



## Compte-rendu du projet de ballon stratosphérique

# BARSOOM



Ecrit par : Nicolas OUDART

Projet réalisé avec : Valentine BLANCHARD, Romain CANU-BLOT, Vincent CUCCHIETTI, Sébastien LE BRIZ, Thomas MONNEREAU

Avec l'aide précieuse de : Planète-Sciences, le CNES, l'ESTACA et Air Products

BARSOOM est un projet de l'Estaca Space Odyssey lancé le 20/07/2017  
lors du C'space 2017 sur le camp du 1<sup>er</sup> RHP de Ger



# Sommaire

1. Présentation générale du projet
2. Présentation et justification des expériences embarquées
  - a. L'anémomètre
  - b. Le magnétomètre
  - c. Le baromètre
  - d. Le rover
3. Plans de la nacelle
4. Résultats au sol
5. Résultats du vol en ballon captif
6. La télémétrie
7. Déroulement du vol stratosphérique
8. Résultats du vol stratosphérique
  - a. Résultats non expérimentaux
  - b. Résultats expérimentaux
9. Conseils pour l'avenir
  - a. Le rover et la nacelle
  - b. Le ballon captif
  - c. La télémétrie
10. Annexe : les programmes Arduino, les photographies du vol



# 1. Présentation générale du projet

Avec la sonde Viking 1 en 1975 démarre l'exploration robotisée de Mars, qui continue encore de nos jours avec deux rovers fonctionnels à la surface de la planète rouge, et au moins deux de plus prévus pour l'année 2020. Parmi les capteurs dont sont munis ces robots, un anémomètre est souvent présent. Mais pour des raisons de fragilité, et l'atmosphère de Mars étant très peu dense, les anémomètres mécaniques classiques n'ont jamais été retenus.

En effet, la NASA leur préfère des anémomètres thermiques, qui consistent en la mesure de la variation de la résistance d'un fil métallique chauffé. Ainsi, c'est la perte thermique par convection forcée qui permet de déduire la vitesse du vent martien. Une méthode relativement chère, complexe à étalonner et délicate à mettre en œuvre dans l'atmosphère martienne (peu propice à la convection). On peut même ajouter qu'un de ces capteurs, endommagé à l'atterrissage, a réduit les performances de l'anémomètre du rover Curiosity. Le seul autre type d'anémomètre expérimenté par la NASA sur Mars, est un pendule en kevlar-kapton, dont les oscillations au gré du vent étaient filmées. Ce système, plus complexe à utiliser qu'il n'y paraît, était embarqué sur la sonde Phoenix.

Une méthode alternative, déjà utilisée sur Terre depuis des années, est l'anémomètre ultrasonique. Le principe est simple : mesurer la vitesse du son dans deux sens opposés, et utiliser le différentiel des deux mesures pour en déduire la vitesse du vent dans une direction.



*Anémomètre ultrasonique commercial, expérience financée par la NASA, anémomètre thermique conçu pour Beagle-2*

Cette méthode est particulièrement attrayante car elle est relativement résistante mécaniquement, ne nécessite pas une atmosphère très dense, et n'est pas complexe à mettre en œuvre. C'est pourquoi la NASA a financé une étude de l'université de Bell et de Corbell Aerospace afin de tester ce capteur dans une atmosphère analogue à l'atmosphère martienne. Quel analogue ? La stratosphère terrestre.

C'est en lisant un article sur cette expérimentation que nous ait venue l'idée du projet BARSOOM. Nous voulions savoir si avec des moyens d'étudiants, un anémomètre ultrasonique capable de fonctionner dans la stratosphère était réalisable. Et la façon la plus simple de transporter une expérience dans la stratosphère est bien entendu le ballon stratosphérique.



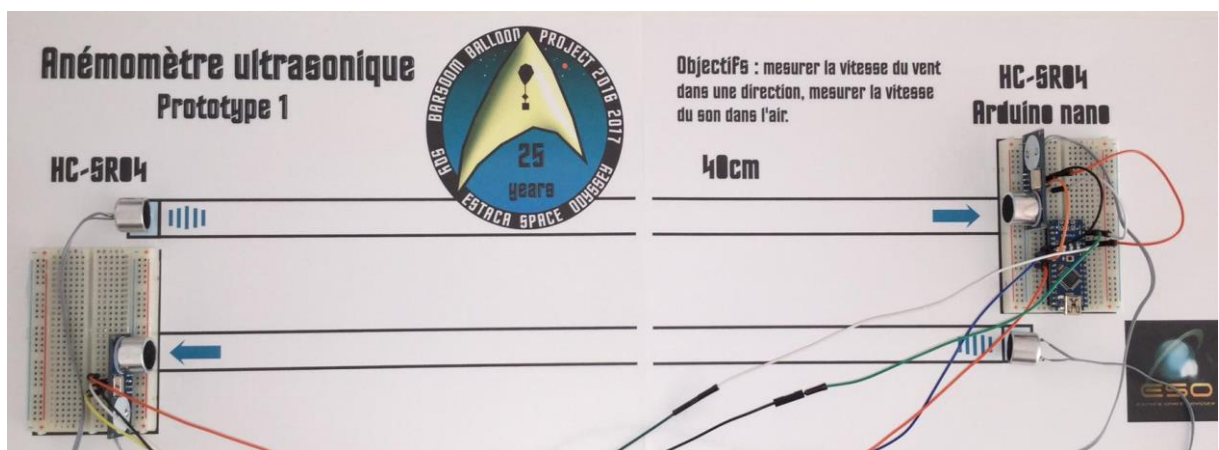
## 2. Présentation et justification des expériences embarquées

### a. L'anémomètre

L'anémomètre que nous avons décidé de construire est un anémomètre en deux dimensions. C'est-à-dire que la vitesse du vent est mesurée dans deux directions, de façon à obtenir la direction du vent en plus de sa norme.

Le capteur retenu est le HC-SR04, un module sonar fait pour être utilisé avec Arduino. Comme il est à l'origine conçu pour réaliser des mesures de distance, il a été nécessaire de le modifier légèrement en déplaçant l'émetteur de façon à le placer en face du récepteur.

Ainsi, a été obtenu un premier démonstrateur, qui a servi à présenter le projet à l'ESO en vue du premier conseil d'administration de l'année.



*Premier démonstrateur de l'anémomètre ultrasonique*

Le système fonctionnait comme prévu pour une distance entre les capteurs de 40 cm, qui permet d'après la précision théorique du capteur d'obtenir une vitesse du vent à 5 km/h près.

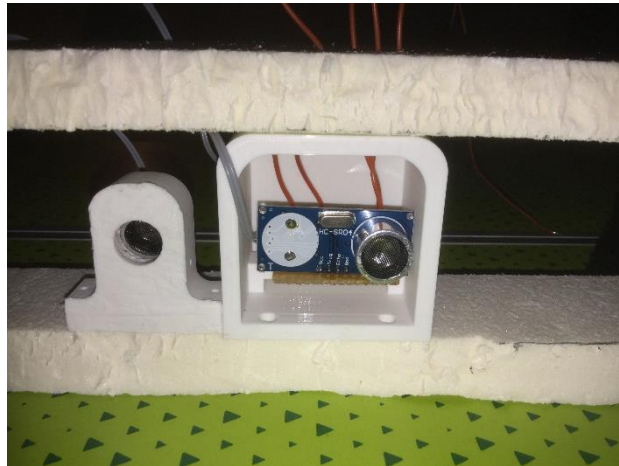
Pour obtenir une mesure de vitesse du vent, on utilise les deux mesures de temps de parcours des ondes sonores de la manière suivante :

$$V = \frac{L}{2} \times \left( \frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} \right)$$

On observe, comme dit précédemment, que la mesure est indépendante de la vitesse du son dans le milieu, et ne nécessite donc pas d'étalonnage complexe. Cependant, il faut fixer la distance L car elle participe beaucoup à la précision de la mesure.



Afin de fixer au mieux cette distance, des supports ont été réalisés en impressions 3D par l'ESTACA'lab. Le tout est par la suite fixé sous la nacelle, au niveau de la surface carré la plus grande.



*Supports des capteurs*

Pour déterminer la distance entre les capteurs, une mesure dans une pièce sans vents, de température connue a été effectuée. Voici les résultats :

$$L_1 = 0.415 \text{ cm}$$

$$L_2 = 0.403 \text{ cm}$$

$$L_3 = 0.405 \text{ cm}$$

$$L_4 = 0.404 \text{ cm}$$

Ces résultats ont été obtenus la veille du décollage du ballon stratosphérique, afin d'être les plus précis possibles.

La carte Arduino nano, que nous avons sélectionné pour contrôler les capteurs, n'arrive pas à réaliser des inverses de nombres aussi faibles que les temps que nous mesurons. Nous n'enregistrerons donc pas les vitesses mais les 4 valeurs de temps.

Bien que les 4 capteurs associés puissent en théorie nous donner la direction du vent, la nacelle tournant sur elle-même durant un vol, il nous a fallu trouver un moyen de déterminer la direction de la nacelle dans le repère terrestre.

Comme nous disposons grâce au capteur d'une mesure de la vitesse du son, on peut imaginer déduire la température extérieure de la nacelle grâce à celle-ci.

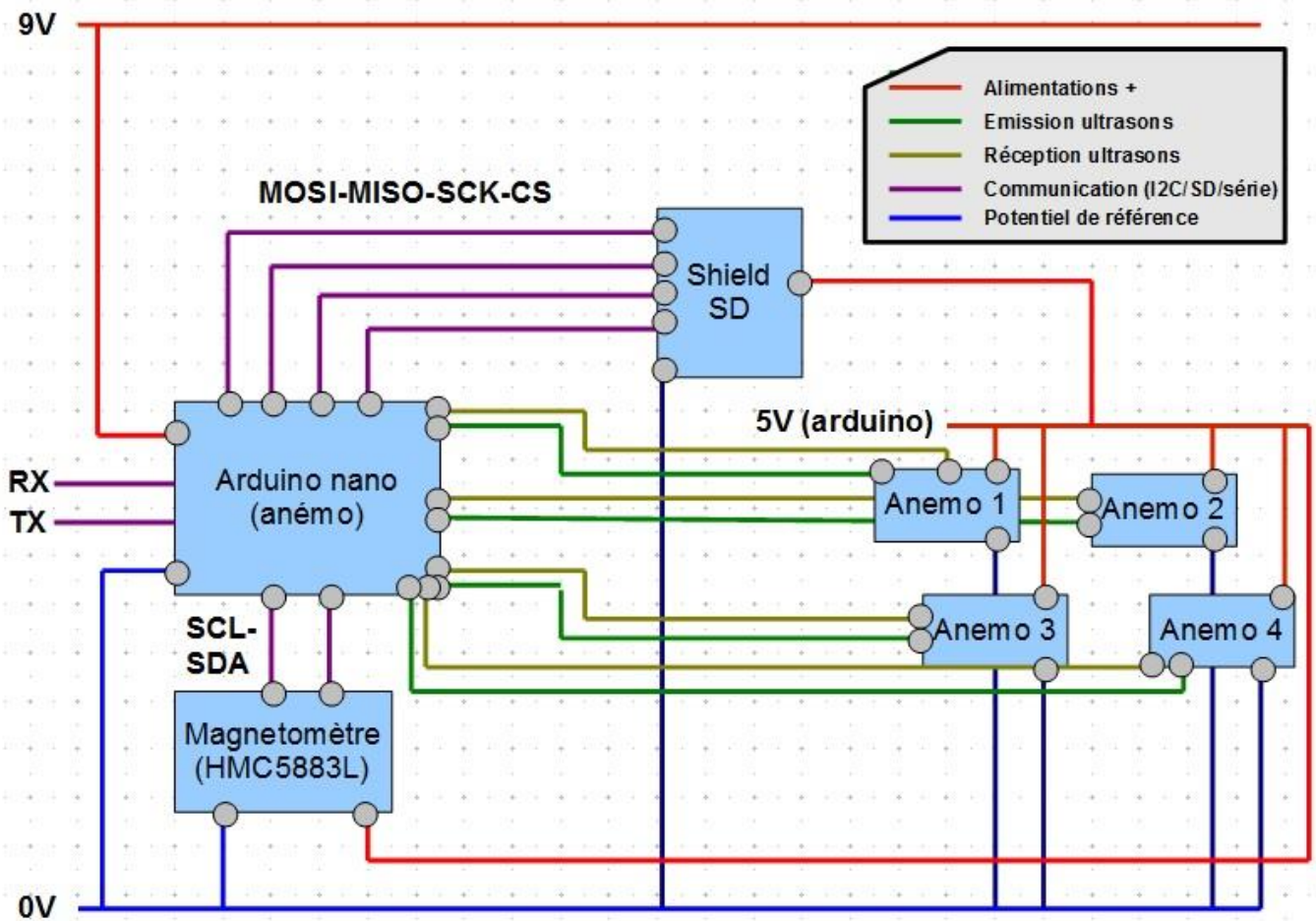
## **b. Le magnétomètre**



Notre choix a été d'utiliser un magnétomètre comme une boussole, afin de déterminer la direction de notre nacelle par rapport au Nord, et par conséquent la direction du vent par rapport au Nord.

Le capteur compatible Arduino HMC5883L a été retenu. Il est utilisé sur la plage de mesures [-1.9 ; 1.9] Ga, qui est largement suffisante sachant que le champ magnétique terrestre à nos latitudes est de l'ordre de 0.6 Ga.

Le montage total de l'anémomètre couplé au magnétomètre est le suivant :



Montage de l'anémomètre et du magnétomètre

En plus des mesures de vent et de direction, il faut encore y associer une mesure d'altitude, afin de localiser les mesures effectuées.

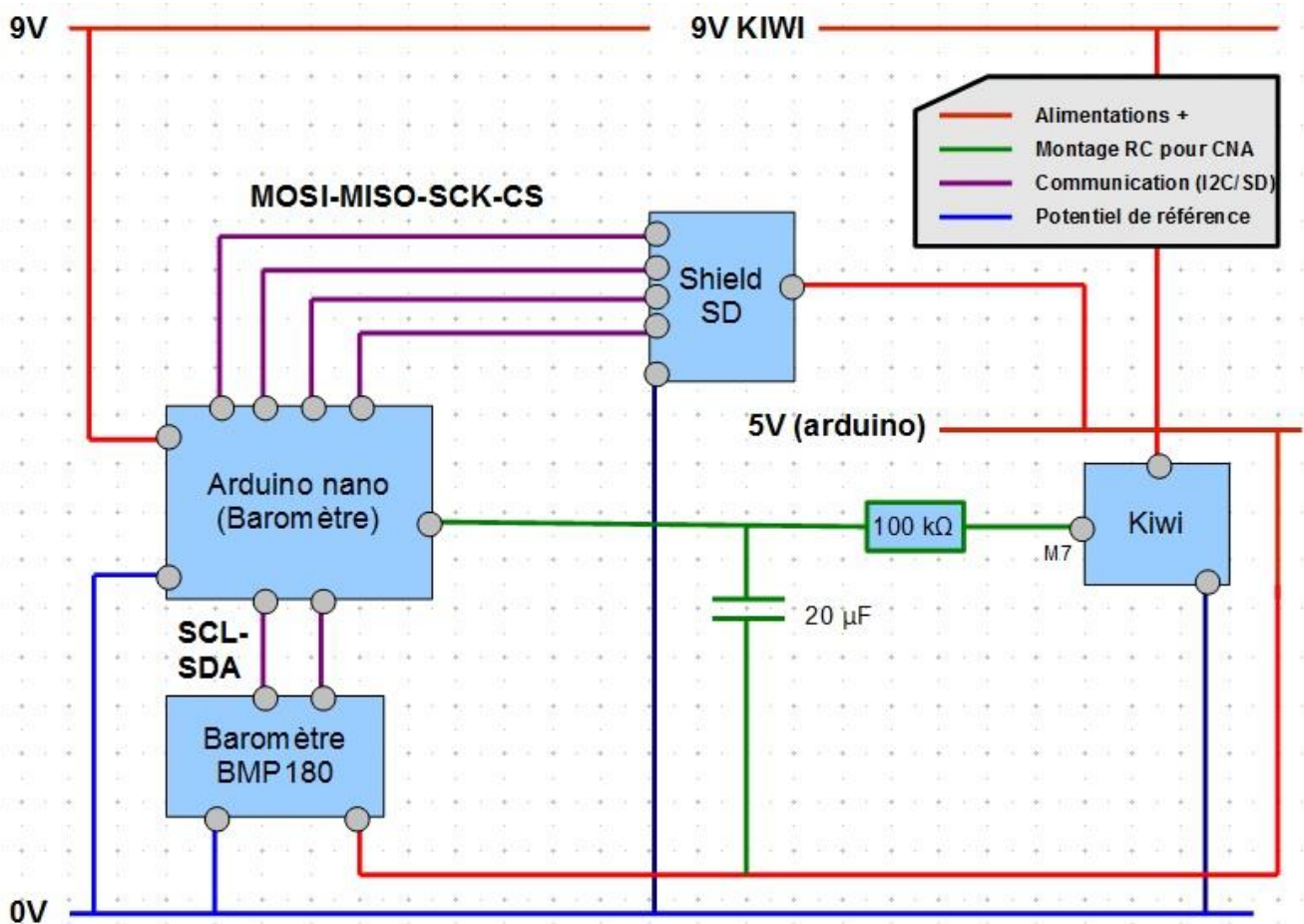
### c. Le baromètre

Pour obtenir une estimation de l'altitude à laquelle se trouve la nacelle lors d'une mesure, ainsi qu'une estimation de la température interne de la nacelle, nous avons choisi le capteur compatible Arduino BMP180, réputé pour sa précision quasi-métrique.



D'après la spécification donnée par le constructeur, le capteur a un fonctionnement nominal garanti jusqu'à 9000m environ. Cependant, notre suiveur de projet nous ayant affirmé que ce capteur avait déjà été utilisé par plusieurs projets de ballon-sonde dans le passé, nous l'avons retenu.

Voici le schéma du montage utilisé :



Montage utilisé pour le baromètre

### d. Le rover

En plus de l'expérience de l'anémomètre, il était prévu qu'un rover sorte de la nacelle une fois celle-ci arrivée au sol. Bien que celle-ci n'ai pu avoir lieu lors du C'space 2017, le rover, ainsi que le montage du système d'ouverture ont été conçus et testés.

Le rover possède deux moteurs DC, pilotés par une carte de puissance L298N, ainsi qu'une caméra (LinkSprite UART TTL) et un bras piloté par servo-moteur.



