquent par la perte de l'ogive et l'ouverture du parachute. En effet, une fois l'ogive expulsée, le capteur de pression mesure en plus du vent relatif (quantité nécessaire pour déterminer l'altitude), le vent vitesse. Quant aux perturbations notées sur l'accéléromètre, elles sont dues à l'ouverture du parachute qui produit alors une décélération importante.



(a)



(b)



(c)

fig 6 : Photos des étapes du projet

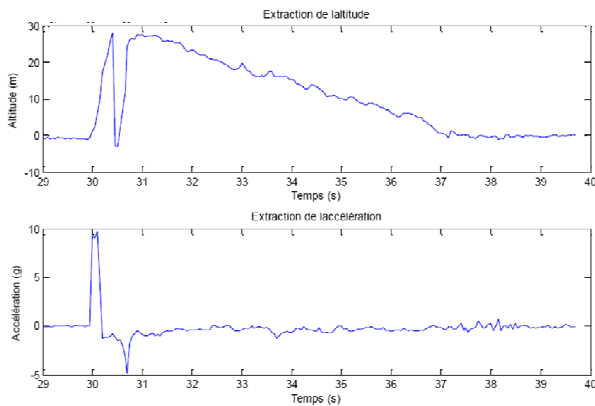


fig 7 : Exemples de résultats mesurés (altitude et accélération)

## 5 CONCLUSION ET EVOLUTION

Le projet d'instrumentation d'une fusée à eau proposé en fin de première année de la formation ISAE-ENSICA permet de décloisonner les différentes disciplines scientifiques enseignées au sein de l'institut. D'un total de 15 heures, ce projet en quasi-totale autonomie est une application ludique qui permet aux étudiants d'appliquer les connaissances théoriques en électronique, aérodynamique et mécanique du vol.

Finalement, la fusée à eau se présente comme un support très intéressant pour illustrer les concepts d'électronique embarquée. Dans le cadre d'un projet plus ambitieux, de nombreuses évolutions sont possibles. Citons par exemple le déclenchement électronique du parachute (automatique ou à distance) ou la réalisation du module de communication par les étudiants.

### Bibliographie

- [1] F. Vincent, B. Mouton, C. Nouals, "Maquette pédagogique pour l'enseignement des systèmes RADAR", *Actes du 6<sup>ème</sup> Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes (CESTIS-EEA'07), Bordeaux (France), Octobre 2007.*
- [2] F. Vincent, B. Mouton, C. Nouals, "Contrôle d'un kart électrique à 2 moteurs indépendants", *Actes du 7<sup>ème</sup> Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes (CESTIS-EEA'08), Bruxelles (Belgique), Octobre 2008.*
- [3] Document d'aide à la conception : [http://www.planete-sciences.org/espace/publications/techniques/vol\\_de\\_la\\_fusee.pdf](http://www.planete-sciences.org/espace/publications/techniques/vol_de_la_fusee.pdf)
- [4] Site Internet : <http://fusee-eau.info/>
- [5] I. Lanoë, "Construisez et lancez vos fusées à eau : Etude, construction et lancement", *Dunod, Novembre 2003.*
- [6] Site Internet constructeur : <http://www.freescale.com/>
- [7] Site Internet constructeur : <http://www.digi.com/>
- [8] Site Internet : <http://www.mathworks.fr/>