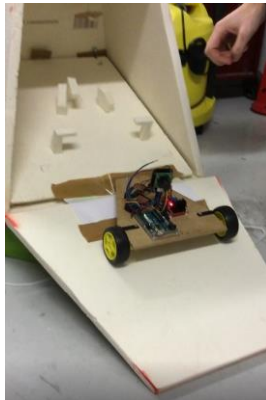
Voici à quoi ressemblait le rover lors d'un de ses tests :



*Un des premiers tests du rover dans le hall de l'ESTACA*

Les images prises par le rover sont enregistrées sur une carte SD, sous forme de fichiers texte. Par la suite, un programme Python sur ordinateur transformera les fichiers texte en images. Cependant, si les photographies sont prises rapidement, leur enregistrement sur carte SD par Arduino prend au moins 2 minutes.

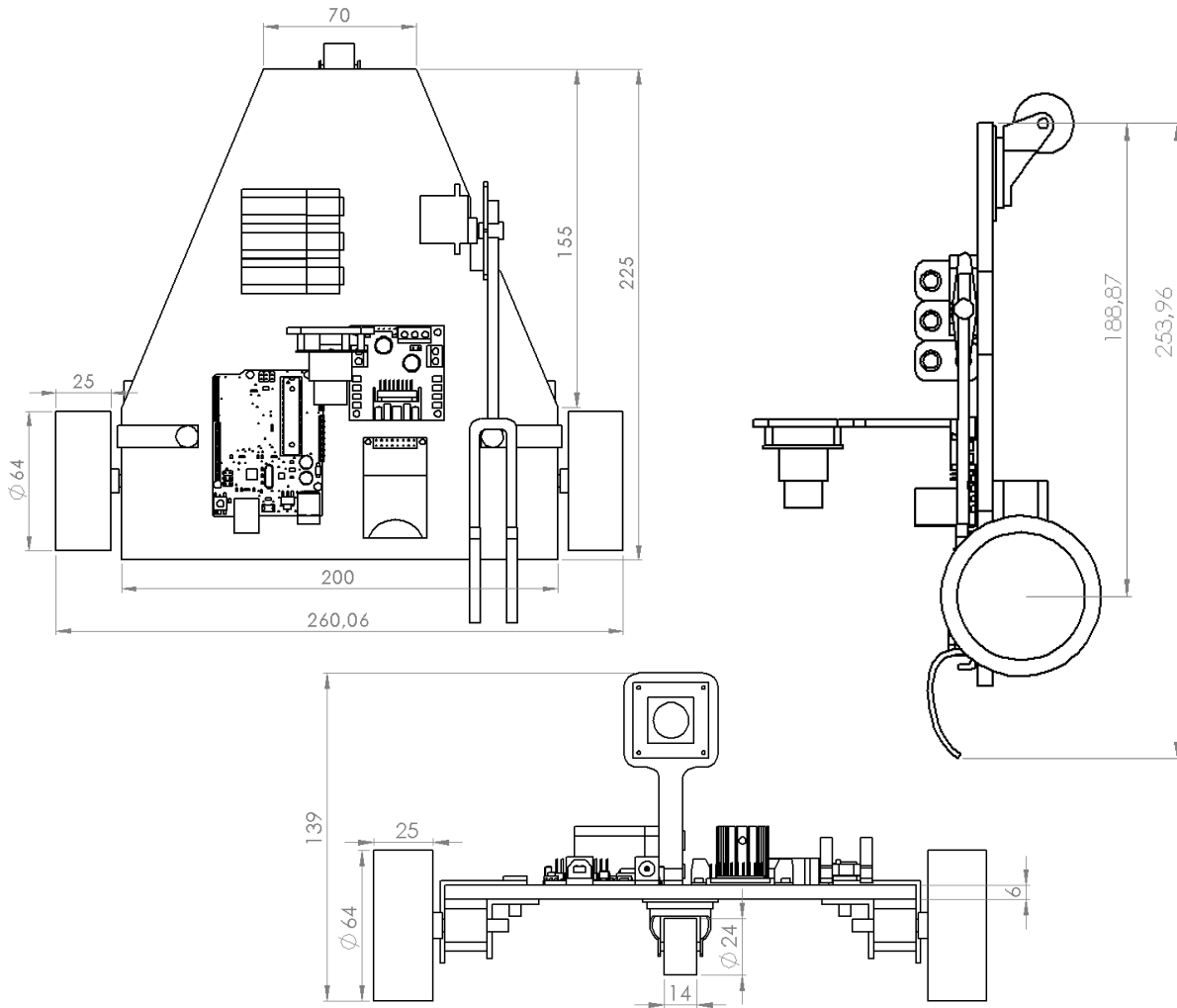
Les pièces du rover maintenant la caméra, ainsi que les moteurs ont été réalisés en impression 3D, et le support rover est en bois, afin de respecter les matériaux prescrits par le cahier des charges de Planète-Sciences.



*Premier test de sortie de la nacelle du rover*

Voici les plans finaux du rover :





*Plans du rover tel qu'il était au C'space 2017*

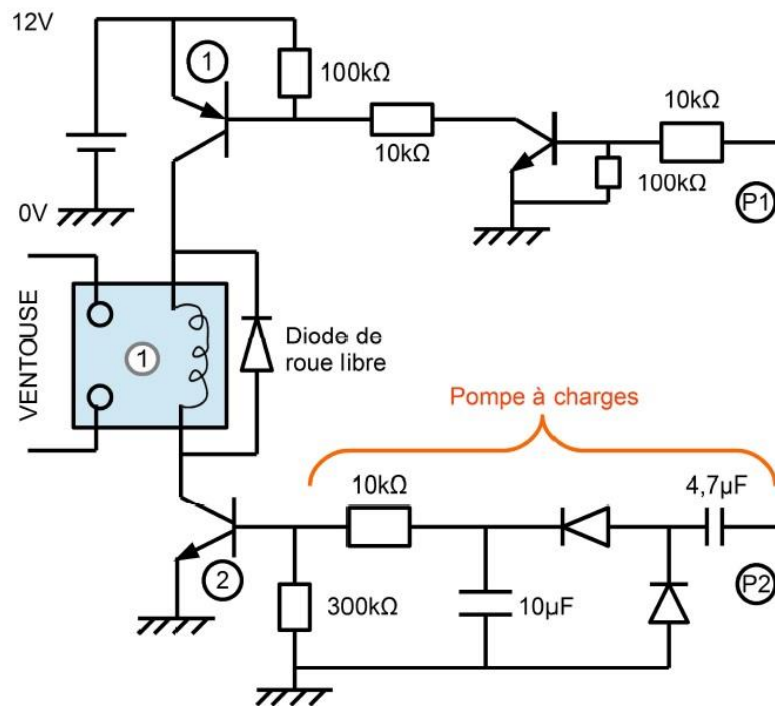
Le montage du système d'ouverture est fait à base de redondance, et avait déjà été utilisé sur la fusée expérimentale Aircaster (C'space 2016). Pour déclencher l'ouverture de la porte de la nacelle, l'Arduino dédiée à l'ouverture doit envoyer un signal constant à 5V sur une voie, et un signal carré de période 40 ms sur une autre voie du montage.

*Préparatifs du rover pour le C'space 2017 :*





Voici le schéma du montage tel qu'il était pour la fusée Aircaster. Aucune modification n'a été apportée pour le projet :



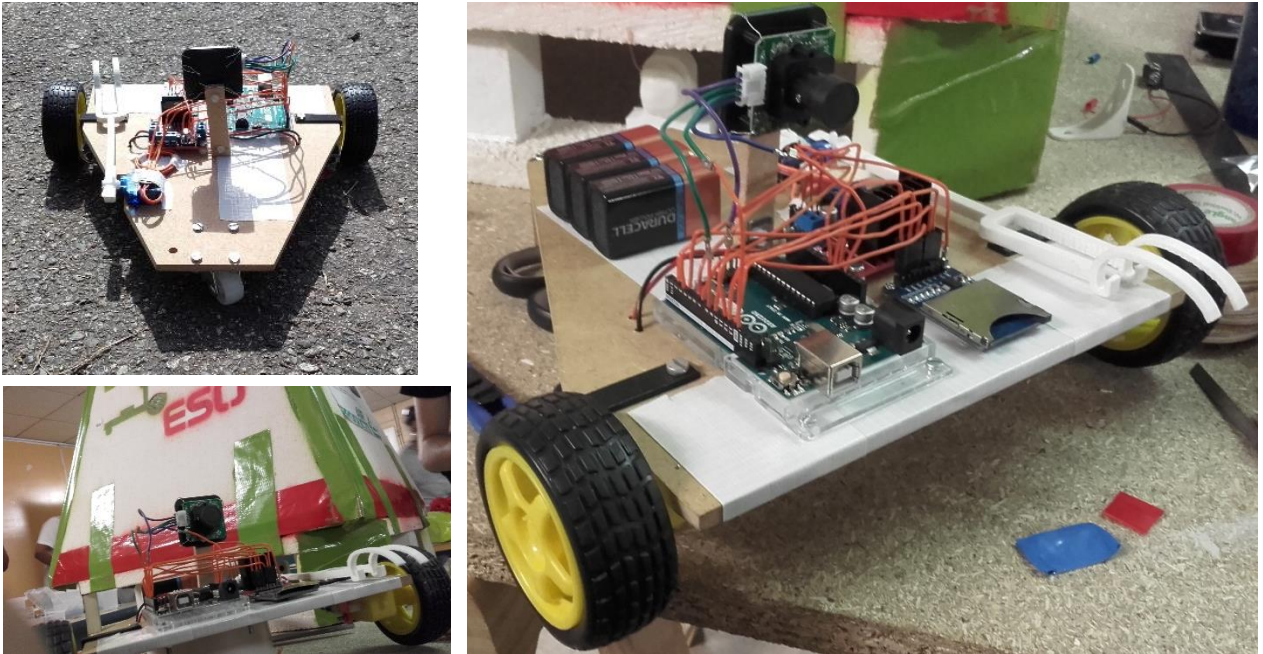
*Montage de déclenchement, avec le signal constant en P1 et le signal carré en P2. La ventouse électromagnétique qui était utilisée sur Aircaster est dans notre cas remplacé par un moteur.*

Afin d'ajouter une sécurité mécanique à la sécurité électronique, nous avons décidé d'utiliser un petit moteur avec un système roue-vis-sans-fin afin de s'assurer qu'un imprévu extérieur n'ouvre pas la porte de la nacelle.

Malgré le fait que le rover n'ait pas pu voler au C'space, il a pu être testé lors du test en ballon captif d'Avril 2017. Nous détaillerons celui-ci dans la suite de ce compte-rendu.

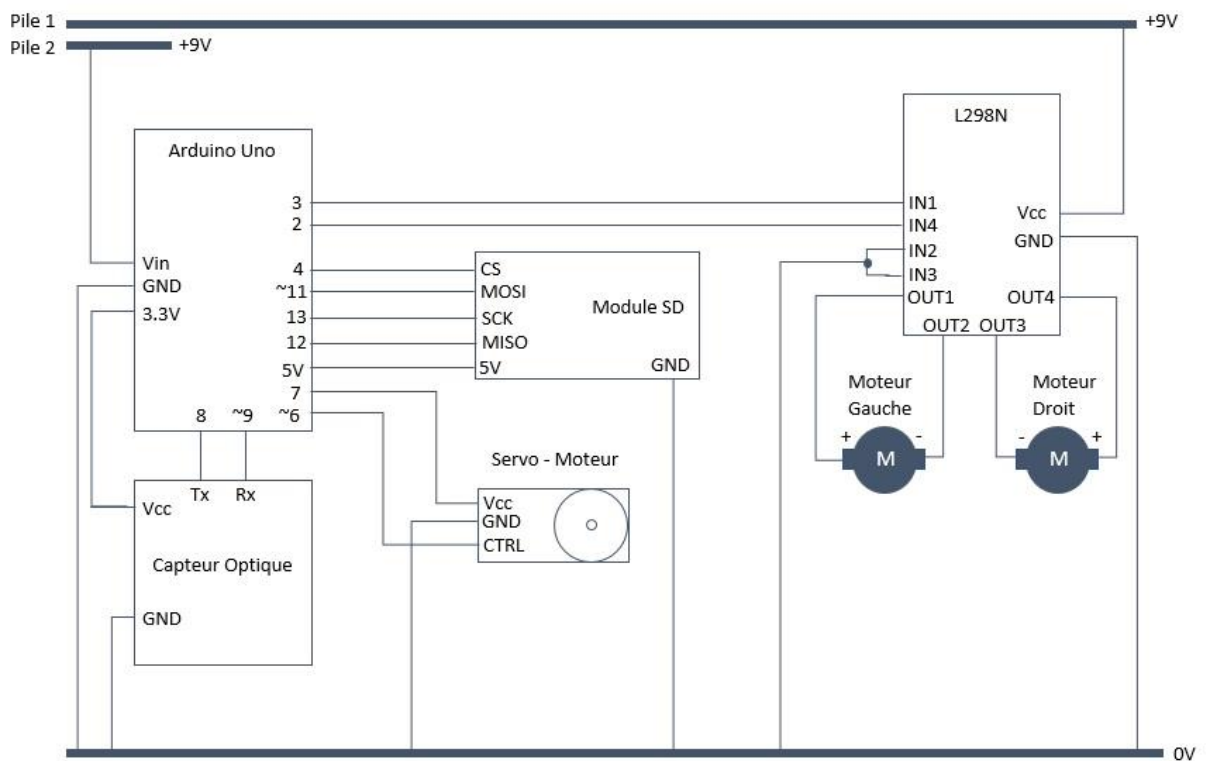


Voici l'intégration finale des composants sur le rover, terminée lors du C'space 2017 :



*Rover tel qu'il était lors du C'space 2017*

Voici pour finir le schéma de l'électronique embarquée du Rover :



Pour respecter le cahier-des-charges, tout en transportant toute la charge utile décrite précédemment, il a fallu concevoir une nacelle aux dimensions adaptées, avec embarqué du matériel hors-expérience.



### 3. Plans de la nacelle

La nacelle contenant notre expérience a été conçue selon trois critères. Tout d'abord respecter les prescriptions du cahier des charges (matériaux, dimensions et masses), ensuite permettre l'intégration de l'expérience en vol, et pour finir permettre au rover de sortir une fois la nacelle au sol.

La forme de la nacelle est donc faite de façon à placer son centre de gravité le plus bas possible, afin que la nacelle retombe au sol la plus droite possible (dans le cas où la nacelle serait retombée sur un terrain plat, comme il s'est avéré être le cas).



*Les CAO de la nacelle et du rover*

Les matériaux constituant notre nacelle sont des planches de polystyrène extrudé d'une épaisseur de 20 mm, attachées entre elles, avec des jointures au mastic afin d'éviter au maximum les fuites.

Le support des capteurs se trouve sous la nacelle, afin d'avoir les capteurs extérieurs les plus proches possible du montage, et ainsi éviter d'utiliser des câbles de plus de 30 cm de long dans notre nacelle. Les ouvertures sont les plus grandes possible, afin d'éviter au mieux l'effet Venturi, qui fausse les valeurs de vitesse du vent.

Afin d'éviter au maximum les problèmes de compatibilité électromagnétique, nous avons ajouté une feuille d'aluminium, connectée à la masse du montage, sous la boîte contenant le montage. L'antenne a quant à elle été placée sous la nacelle, à la verticale par rapport au sol.



*Nacelle telle qu'elle était le jour du test en ballon captif*

Dans la configuration avec le rover, une planche de polystyrène servait de support au rover et permettait une séparation de celui-ci avec le montage de vol. Des attaches lui permettaient aussi de subir le test de retournement de la nacelle, et une ficelle le raccordait en permanence à celle-ci.



*Le rover sortant de la nacelle lors du test en ballon captif*

Dans la configuration finalement utilisée durant le vol, un seul étage se trouvait dans la nacelle, avec le montage électronique placé dans une boîte en plastique (avec quelques trous pour l'équilibre des pressions), et la porte du rover servait à avoir accès au montage jusqu'au dernier moment avant le vol.

Afin d'assurer le bon fonctionnement du montage durant tout le vol, l'aérotechnicien en charge de notre projet au C'space nous a recommandé d'utiliser des piles 4.5 V de la

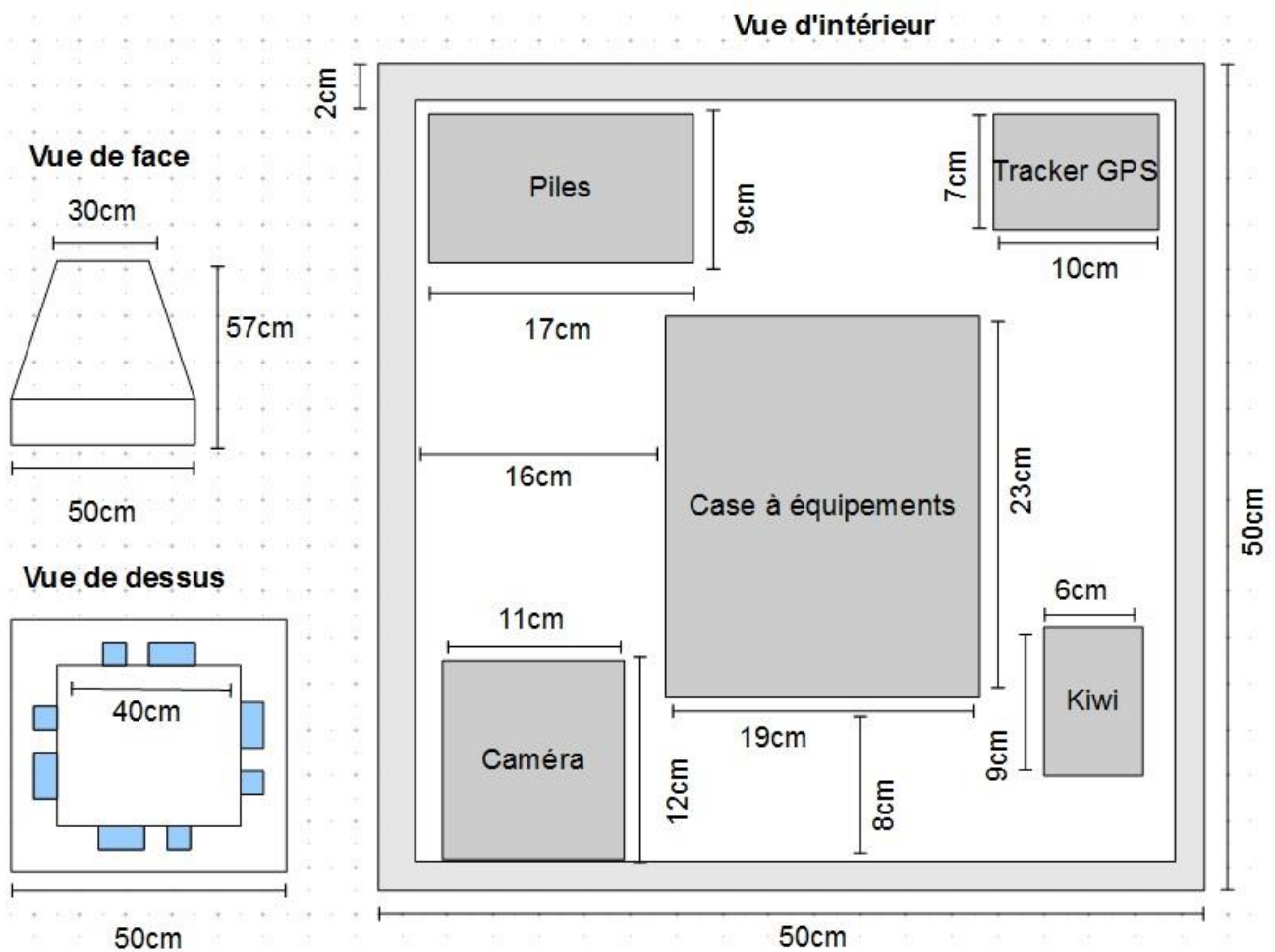


marque Duracell plutôt que les piles 9 V que nous avons prévues. Il nous a donc fallu revoir les masses à bord de la nacelle.

Pour assurer la récupération de la nacelle, une balise GPS TK102 a été utilisée, avec une carte SIM prépayée. La programmation choisie de la balise pour le jour du vol sera détaillée plus tard dans ce compte-rendu.

Afin de synchroniser nos mesures avec les évènements extérieurs, une caméra a été placée sur un des côtés de la nacelle. Ainsi, nous espérons obtenir des images extérieures datées, afin de les corrélérer aux mesures effectuées par notre expérience embarquée. La caméra choisie est de la marque Apeman, et a été laissée dans sa coque de protection durant tout le vol.

Voici les plans, ainsi qu'une photographie de l'intérieur de la nacelle, telle qu'elle était le jour du décollage de celle-ci (20/07/2017) :

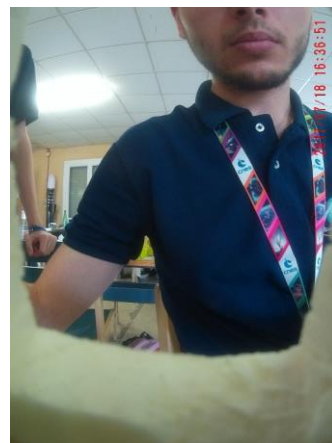


*Plans schématiques de la nacelle le jour du décollage*



*Intérieur de la nacelle tel qu'il était le jour du décollage*

Afin de transmettre les données mesurées au sol en même temps que de les enregistrer à bord de la nacelle, une carte de télémétrie Kiwi Millenium ainsi qu'une antenne fouet nous ont été prêtés par Planète-Sciences. Nous détaillerons plus tard la partie télémétrie du projet.

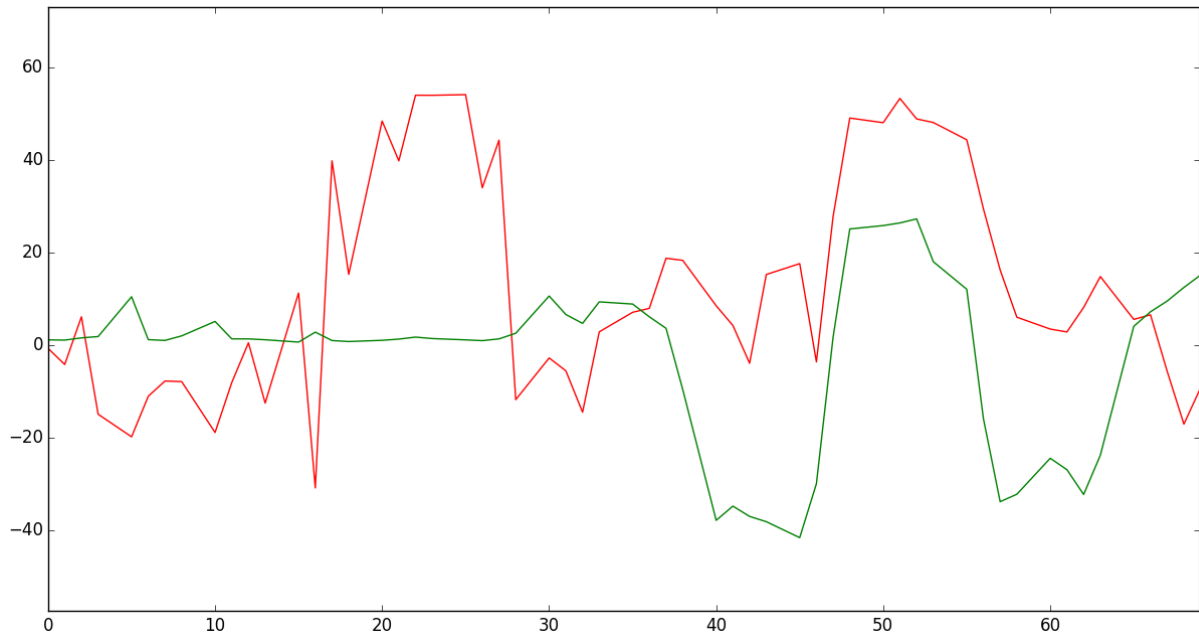


*Images prises par la caméra embarquée lors de l'intégration nacelle (C'space 2017)*



## 4. Résultats au sol

Avant de réaliser notre test du montage en ballon captif (Avril 2017), plusieurs tests au sol de l'anémomètre ont été réalisés. Tout d'abord, un des premiers tests a été réalisé en intérieur avec un ventilateur, en l'allumant et l'éteignant dans différentes directions :



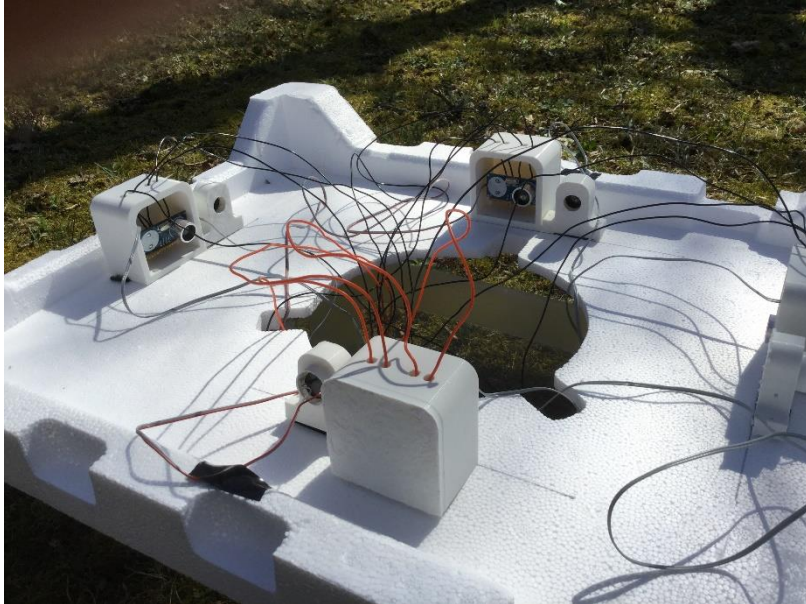
*Courbe de la variation de la vitesse du vent en km/h au cours du temps en secondes, selon les deux directions (rouge et vert) de l'anémomètre. Test réalisé en Janvier 2017.*

On observe bien les instants auxquels le ventilateur est allumé, ainsi que les directions de celui-ci. On observe même lorsque celui-ci est allumé entre deux directions. L'ordre de grandeur des vitesses est cohérent avec un ventilateur mis au maximum de sa puissance, comme nous l'avons mis pour ce test. Le manque de stabilité de la mesure peut s'expliquer facilement par le fait qu'un ventilateur est loin de produire un flux d'air parfait.



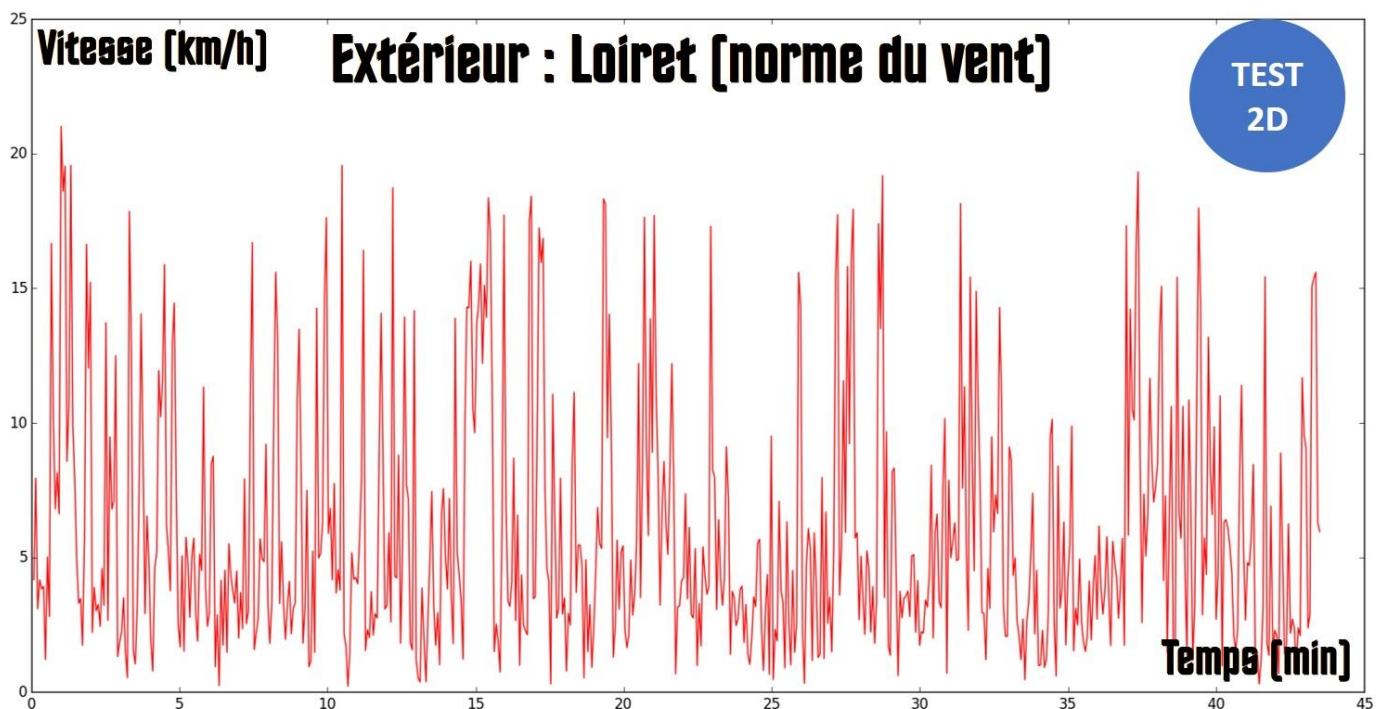


Par la suite, un test plus conséquent a été réalisé en extérieur, sur une durée de plus de 40 minutes. Les capteurs étaient situés sur un support en polystyrène à moins d'un mètre du sol. Bien que la boussole fût déjà fonctionnelle lors de ce test, la plate-forme ne bougeant pas, ses mesures n'ont pas été utilisées.

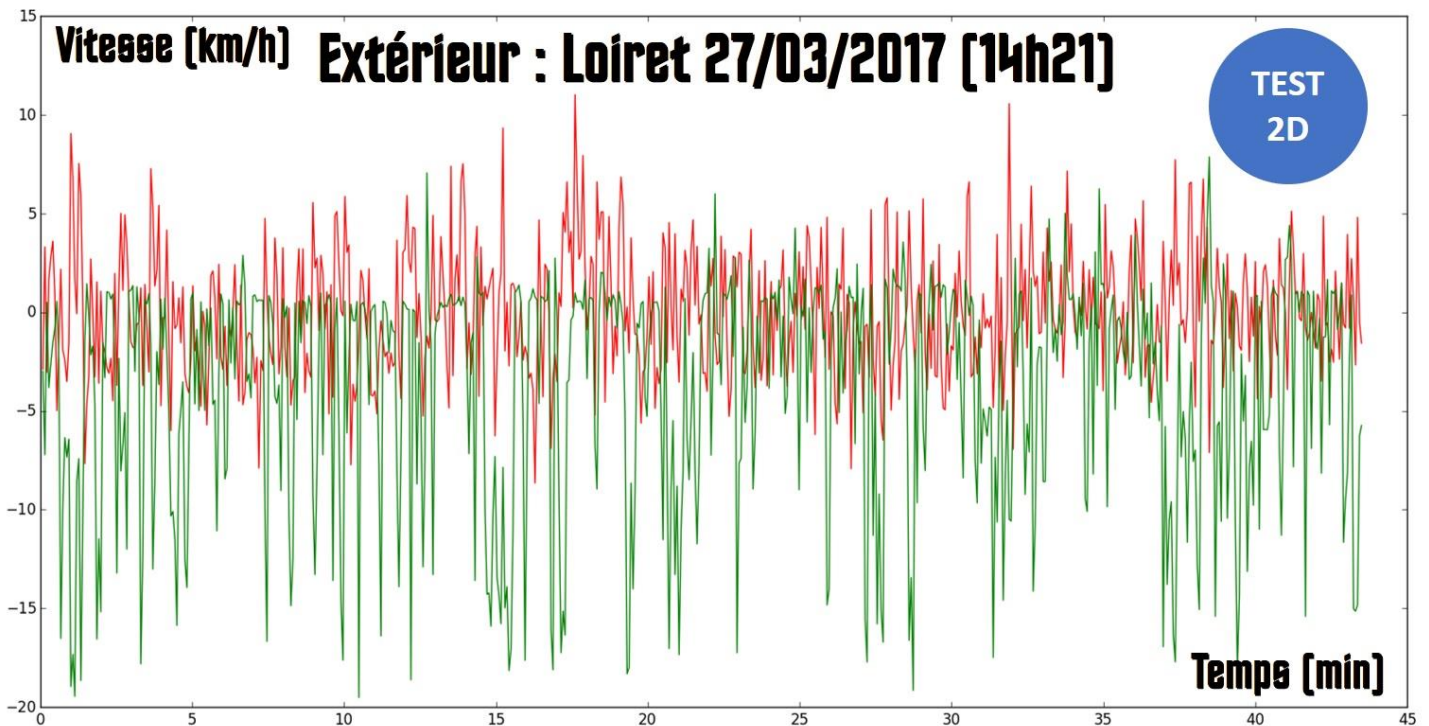


*Montage utilisé pour le test en extérieur du 27 Mars 2017*

Voici les courbes réalisées avec les données de ce test, utilisées pour présenter le projet lors du séminaire espace 2017 du groupe ISAE :



*Mesure de la norme du vent en km/h au cours du temps en minutes lors du test en extérieur du 27 Mars 2017*



*Mesure de la vitesse du vent dans les deux directions (rouge et vert) de l'anémomètre durant le test en extérieur du 27 Mars 2017*

Les mesures de la norme du vent sont cohérentes avec les données météo du jour du test. Cependant, une comparaison précise est impossible, car à la hauteur à laquelle se trouvait le capteur lors du test, les effets de sols sont importants.

Les tests au sol nous donnant des résultats cohérents, il a été décidé d'intégrer les capteurs à la nacelle de manière définitive, afin de pouvoir réaliser un test plus représentatif du vol du ballon.

Nous avons donc décidé de réaliser un test en ballon captif, afin d'obtenir une mesure de la vitesse du vent depuis une altitude plus importante, depuis notre nacelle, et en utilisant la boussole que nous avons ajouté à notre montage.



## 5. Résultats du vol en ballon captif

Afin de réaliser un test du couplage anémomètre-boussole, ainsi que de la sortie du rover de la nacelle, nous avons décidé de réaliser un test en ballon captif de notre nacelle.

La nacelle chargée pesant d'après nos mesures 1.9 kg (sans télémétrie, balise GPS et sans système d'ouverture automatisé), nous avons opté pour un ballon en PVC de 2 mètres de diamètre. Nous avons sélectionné un ballon circulaire afin de représenter au mieux les effets aérodynamiques subis par le ballon stratosphérique.

L'entreprise Air Products a accepté de devenir notre sponsor en nous offrant une bouteille de 5 m<sup>3</sup> d'hélium. La police aérienne des Yvelines a été contactée afin de prévenir l'aviation civile de notre vol captif. Une altitude maximale de 30 mètres a été convenue avec eux.

Le ballon a décollé le 29/04/2017 à 10h depuis la ville de La Verrière, dans les Yvelines. Plusieurs vols ont été réalisés, avec et sans rover.

Voici quelques images de cette journée de vol :



*Préparation des expériences embarquées avant le vol en ballon captif*



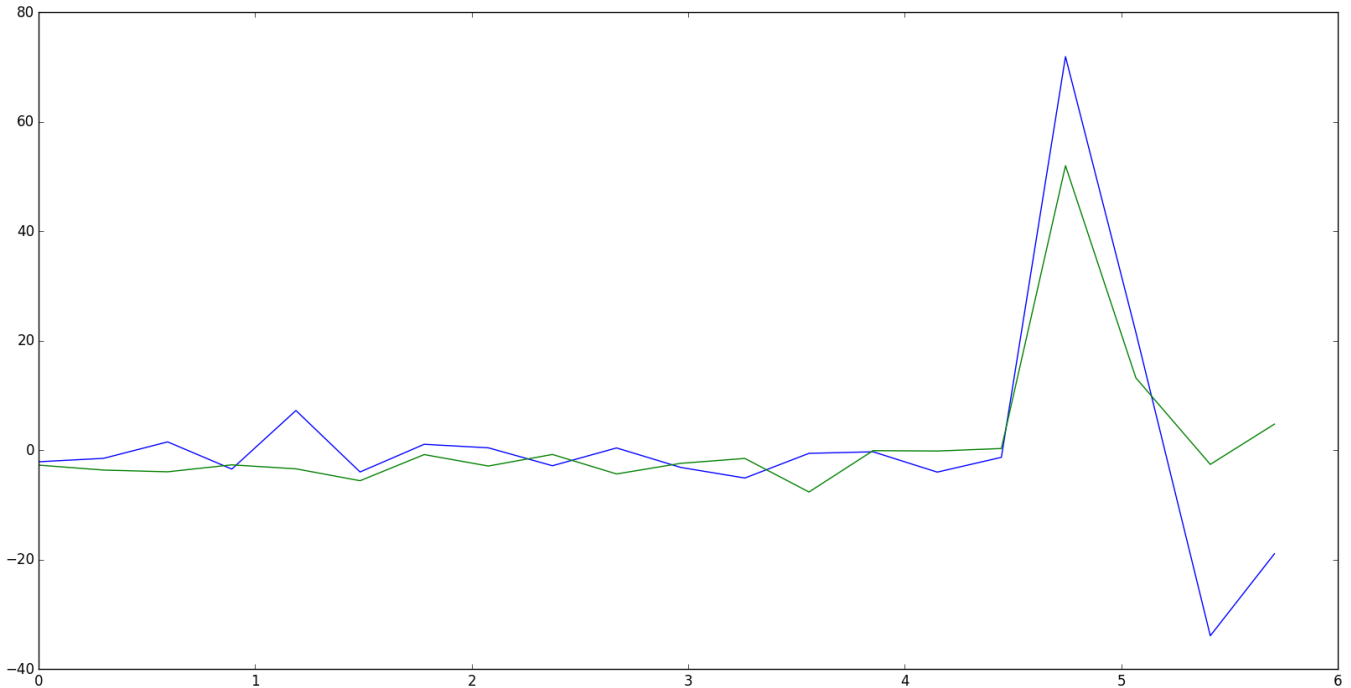


*Images des préparatifs du test en ballon captif*



*Image du test en cours*

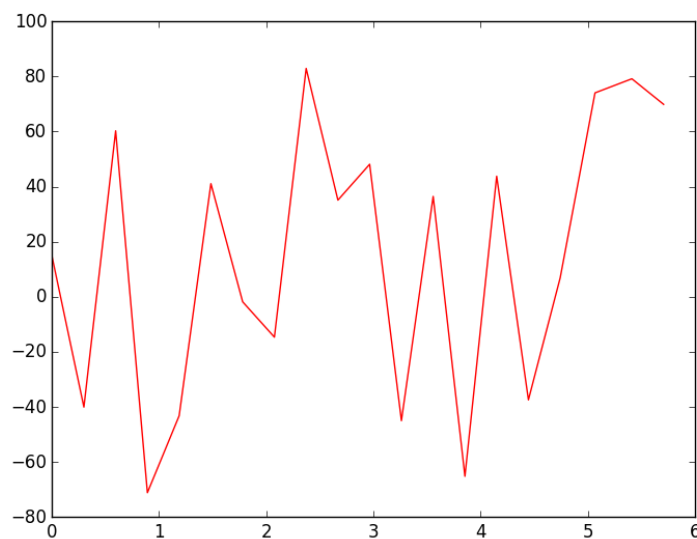
Le ballon a pu être gonflé jusqu'à être en mesure de soulever la nacelle sans aucun problème. Des mesures ont pu être réalisées durant différents vols.



*Evolution de la vitesse du vent en km/h au cours du temps en minutes dans deux directions (vert et bleu), le pic correspondant à la descente du ballon*

Comme on s'y attendait, le ballon se déplaçant en suivant le vent, on observe un vent mesuré très faible, parsemé de quelques rafales. Un seul pic ressort des mesures, qui correspond en réalité à la descente du ballon.

Une mesure de l'angle de la nacelle par rapport au Nord magnétique a aussi été réalisée avec succès durant le vol. Une telle mesure peut en théorie nous permettre de déterminer la direction du vent pendant un vol :



*Direction de la nacelle par rapport au Nord durant le vol en degrés, par rapport au temps en minutes.*



On observe que l'angle se stabilise lors de la descente du ballon, ce qui est logique au vu du mouvement forcé que nous lui imposons alors. On observe aussi que la nacelle ne semble pas faire de tour complet sur elle-même, ce qui est aussi logique, vu que la corde ne s'est pas emmêlée de tout le vol.

La sortie du rover, une fois la porte ouverte (manuellement pour ce test), s'est déroulée comme prévu, et une image a été prise par sa caméra embarquée :



*Photographie prise par la caméra du rover lors du test en ballon captif*

Le test a comme prévu duré jusqu'à 12h, et malgré une petite fuite à colmater, le ballon est en état de voler à nouveau les années suivantes pour d'autres projets.



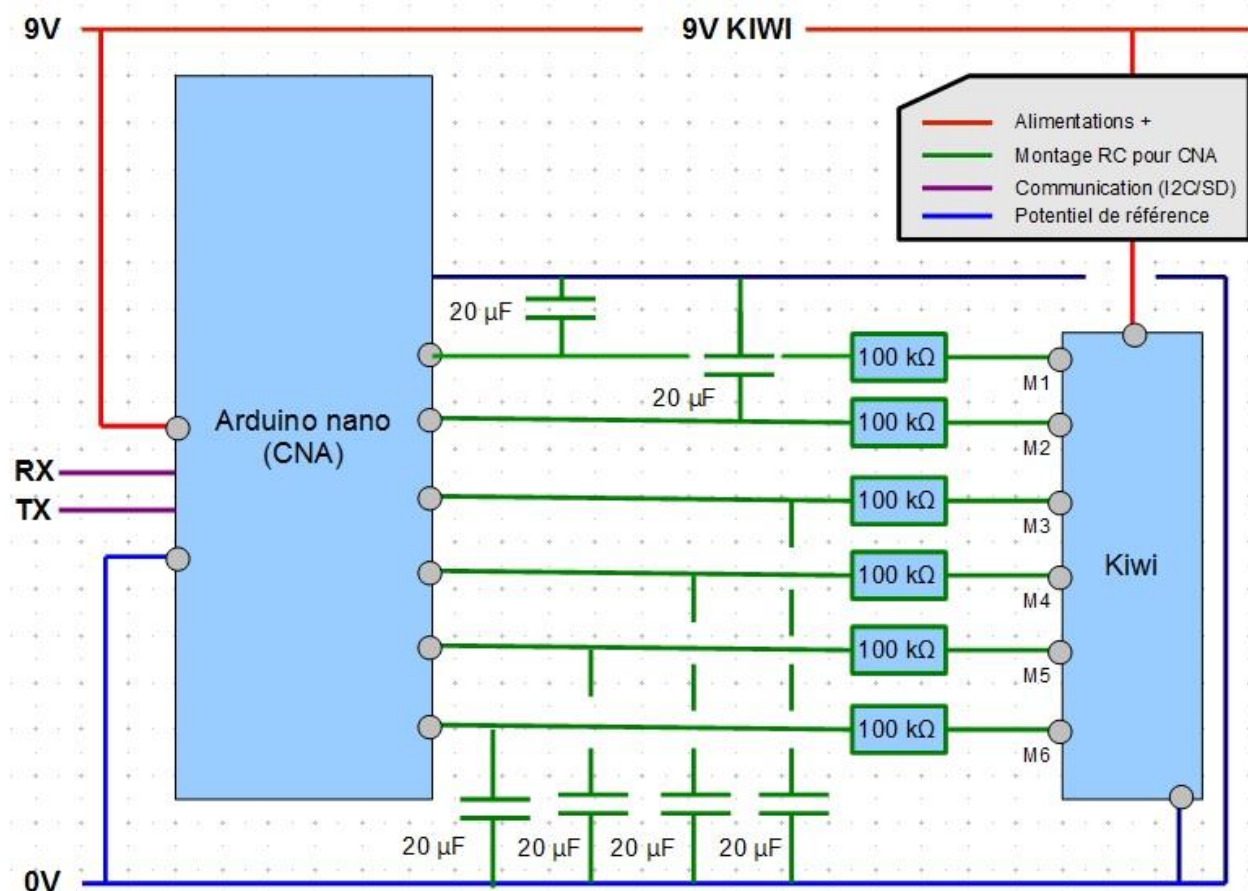
## 6. La télémétrie

Afin de pouvoir obtenir les données de l'expérience en cours de vol, en cas de perte de la nacelle, Planète-Science nous a prêté une carte Kiwi Millenium, conçue par le CNES. Cette carte permet de facilement utiliser 8 capteurs analogiques en même temps, grâce à sa modulation interne. Cependant, comme tous nos capteurs étaient numériques, nous devons trouver un moyen de conversion.

Nous avons opté pour une conversion utilisant la capacité de l'Arduino à générer des signaux PWM. Chaque valeur mesurée par nos capteurs est donc transformée en une valeur sur 8 bits, qui va elle-même être transformée en signal PWM. Ensuite, un filtre RC à forte constante de temps transforme le signal PWM en signal analogique entre 0 et 5V. Ainsi, les signaux sont lisibles par les ports analogiques de la carte Kiwi.

Cette solution nous évite d'avoir à réaliser une modulation externe, ce qui a été un gain de temps pour le projet, que cette méthode soit moins intéressante techniquement.

Voici le schéma du montage que nous avons utilisé :



*Schéma du montage utilisé pour la télémétrie*



Il y a donc un total de 3 Arduino nano embarquées dans la nacelle, ainsi que 4 piles de 4.5V afin de pouvoir alimenter de manière indépendante le montage et la carte Kiwi.

Les données des autres cartes Arduino sont transmises à celle de la télémétrie par liaison série (RX et TX sur les schéma).

Les fonctions de conversion en signaux analogiques entre 0 et 5V sont les suivantes :

L'anémomètre (4 mesures),  $y = 0.425 (x-100)$ .

Le magnétomètre (2 mesures),  $y = 0.166 (x+768)$ .

L'altimètre (1 mesure),  $y = 0.0283 x$ .

Plusieurs tests ont été réalisés. Avant le C'space, une carte Arduino supplémentaire a été utilisée pour lire les sorties analogiques, afin de voir quelles valeurs auraient été mesurées par la carte Kiwi. Pendant le C'space, le montage a été testé plusieurs fois par l'équipe du spatiobus.



*Image du spatiobus prise par la caméra embarquée durant un test de télémétrie*





## 7. Déroulement du vol stratosphérique

La nacelle a été testée la veille du décollage, et la chaîne de vol a été montée ce même jour. Comme pour la plupart des vols en ballon stratosphérique, elle était composée d'un ballon, un parachute, un anneau anti-torche, un réflecteur radar et enfin la nacelle.

Pendant que le ballon était gonflé et la chaîne de vol attachée par Planète-Sciences et des volontaires de l'ESO, nous avons la charge de préparer la nacelle pour le vol.

Tout d'abord, il a fallu allumer la balise GPS et attendre qu'elle envoie un premier SMS avec ses coordonnées. Nous l'avons programmé pour envoyer un SMS toutes les 5 minutes pour un temps indéfini. Ainsi, nous espérons recevoir un SMS lorsque la balise retrouverait le réseau GSM, une fois au sol.

Ensuite, la caméra ayant une meilleure qualité d'images en photographie qu'en film, et afin d'économiser au maximum les batteries, nous avons programmé la caméra pour prendre une image toutes les 20 secondes.



*Préparatifs avant le décollage*

D'après les données réceptionnées par télémétrie, le montage a été mis sous tension à 14h34. Le décollage, quant à lui, a selon les images et les données de l'altimètre eut lieu à 14h40. Le décollage s'est déroulé sur la ZAS du camp de Ger, contrairement aux années précédentes où le décollage du ballon avait lieu depuis le camp lui-même.



*Décollage du ballon*

La prédiction logicielle donnait un atterrissage aux alentours de la ville de Mirande (Gers), nous nous sommes donc dirigés vers cette zone 1h après le décollage. Une fois sur place, nous avons reçu le SMS de la balise (17h06, soit d'après les mesures 6 minutes après l'atterrissage). La nacelle s'était posée sur la commune de Saint-André (Gers), à 46 km de là. Les coordonnées exactes sont :

Latitude : 43.552627N

Longitude : 0.857087E

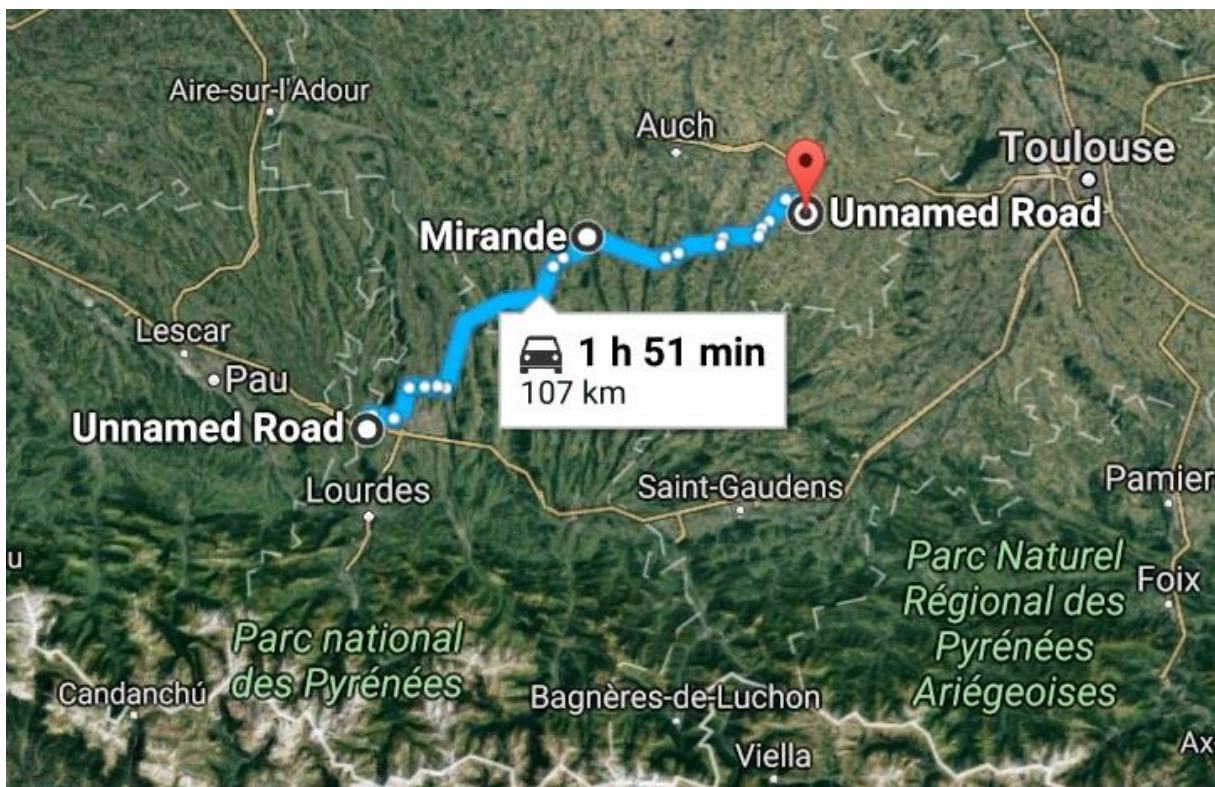
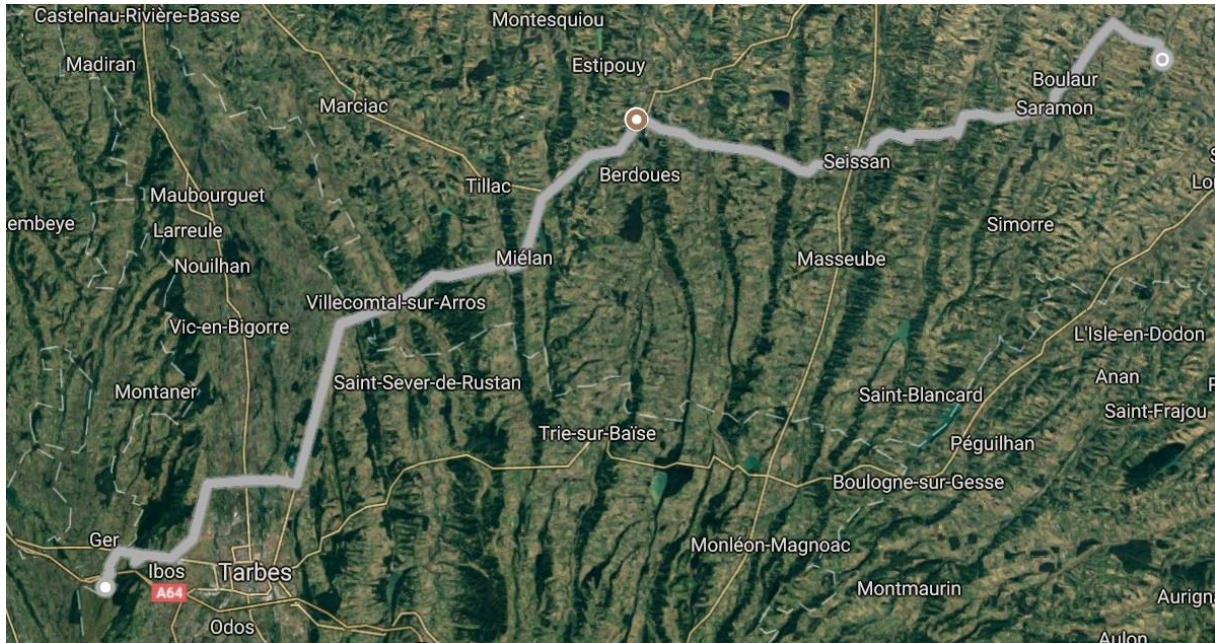


*La chaîne de vol telle qu'elle a été retrouvée à Saint-André (Gers)*



Sur le chemin pour nous rendre à Saint-André, nous avons appris que le contact radio avait été maintenu avec la nacelle durant tout le vol. Le montage a donc fonctionné durant la totalité du vol, les piles ont d'ailleurs par la suite été testées à près de 8.5 V.

La nacelle a bien été retrouvée vers 17h45, aux coordonnées prévues. La balise GPS a donc fonctionné comme prévu. Le lieu d'atterrissage était un champ fauché, au bord d'une route peu fréquentée. Il a donc été facile de récupérer la nacelle.



*Trajet suivi pour retrouver la nacelle*



Fait assez étonnant, le ballon a été retrouvé presque intact, avec une simple fissure le découpant en partie. Tous les appareils à bord fonctionnaient encore, à l'exception de la balise GPS, qui a cessé d'envoyer des SMS alors que nous étions en cours de route.

En plus de la télémétrie, les deux cartes SD de l'expérience, ainsi que la carte micro-SD de la caméra ont pu être retrouvées intactes.

La caméra était dans sa coque de protection. Celle-ci était encore en sous-pression quand nous l'avons retrouvée. Nous avons dû l'ouvrir à l'aide d'un tournevis comme levier.



*Image prise à l'atterrissage du ballon par la caméra embarquée*



## 8. Résultats du vol stratosphérique

### a. Résultats non-expérimentaux

Dans cette partie, nous mettrons tous les résultats du vol hors de l'expérience qu'elle contenait.

Tout d'abord, la balise GPS TK-102 a fonctionné durant tout le vol comme prévu. Le contact GSM a été perdu au bout de 2 SMS, mais 6 minutes après l'atterrissage de la nacelle un SMS a été reçu. Plusieurs autres ont été reçu avant la fin de la batterie du traceur.

Ensuite, la caméra a fonctionné pendant tout le vol, et continuait même à prendre des photographies quand nous l'avons récupérée. Cependant, il faut retenir que la coque de la caméra était encore en sous-pression lorsque nous l'avons récupéré.

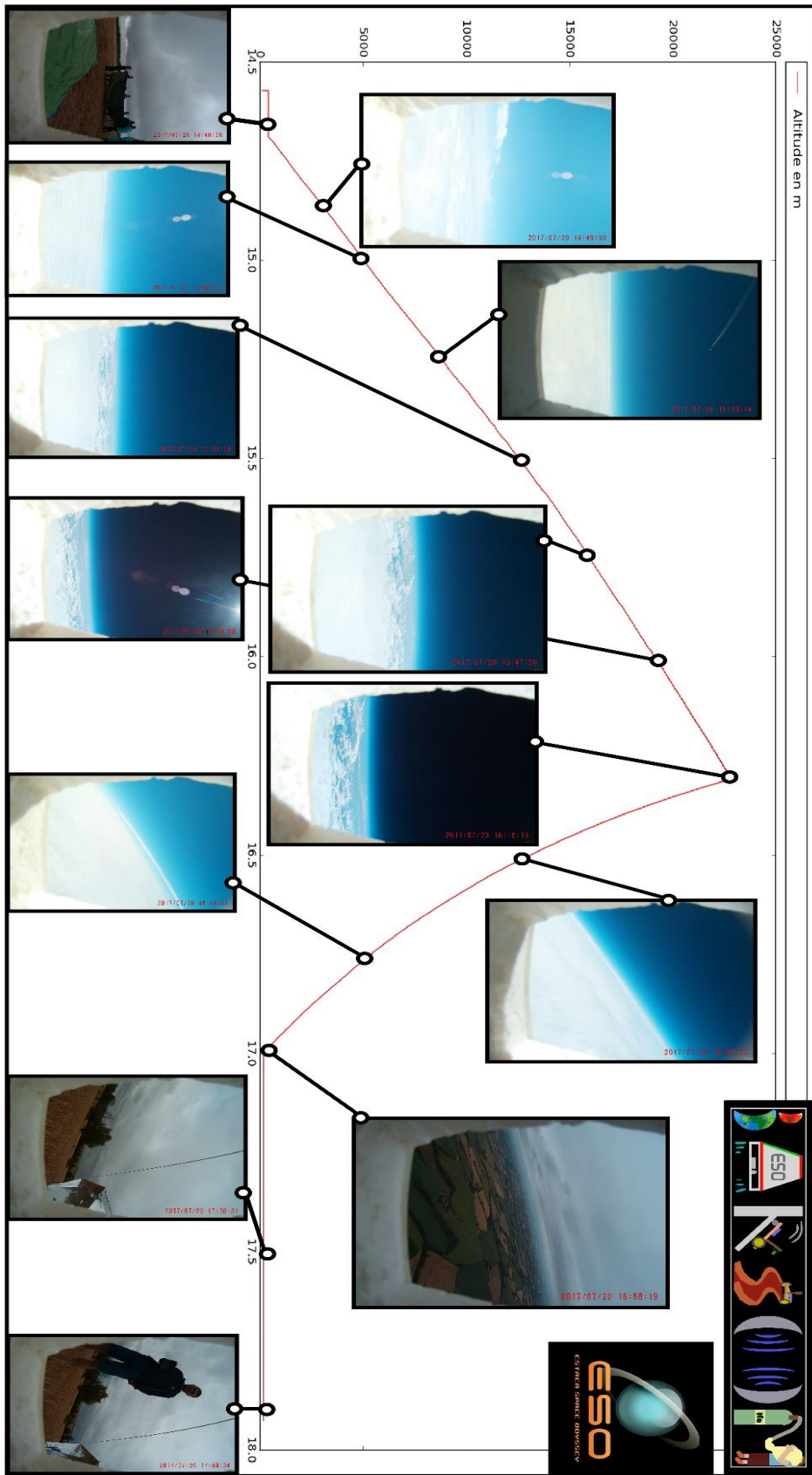
Le contact radio par la carte Kiwi a été maintenu durant tout le vol, avec des données cohérentes avec celles enregistrée (voir la partie suivante).

Et enfin, les piles 4.5V ont très bien résisté au vol dans leur protection en polystyrène extrudé, puisque pour chacune des paires de piles, une tension d'environ 8.5V était mesurée.

### b. Résultats expérimentaux

Dans cette partie seront exposés les résultats des différentes expériences contenues dans la nacelle.

Tout d'abord, la mesure de l'altitude de la nacelle en fonction du temps donne des résultats cohérents, même après 9000 m d'altitude. Bien que le fabricant du BMP180 (baromètre) ne garantisse pas son fonctionnement nominal à une altitude supérieure, les résultats mesurés collent avec la vitesse d'ascension initiale, et avec l'instant d'éclatement du ballon (visible sur les images de la caméra).

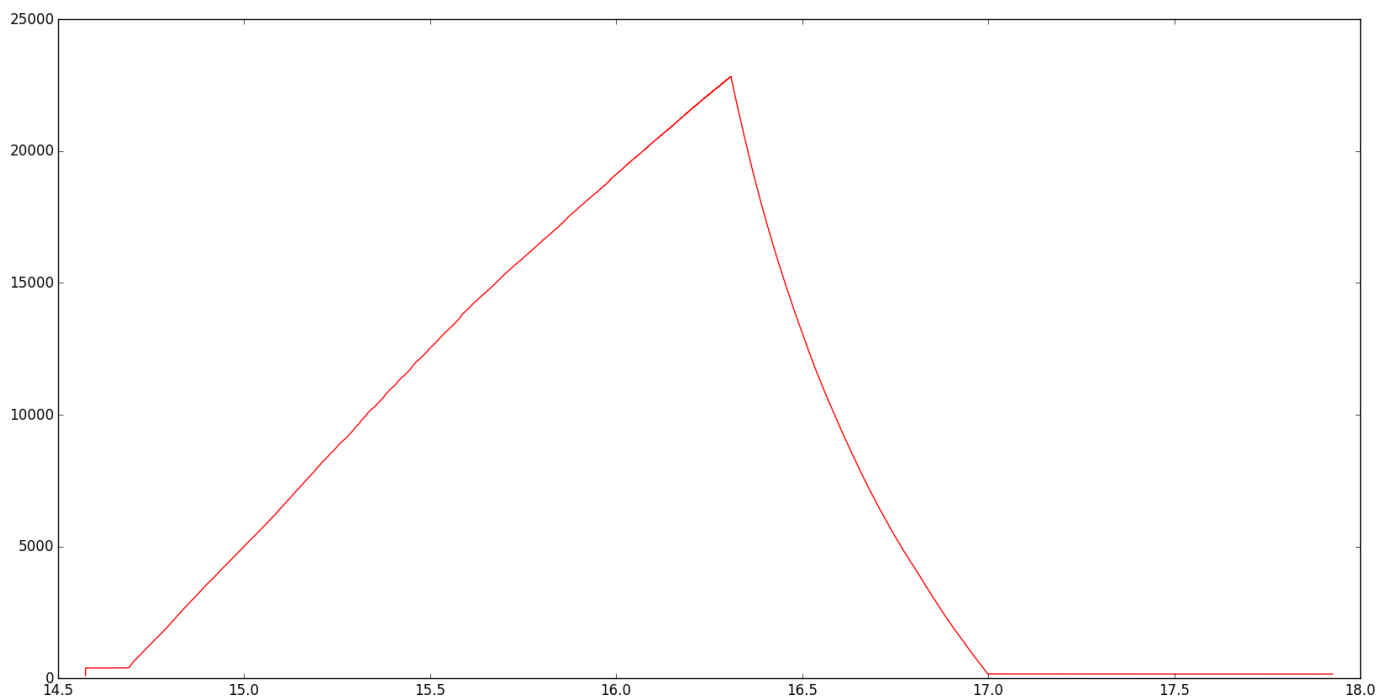


Evolution illustrée de l'altitude de la nacelle (mètres au fil des heures).



L'apogée du vol se situerait donc aux alentours de 22,7 km d'altitude par rapport au niveau de la mer, à 16h18. On observe aussi avec les résultats du baromètre (confirmés encore une fois par la caméra) que l'instant de l'atterrissage se situe à 17h. De plus, les altitudes mesurées au décollage et à l'atterrissage (respectivement 390m et 160m) sont du bon ordre de grandeur pour ces deux lieux.

Voici la courbe de l'évolution de l'altitude en mètres avec le temps en heures sans les images :



*Courbe montrant l'évolution de l'altitude de la nacelle par rapport au niveau de la mer (altitude en mètres, temps en heures).*

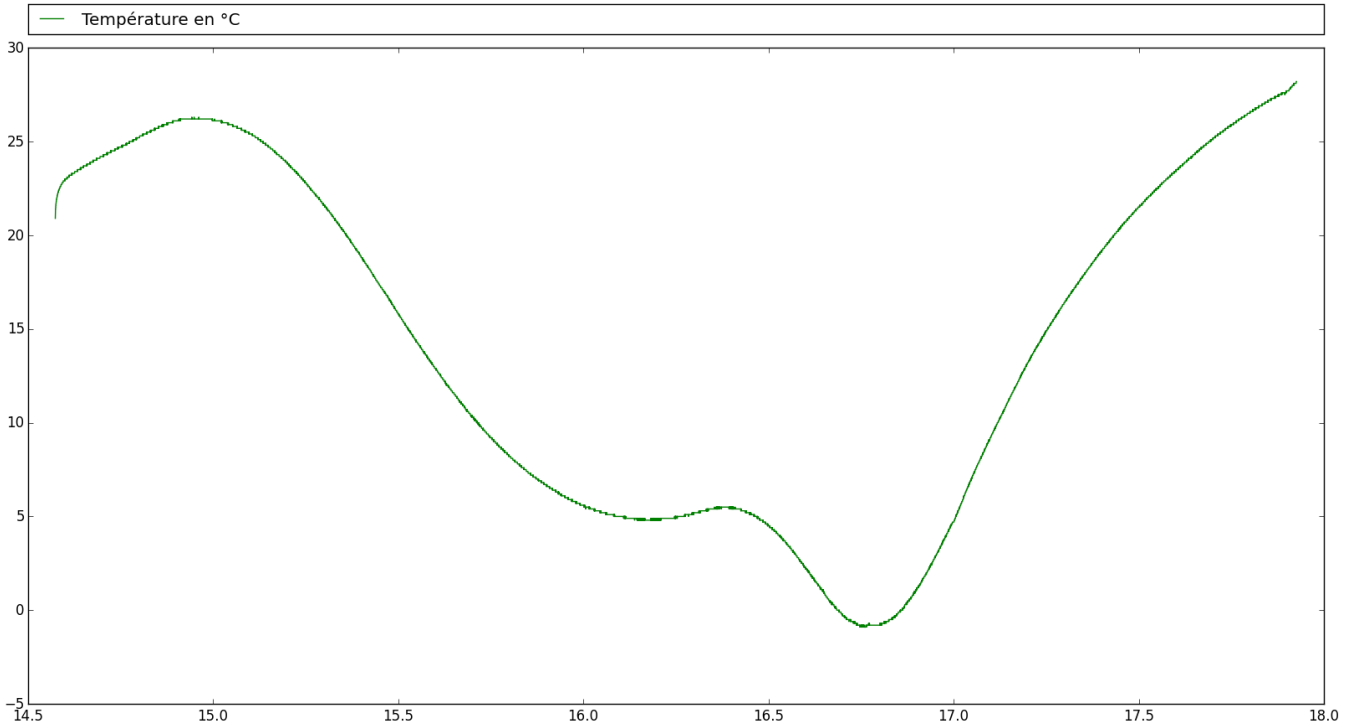
En plus de la mesure de l'altitude de la nacelle, le BMP180 propose une mesure de la température. Cette mesure correspond à la température du composant, qui se trouve dans une boîte isolée à l'intérieur de la nacelle. Le capteur utilise cette mesure de température afin de déduire l'altitude de la pression de l'air.

La courbe obtenue nous montre comme on s'y attendait un décalage entre les différents instants du vol et l'évolution de la température interne. Tout d'abord, la chaleur dégagée par le capteur et même le reste du montage fait augmenter la température mesurée. Et seulement 20 minutes après le début du vol, la température se met à diminuer.

On observe aussi une stabilisation de la température un peu avant l'apogée, puis une légère augmentation de celle-ci après éclatement du ballon. Ensuite, la température diminue à nouveau, et le capteur ne reviendra à température ambiante que près d'une demi-heure après l'atterrissage.



Ces résultats sont à prendre avec précautions, car la température mesurée est ici celle à la surface du capteur, enfermée dans plusieurs isolants. Cependant, le fait que la température qu'il mesure ne descende pas en dessous de zéro durant la majeure partie du vol peut en partie expliquer le bon fonctionnement du montage pendant toute la durée du vol.



*Courbe de l'évolution de la température à la surface du BMP180 au cours du temps en heures.*

Durant tout le vol, le magnétomètre a enregistré des mesures en Gauss selon les trois axes de la nacelle, et la norme obtenue étant entre 0.5 et 0.65 Gauss durant le vol et le temps au sol, nous pouvons considérer les valeurs renvoyées comme cohérentes.

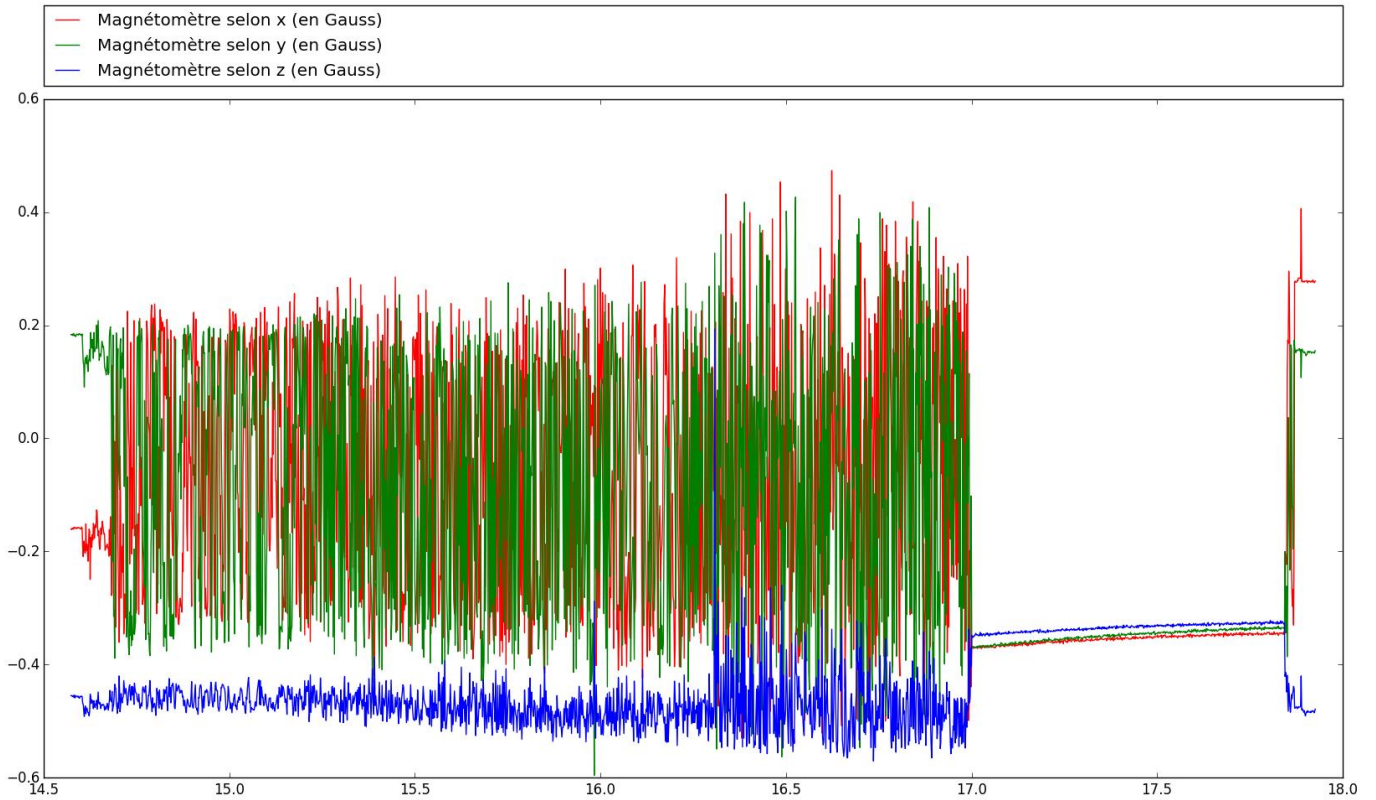
On peut observer sur les courbes selon les trois axes les différents instants critiques du vol. Par exemple, pendant les instants passés au sol, les mesures sont quasi-constantes (ce que confirmera la courbe de l'angle par rapport au Nord). Ensuite, on peut observer l'instant d'éclatement du ballon. En effet, à 16h18, on observe un pic de la mesure selon z, qui correspond sûrement à un tangage violent de la nacelle, que l'on retrouve sur les images de la caméra.

D'ailleurs, l'amplitude des variations de la mesure en z augmentent pendant toute la période de chute, ce qui laisse imaginer une descente plus mouvementée que l'ascension.

On observe aussi en fin de courbe l'instant de récupération de la nacelle.

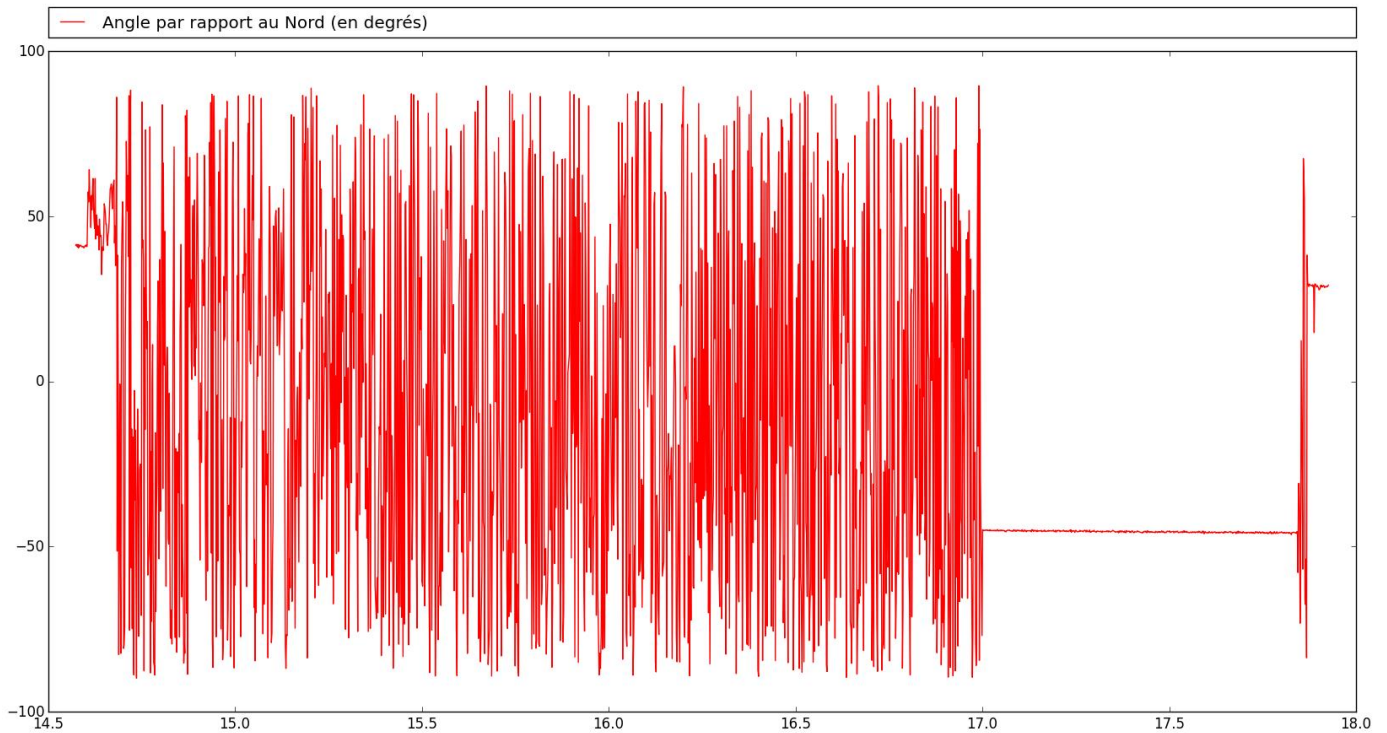
Ces mesures nous permettent donc, en plus de retrouver l'angle de la nacelle avec le Nord, de vérifier que l'horloge interne de l'Arduino ne s'est pas visiblement décalée par rapport à celle de la caméra ou de la télémétrie.





*Variation des mesures (en Gauss) du magnétomètre selon les trois axes de la nacelle.*

La mesure de l'angle par rapport au Nord magnétique est représentée sur la courbe suivante :



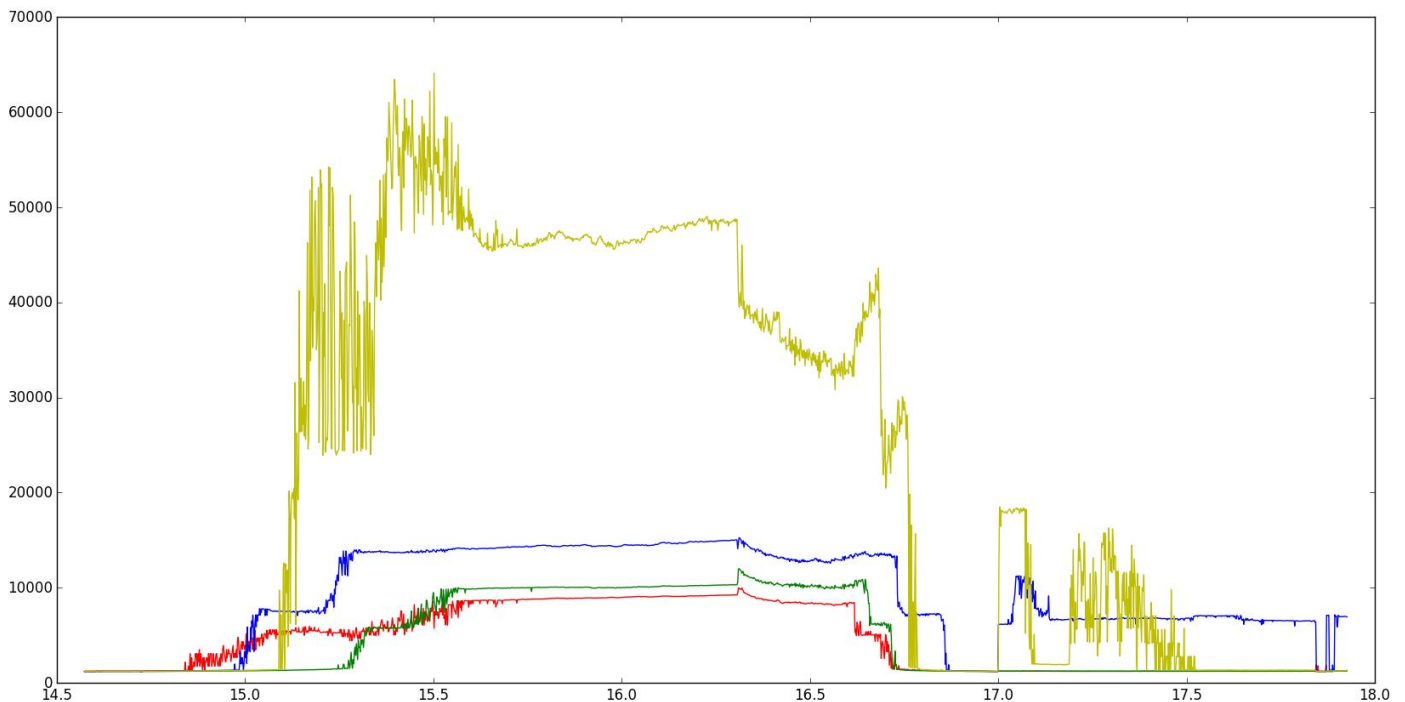
*Variation de l'angle de la nacelle par rapport au Nord magnétique en degrés.*



Nous en venons à présent aux mesures principales de l'expérience : celles de l'anémomètre. Et les résultats obtenus sont inattendus.

Avec cette expérience, nous voulions observer jusqu'à quelle altitude les capteurs fonctionneraient normalement, et quels résultats ils donneraient dans la stratosphère. Une expérience supplémentaire proposée par un de nos suiveurs de Planète-Sciences était aussi de tenter une déduction de la température extérieure de la nacelle à partir des mesures de la vitesse du son réalisée par l'anémomètre.

Voici la courbe du temps de trajet des ondes sonores pour chaque anémomètre, avec le code couleur suivant : capteur 1 rouge, capteur 2 vert, capteur 3 bleu et capteur 4 jaune.

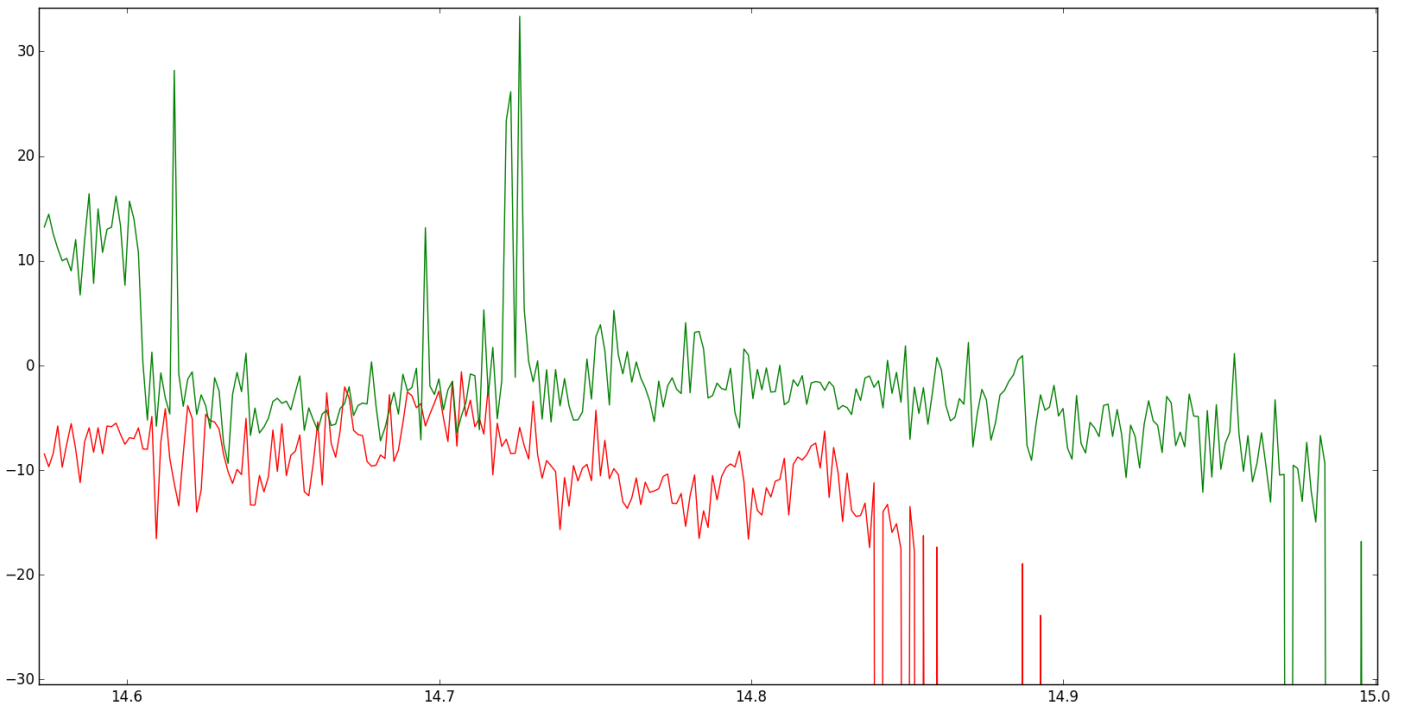


*Evolution du temps de parcours des ondes sonores pour chaque capteur en microsecondes.*

On observe qu'un à un, les capteurs se sont mis à dysfonctionner en cours de vol, passant brutalement de valeurs plausibles à des valeurs beaucoup trop élevées pour être réalistes.

Cependant, les dommages semblent n'être que temporaires, puisque la plupart des capteurs reviennent à un état normal une fois proche du sol. Notre meilleure hypothèse quant à ce dysfonctionnement est donc qu'un effet temporaire ait provoqué une modification dans l'émetteur. Cette modification a provoqué une réception du signal d'un autre capteur par certains émetteurs, ce qui a provoqué les mesures de temps invraisemblables que nous observons.

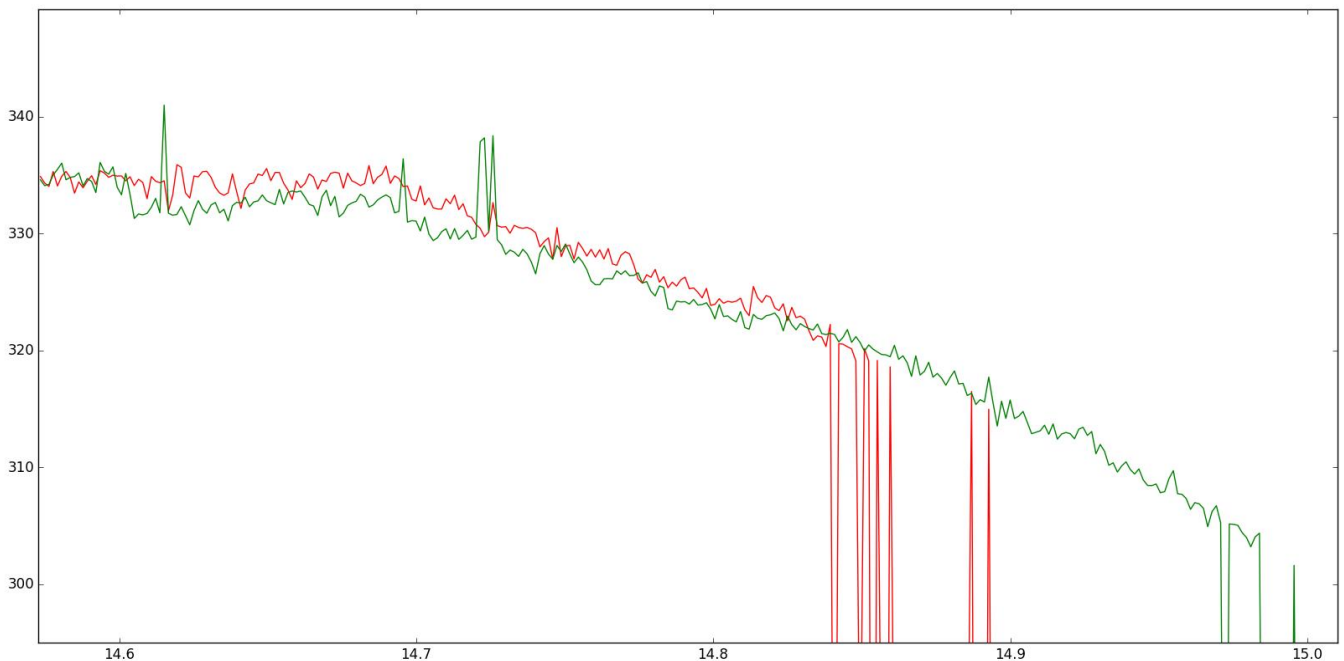
Les données sont tout de même exploitables sur les premières 20 minutes, ce qui correspond à une altitude allant jusqu'à environ 5000 m. Voici les courbes de vent (rouge et vert pour les deux directions de la nacelle) en km/h obtenues pour ces premières 20 min de vol :



*Mesure du vent dans deux directions en (km/h) durant les premières minutes du vol.*

On observe comme on s'y attendait une mesure du vent quasi-constante, très faible, entrecoupée de pics correspondant à des rafales ou des mouvements brusques de la nacelle. Il est à noter que d'après les images de la caméra, la nacelle traverse les nuages de 14.7 à 14.8 h (580 à 2000 m d'altitude environ).

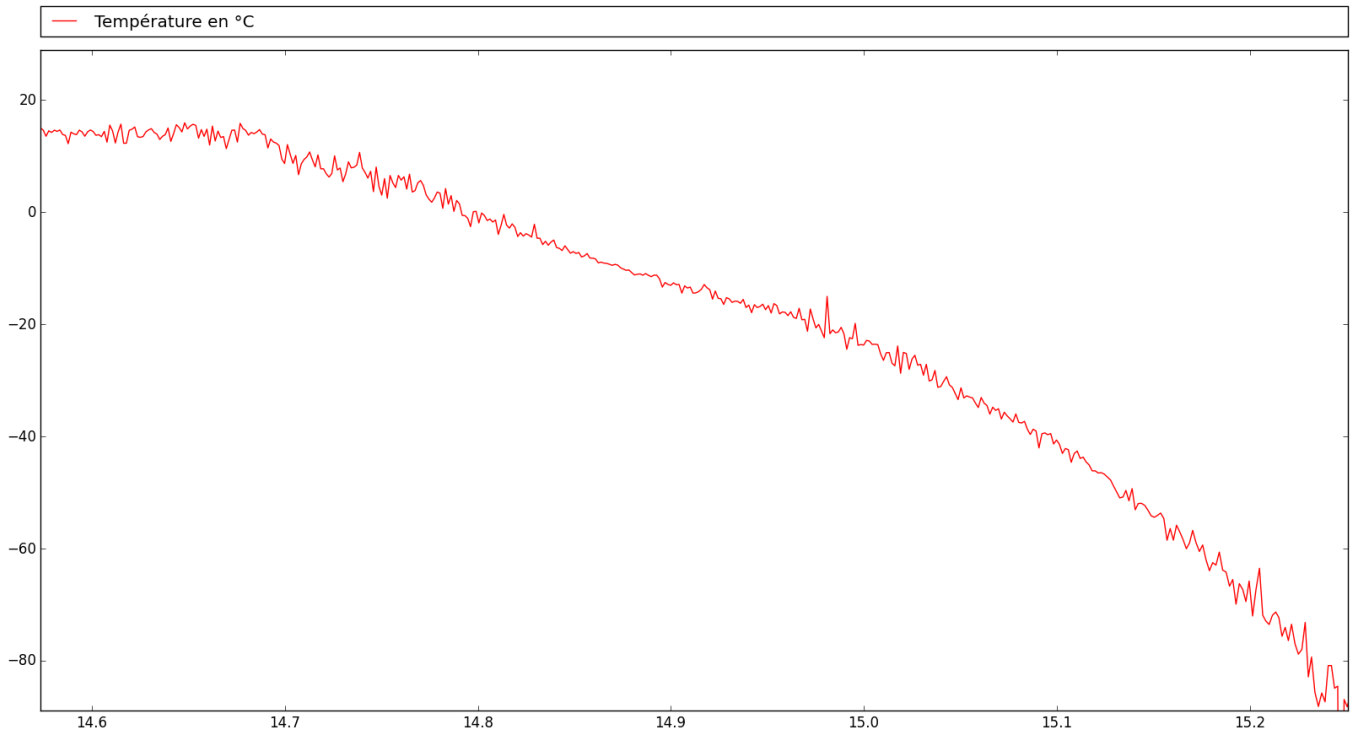
Une autre mesure viable sur ces premières minutes est la vitesse du son, qui se déduit aussi facilement des temps de parcours.



*Mesure de la vitesse du son selon les deux directions de la nacelle en m/s.*



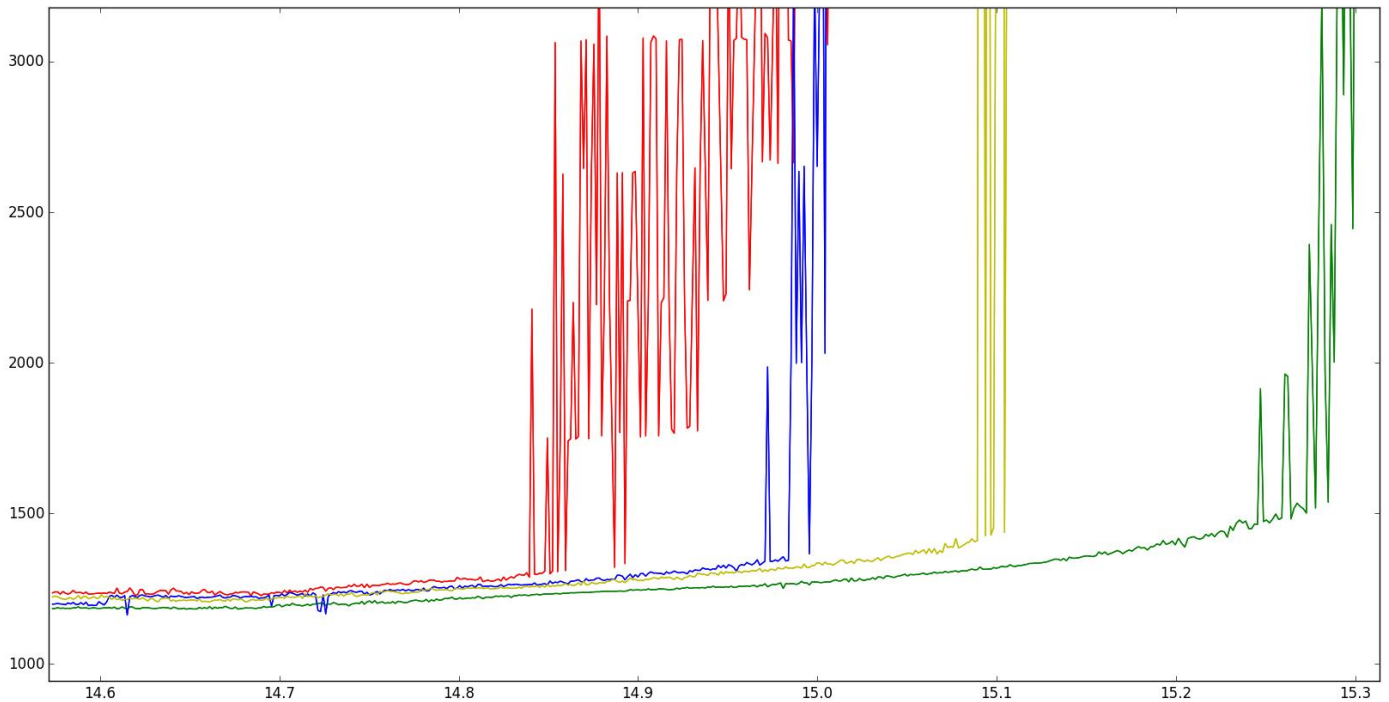
Les valeurs de la vitesse du son que nous obtenons sont plausibles jusqu'à environ 15h pour la courbe verte (soit environ 5000 m d'altitude). Nous avons alors tenté de déduire la température de l'air sous la nacelle à partir de ces mesures de la vitesse du son.



*Estimation de la température de l'air sous la nacelle à partir de la mesure de la vitesse du son pour le capteur ayant fonctionné le plus longtemps.*

Cette courbe représente une estimation de la température extérieure jusqu'à une altitude de 8000 m environ. On remarque que la mesure de température reste plausible jusqu'à environ 15h. En effet, la pente qui était jusque-là proche des  $-6.5$  °C de perte par km d'altitude semble changer de pente. On peut donc imaginer qu'avant même que le dysfonctionnement ne devienne visible sur les valeurs de temps de parcours, le capteur numéro 2 ne donne plus de données plausibles à partir de 15h.

En effet, si on regarde de plus près les courbes de temps de parcours affichées précédemment (même code couleur pour les capteurs), on obtient bien un transitoire vers le dysfonctionnement aux environs de 15h pour le capteur numéro 2 (vert).



*Mesures des temps de parcours des ondes sonores en microsecondes au cours du temps en heures, juste avant les dysfonctionnements capteurs.*

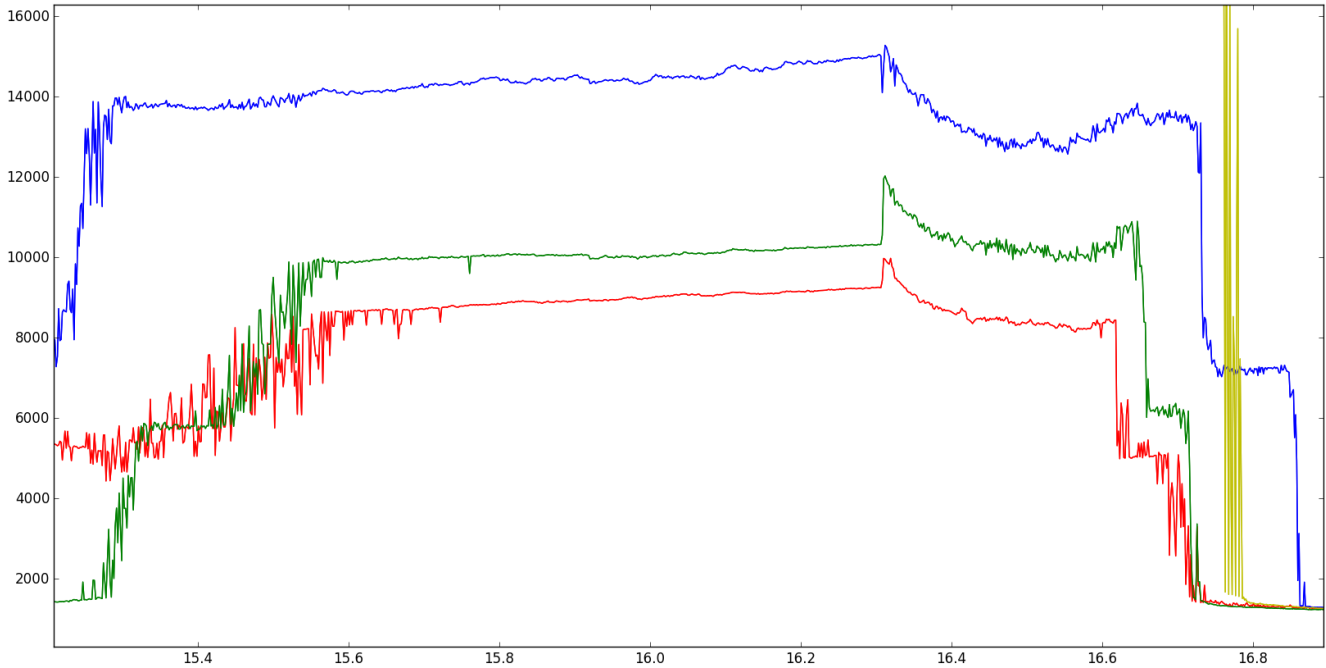
On observe sur ces courbes que le premier dysfonctionnement a lieu pour le capteur numéro 1 à 14,84 h (soit une altitude de 2660 m environ). Or, cet instant correspond à une température extérieure estimée de  $-6^{\circ}\text{C}$  environ, moins de 3 minutes après le passage au travers de la couche nuageuse d'après les images.

Notre hypothèse pour expliquer les différents dysfonctionnements des capteurs est que l'humidité des nuages, puis les températures négatives, ont provoqué la formation de givre sur les transducteurs de nos capteurs. Cette formation a pu modifier le fonctionnement des émetteurs et des récepteurs, entraînant les résultats obtenus précédemment.

Ce résultat est intéressant, car il nous avait déjà été évoqué comme une possibilité par un de nos suiveurs de projet Planète-Sciences, et il permet de montrer un des dysfonctionnements potentiels que pourraient rencontrer des anémomètres ultrasoniques face à des conditions humides puis froides.

Comme il semble que le problème ne se soit pas posé pour le test financé par la NASA, on peut aussi se demander quelles solutions ont été trouvées afin de l'éviter.

Dernier résultat intéressant, malgré le fait que les mesures de vents ne soient plus plausibles lorsque la nacelle atteint la stratosphère, on observe que les mesures sur 3 capteurs deviennent toutes beaucoup moins bruitées et stables de 13 à 22 km environ, jusqu'à l'éclatement du ballon. Cet éclatement semble d'ailleurs nettement visible à 16h18.



*Variation des temps de parcours des différents capteurs en microsecondes, au cours du temps en heures, dans la stratosphère.*

Afin de vérifier la cause du dysfonctionnement de nos capteurs, il serait intéressant de tester ceux-ci dans des conditions analogues au sol. On pourrait par exemple les mettre à fonctionner dans un congélateur après exposition à un brumisateurs.



## 9. Conseils pour l'avenir

### a. Le rover et la nacelle

Comme nous l'avons évoqué précédemment, le rover n'a pas pu voler durant le C'space 2017. Ceci est dû à un manque de masse disponible ( le cahier des charges limitant la masse totale de la nacelle à 2,5 kg ). La masse avait bien sûr été estimée avant la semaine du C'space, mais notre choix de piles était mauvais.

En effet, nous avons prévu notre nacelle avec des piles 9V, mais celles-ci n'auraient pas suffi pour la totalité du vol. En effet, bien que les piles plates 4,5V ne soient que « recommandées » par le cahier des charges, seules celles-ci ont passé les tests de tenue *en milieu réfrigéré* pendant le temps d'un vol. Les résultats de ces tests sont d'ailleurs dans le manuel du Kiwi Millenium de Planète-Sciences.

Les quatre piles 4,5V que nous avons utilisées pesaient à elles-seules 700g, alors que nous estimions la masse de piles totale inférieure à 300g.

Nous conseillons donc aux projets de ballon des années à venir de réaliser des estimations de masse de leurs nacelles avec des piles plates 4,5V de la marque Duracell, comme recommandé par le cahier des charges Planète-Sciences.

Pour ce qui est du rover, d'autres tests et d'autres utilisations sont prévues, afin de voir le travail d'une année aboutir sur cette partie du projet.

### b. Le ballon captif

Pour le test de notre nacelle en ballon captif, l'ESO a investi dans un ballon en PVC de 2 m de diamètre, réutilisable. Seule une légère fuite est à déplorer, qui a été temporairement colmatée avec de l'adhésif, et qui sera réparée avec une rustine.

Le gonflage du ballon n'a pas posé de difficultés, et celui-ci a été capable de soulever les 1,9 kg de la nacelle. Il serait donc capable, les années suivantes, de servir à tester des projets ou des morceaux de projets de l'ESO avant le C'space.

Météo France à Trappes serait d'ailleurs d'accord pour prêter son terrain à l'association pour ces tests, à condition de prévenir suffisamment à l'avance.

Nous recommandons aussi de contacter la police de l'air des Yvelines avant les vols, car ils nous ont aiguillé sur les réglementations, et ont répondu à nos demandes en quelques jours.

Le stockage des bouteilles d'hélium à l'ESTACA est tout à fait possible, grâce à un local prévu à cet effet. Il suffit de contacter le poste de garde et le directeur de l'établissement au préalable.



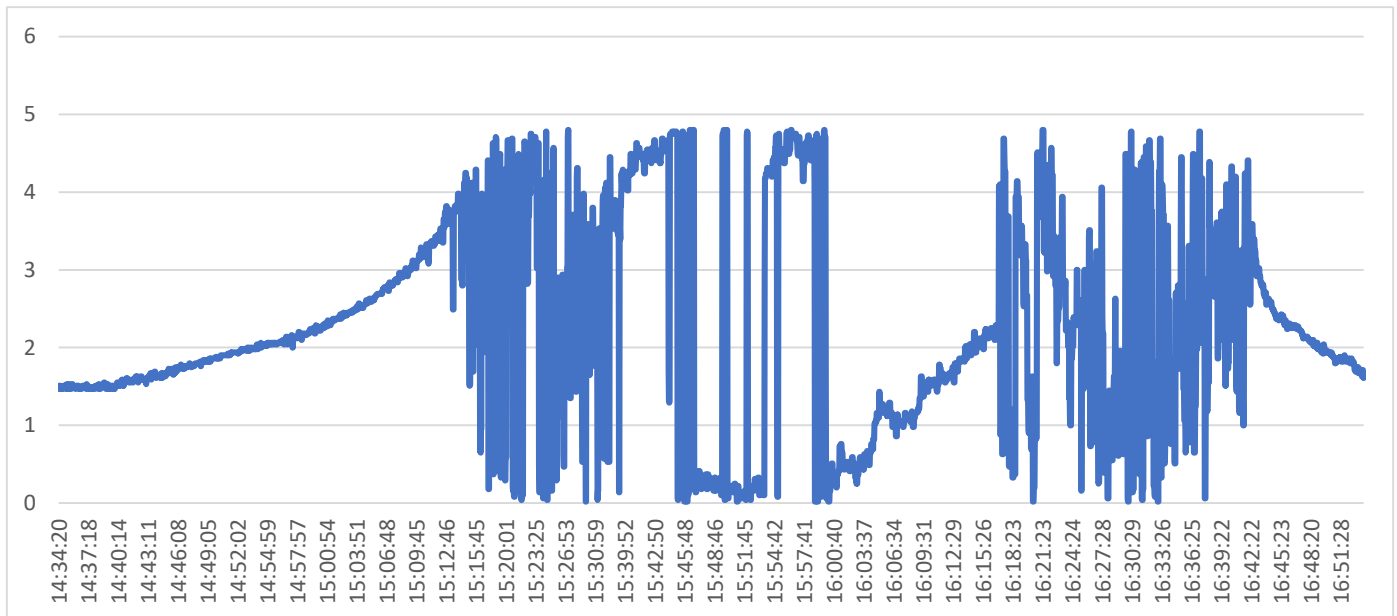
L'entreprise Air Products, basée à Maurepas, a aussi été d'une grande aide en nous fournissant une bouteille d'hélium pour ce test.

### c. La télémétrie

Comme nous l'avons vu précédemment, le contact radio avec la nacelle a pu être maintenu durant tout le vol, et les résultats obtenus sont plutôt bons comparés à ceux enregistrés dans la nacelle.

Cependant, il est à noter que nous avons sous-estimé la plage de mesure en temps des capteurs de l'anémomètre, car les dysfonctionnements ont provoqué des dépassements. Nous prévoyions en effet une plage de 1000 à 6000 microsecondes.

Voici par exemple ce que donne la courbe du capteur 2 de l'anémomètre (celui qui a dysfonctionné le plus tard) d'après les données issues de la télémétrie :

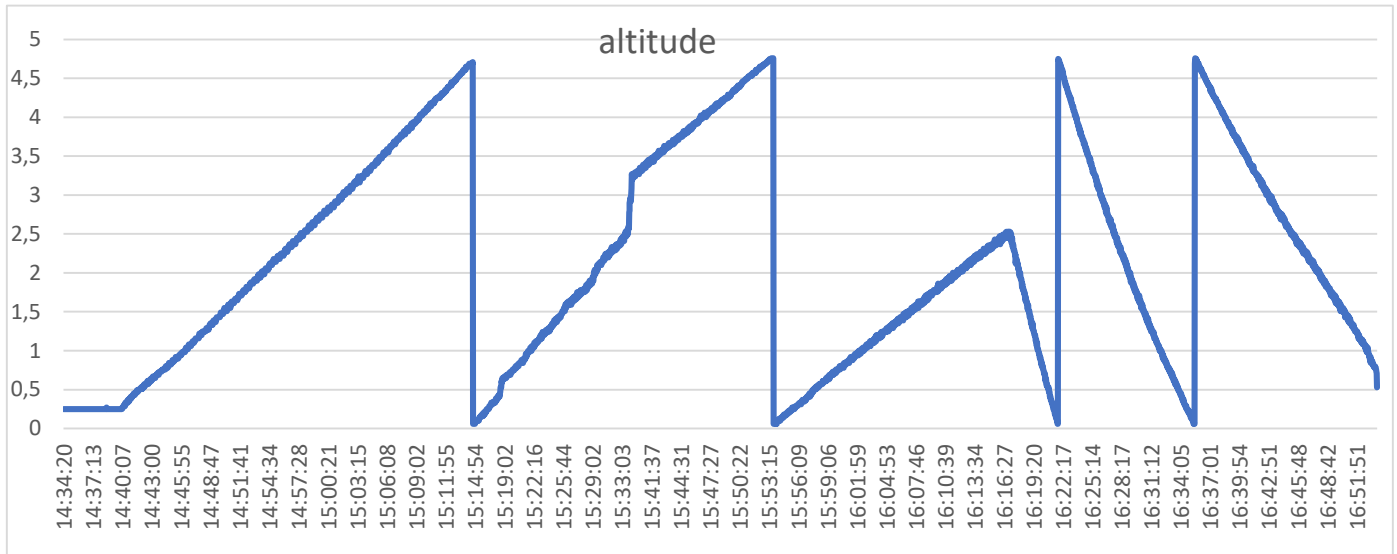


*Données issues de la télémétrie pour le capteur 2 (tensions en Volt).*

On observe comme on s'y attendait que la valeur augmente doucement jusqu'au dysfonctionnement vers 15h12. On observe aussi la stabilisation des valeurs dans la stratosphère, avant un retour dans une phase plus violente à l'éclatement du ballon, vers 16h18.

Pour la courbe d'altitude, nous avons encodé sur une plage allant jusqu'à 9000 m, puisqu'il s'agissait de la hauteur de fonctionnement nominal. Nous obtenons donc des valeurs modulo 9000 m sur notre courbe :

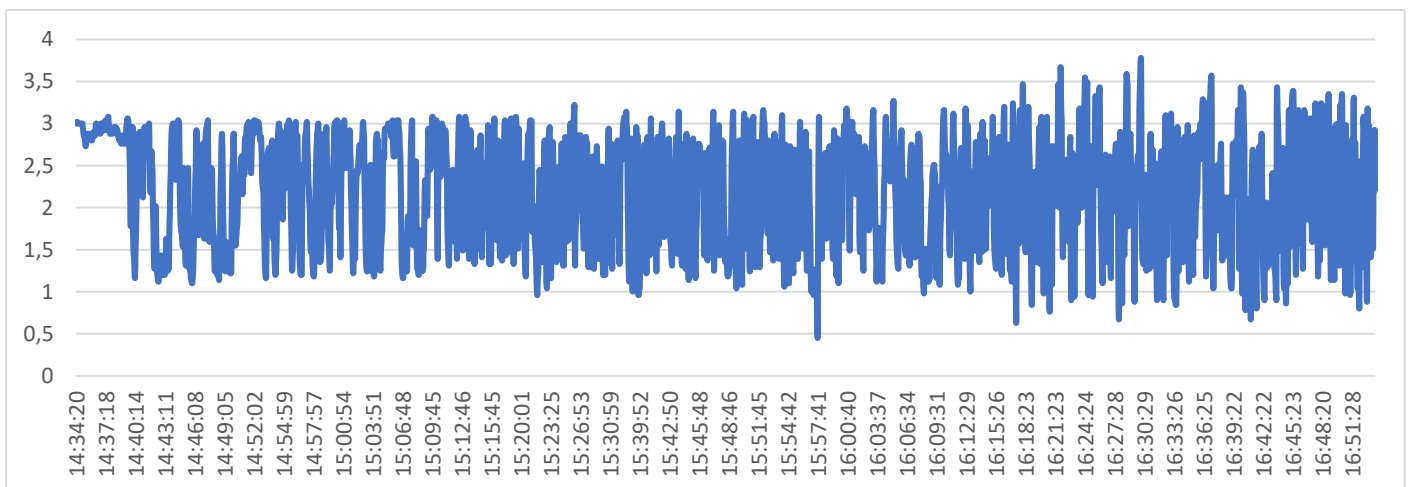




*Données d'altitude réceptionnées par télémétrie en (tension en Volt).*

Malgré le fait que ces données soit modulo 9000 m, on devine facilement la courbe d'altitude vue précédemment, puisque les variations sont relativement simples. On peut d'ailleurs observer que l'apogée se trouve bien à 16h18, à une altitude de 22 740 m environ. Il y a juste quelques petites erreurs de transmission entre 15h15 et 15h40.

Pour ce qui est des données du magnétomètre, on reconnaît bien la courbe d'un des axes (en vert sur la courbe de la partie précédente) :



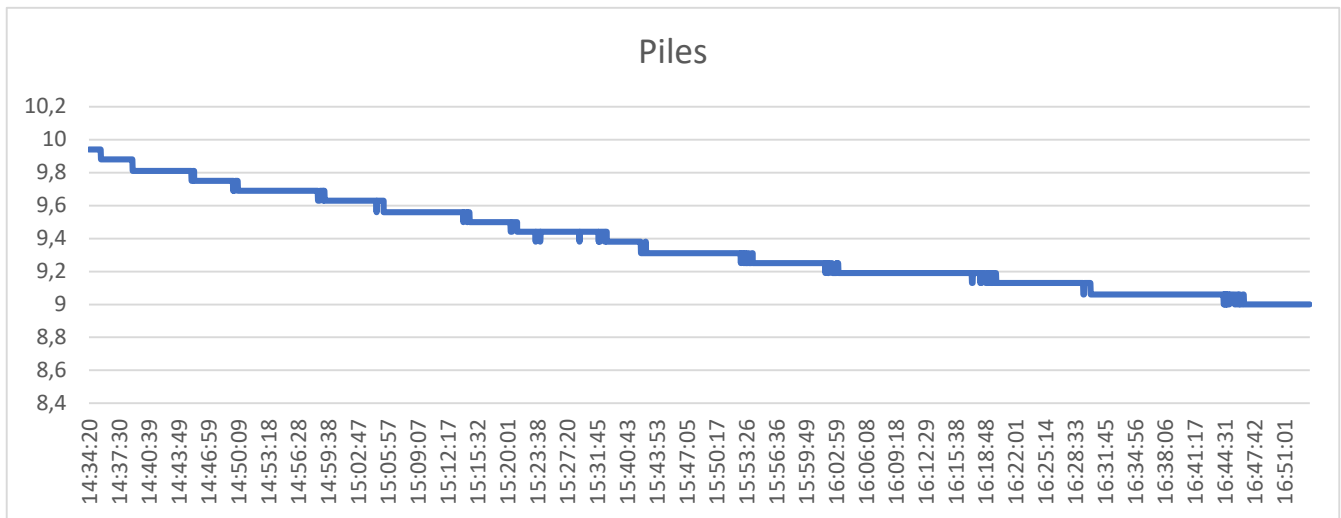
*Données de l'axe y du magnétomètre réceptionnées par télémétrie (en Volt).*

On reconnaît ici aussi très bien l'instant de décollage à 14h40, ainsi que l'instant d'éclatement du ballon à 16h18.

En conclusion, sauf quelques erreurs de réception, le système choisi pour envoyer les données par télémétrie a bien fonctionné, et pourrait être réemployé par d'autres projets les années suivantes.



Une dernière mesure, réalisée par la carte Kiwi et transmise par télémétrie, est la tension des piles à ses bornes. La voici, mise sous forme de courbe, confirmant que la chute de tension lors du vol est restée très faible :



*Tension aux bornes des piles de la télémétrie, mesurée par la carte Kiwi.*



## 10. Annexes

Photographies prises durant le vol :





## Programme arduino de l'anémomètre :

```
#include <SPI.h>
```



```

#include <SD.h>
#include <Wire.h>

#define magneto 0x1E
#define trigPin 2
#define echoPin 5
#define trigPin2 3
#define echoPin2 6
#define trigPin3 7
#define echoPin3 9
#define trigPin4 A1
#define echoPin4 A0

unsigned long t; // Initialiser le temps.
int alti1024;
float altim;

File myFile;
File myFile2;

void setup() {

  Wire.begin();
  //Put the HMC5883 IC into the correct operating mode
  Wire.beginTransmission(magneto); //open communication with HMC5883
  Wire.write(0x02); //select mode register
  Wire.write(0x00); //continuous measurement mode
  Wire.endTransmission();

  pinMode(trigPin, OUTPUT);
  pinMode(echoPin, INPUT);
  pinMode(trigPin2, OUTPUT);
  pinMode(echoPin2, INPUT);
  pinMode(trigPin3, OUTPUT);

```



```

pinMode(echoPin3, INPUT);
pinMode(trigPin4, OUTPUT);
pinMode(echoPin4, INPUT);
pinMode(A3, INPUT);

//Ouvrir le fichier texte :
SD.begin(4);
myFile = SD.open("DATA.txt", FILE_WRITE);
myFile.println("Debut acquisition :");
myFile.close();

//Second fichier de secours :
myFile2 = SD.open("DATA2.txt", FILE_WRITE);
myFile2.println("Debut acquisition :");
myFile2.close();

//Mesure temps :
t = millis();
Serial.begin(9600);
}

void loop() {
t = millis();
alti1024 = analogRead(A3);
altim = alti1024*8.789;

float duration1, duration2, duration3, duration4;
float vit, cel;
float Som = 0;
float Som2 = 0;
float Som3 = 0;
float Som4 = 0;
int S = 0;

```



// Moyenne sur 20 valeurs :

```

for (int i = 0; i < 20; i++) {
  digitalWrite(trigPin, HIGH);
  // delayMicroseconds(1000); - Removed this line
  delayMicroseconds(10); // Added this line
  digitalWrite(trigPin, LOW);
  duration1 = pulseIn(echoPin, HIGH);
  delay(10);

  digitalWrite(trigPin2, HIGH);
  // delayMicroseconds(1000); - Removed this line
  delayMicroseconds(10); // Added this line
  digitalWrite(trigPin2, LOW);
  duration2 = pulseIn(echoPin2, HIGH);
  delay(10);

  digitalWrite(trigPin3, HIGH);
  // delayMicroseconds(1000); - Removed this line
  delayMicroseconds(10); // Added this line
  digitalWrite(trigPin3, LOW);
  duration3 = pulseIn(echoPin3, HIGH);
  delay(10);

  digitalWrite(trigPin4, HIGH);
  // delayMicroseconds(1000); - Removed this line
  delayMicroseconds(10); // Added this line
  digitalWrite(trigPin4, LOW);
  duration4 = pulseIn(echoPin4, HIGH);
  delay(10);

  Som = Som + duration1;
  Som2 = Som2 + duration2;
  Som3 = Som3 + duration3;

```



```
Som4 = Som4 + duration4;
```

```
delay(100);
```

```
}
```

```
Som = Som / 20;
```

```
Som2 = Som2 / 20;
```

```
Som3 = Som3 / 20;
```

```
Som4 = Som4 / 20;
```

```
//Compass :
```

```
int x, y, z; //triple axis data
```

```
//Tell the HMC5883L where to begin reading data
```

```
Wire.beginTransmission(magneto);
```

```
Wire.write(0x03); //select register 3, X MSB register
```

```
Wire.endTransmission();
```

```
//Read data from each axis, 2 registers per axis
```

```
Wire.requestFrom(magneto, 6);
```

```
if (6 <= Wire.available()) {
```

```
  x = Wire.read() << 8; //X msb
```

```
  x |= Wire.read(); //X lsb
```

```
  z = Wire.read() << 8; //Z msb
```

```
  z |= Wire.read(); //Z lsb
```

```
  y = Wire.read() << 8; //Y msb
```

```
  y |= Wire.read(); //Y lsb
```

```
}
```

```
//Ecriture sur 2 fichiers :
```

```
myFile = SD.open("DATA.txt", FILE_WRITE);
```

```
myFile.println(Som);
```

```
myFile.println(Som2);
```

```
myFile.println(Som3);
```





```
myFile.println(Som4);
myFile.println(x);
myFile.println(y);
myFile.println(z);
myFile.println(t);
myFile.println(altim);
myFile.close();
```

```
myFile = SD.open("DATA2.txt", FILE_WRITE);
myFile.println(Som);
myFile.println(Som2);
myFile.println(Som3);
myFile.println(Som4);
myFile.println(x);
myFile.println(y);
myFile.println(z);
myFile.println(t);
myFile.println(altim);
myFile.close();
```

//Transmission à la telem :

```
Serial.println(1);
delay(100);
Som = Som - 1000;
Som = Som*0.425;
S = (int) Som;
Serial.println(S);
delay(100);
```

```
Serial.println(2);
delay(100);
Som2 = Som2 - 1000;
Som2 = Som2*0.425;
S = (int) Som2;
```



```
Serial.println(S);  
delay(100);
```

```
Serial.println(3);  
delay(100);  
Som3 = Som3 - 1000;  
Som3 = Som3*0.425;  
S = (int) Som3;  
Serial.println(S);  
delay(100);
```

```
Serial.println(4);  
delay(100);  
Som4 = Som4 - 1000;  
Som4 = Som4*0.425;  
S = (int) Som4;  
Serial.println(S);  
delay(100);
```

```
Serial.println(5);  
delay(100);  
x = x + 768;  
x = x*0.166;  
Serial.println(x);  
delay(100);
```

```
Serial.println(6);  
delay(100);  
y = y + 768;  
y = y*0.166;  
Serial.println(y);  
delay(100);
```

```
delay(1000);
```



```
}
```

## Programme arduino de la télémétrie :

```
int incomingByte = 0; // for incoming serial data

int data = 1;

int mes = 0;

int mes2 = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600); // opens serial port, sets data rate to 9600 bps
  TCCR1B = (TCCR1B & 0b11111000) | 0x01;
  TCCR2B = (TCCR2B & 0b11111000) | 0x01;
  pinMode(3,OUTPUT);
  pinMode(5,OUTPUT);
  pinMode(6,OUTPUT);
  pinMode(9,OUTPUT);
  pinMode(10,OUTPUT);
  pinMode(11,OUTPUT);
  analogWrite(3,mes);
  analogWrite(5,mes);
  analogWrite(6,mes);
  analogWrite(9,mes);
  analogWrite(10,mes);
  analogWrite(11,mes);
}

void loop() {
  // send data only when you receive data:
  if ((Serial.available() > 0)&&(mes==0)) {
    // read the incoming byte:
    mes = Serial.parseInt();

    if (mes==1) {
```



```

        data = 3;
    }
    if (mes==2) {
        data = 5;
    }
    if (mes==3) {
        data = 6;
    }
    if (mes==4) {
        data = 9;
    }
    if (mes==5) {
        data = 10;
    }
    if (mes==6) {
        data = 11;
    }
}

    if ((Serial.available() > 0)&&(mes>0)) {
// read the incoming byte:

        mes2 = Serial.parseInt();
        analogWrite(data,mes2);
        mes = 0;
    }
}

```

## Programme arduino pour un BMP180 ou BMP085 :

```
#define BMP085_ADDRESS 0x77 // I2C address of BMP085
```

```
// Inclure les bibliothèques utiles :
```

```
#include<Wire.h>
```

```
#include <SPI.h>
```



```

const int MPU_addr=0x68; // I2C adresse du MPU-6050.

int16_t AcX,AcY,AcZ,Tmp,GyX,GyY,GyZ; // Création des variables.

// Var "perte d'altitude" :

int etat = 0;

// On définit les variables :

const float p0 = 101325; // Pressure at sea level (Pa)

float altitude;

float altitude2;

float altitude3;

float altitude4;

float altitude5;

float Moy = 0;

float Moy2 = 0;

float Moy3 = 0;

float Moy4 = 0;

float Alti = 0;

float Sol;

float altmax = 0;

// Les fonctions de lecture de la pression et conversion

// en altitude :

// Read 1 byte from the BMP085 at 'address'

char bmp085Read(unsigned char address)

{

    unsigned char data;

    Wire.beginTransmission(BMP085_ADDRESS);

    Wire.write(address);

```



```

Wire.endTransmission();

Wire.requestFrom(BMP085_ADDRESS, 1);
while(!Wire.available())
;

return Wire.read();
}

// Read 2 bytes from the BMP085
// First byte will be from 'address'
// Second byte will be from 'address'+1
int bmp085ReadInt(unsigned char address)
{
    unsigned char msb, lsb;

    Wire.beginTransmission(BMP085_ADDRESS);
    Wire.write(address);
    Wire.endTransmission();

    Wire.requestFrom(BMP085_ADDRESS, 2);
    while(Wire.available()<2)
;
    msb = Wire.read();
    lsb = Wire.read();

    return (int) msb<<8 | lsb;
}

const unsigned char OSS = 0; // Oversampling Setting

// Calibration values
int ac1;
int ac2;

```



```

int ac3;

unsigned int ac4;

unsigned int ac5;

unsigned int ac6;

int b1;

int b2;

int mb;

int mc;

int md;

// b5 is calculated in bmp085GetTemperature(...), this variable is also used in bmp085GetPressure(...)
// so ...Temperature(...) must be called before ...Pressure(...).

long b5;

long pressure;

short temperature;

void bmp085Calibration()
{
    ac1 = bmp085ReadInt(0xAA);
    ac2 = bmp085ReadInt(0xAC);
    ac3 = bmp085ReadInt(0xAE);
    ac4 = bmp085ReadInt(0xB0);
    ac5 = bmp085ReadInt(0xB2);
    ac6 = bmp085ReadInt(0xB4);
    b1 = bmp085ReadInt(0xB6);
    b2 = bmp085ReadInt(0xB8);
    mb = bmp085ReadInt(0xBA);
    mc = bmp085ReadInt(0xBC);
    md = bmp085ReadInt(0xBE);
}

// Read the uncompensated temperature value
unsigned int bmp085ReadUT()
{

```



unsigned int ut;

```
// Write 0x2E into Register 0xF4
```

```
// This requests a temperature reading
```

```
Wire.beginTransmission(BMP085_ADDRESS);
```

```
Wire.write(0xF4);
```

```
Wire.write(0x2E);
```

```
Wire.endTransmission();
```

```
// Wait at least 4.5ms
```

```
delay(5);
```

```
// Read two bytes from registers 0xF6 and 0xF7
```

```
ut = bmp085ReadInt(0xF6);
```

```
return ut;
```

```
}
```

```
// Read the uncompensated pressure value
```

```
unsigned long bmp085ReadUP()
```

```
{
```

```
    unsigned char msb, lsb, xlsb;
```

```
    unsigned long up = 0;
```

```
    // Write 0x34+(OSS<<6) into register 0xF4
```

```
    // Request a pressure reading w/ oversampling setting
```

```
Wire.beginTransmission(BMP085_ADDRESS);
```

```
Wire.write(0xF4);
```

```
Wire.write(0x34 + (OSS<<6));
```

```
Wire.endTransmission();
```

```
// Wait for conversion, delay time dependent on OSS
```

```
delay(2 + (3<<OSS));
```

```
// Read register 0xF6 (MSB), 0xF7 (LSB), and 0xF8 (XLSB)
```





```

Wire.beginTransmission(BMP085_ADDRESS);

Wire.write(0xF6);

Wire.endTransmission();

Wire.requestFrom(BMP085_ADDRESS, 3);

// Wait for data to become available
while(Wire.available() < 3)
;

msb = Wire.read();

lsb = Wire.read();

xlsb = Wire.read();

up = (((unsigned long) msb << 16) | ((unsigned long) lsb << 8) | (unsigned long) xlsb) >> (8-OSS);

return up;
}

// Calculate temperature given ut.
// Value returned will be in units of 0.1 deg C
short bmp085GetTemperature(unsigned int ut)
{
    long x1, x2;

    x1 = (((long)ut - (long)ac6)*(long)ac5) >> 15;
    x2 = ((long)mc << 11)/(x1 + md);
    b5 = x1 + x2;

    return ((b5 + 8)>>4);
}

// Calculate pressure given up
// calibration values must be known
// b5 is also required so bmp085GetTemperature(...) must be called first.
// Value returned will be pressure in units of Pa.

```



```

long bmp085GetPressure(unsigned long up)
{
    long x1, x2, x3, b3, b6, p;
    unsigned long b4, b7;

    b6 = b5 - 4000;
    // Calculate B3
    x1 = (b2 * (b6 * b6)>>12)>>11;
    x2 = (ac2 * b6)>>11;
    x3 = x1 + x2;
    b3 = (((((long)ac1)*4 + x3)<<OSS) + 2)>>2;

    // Calculate B4
    x1 = (ac3 * b6)>>13;
    x2 = (b1 * ((b6 * b6)>>12))>>16;
    x3 = ((x1 + x2) + 2)>>2;
    b4 = (ac4 * (unsigned long)(x3 + 32768))>>15;

    b7 = ((unsigned long)(up - b3) * (50000>>OSS));
    if (b7 < 0x80000000)
        p = (b7<<1)/b4;
    else
        p = (b7/b4)<<1;

    x1 = (p>>8) * (p>>8);
    x1 = (x1 * 3038)>>16;
    x2 = (-7357 * p)>>16;
    p += (x1 + x2 + 3791)>>4;

    return p;
}

// Fonction setup (ne se déclenche qu'une fois, au démarrage) :

```



```

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  //Par sécurité, on annule la tension au ports 7 et 8 (qu'on utilisera
  // pour le déclenchement).
  pinMode(7,OUTPUT);
  analogWrite(7,0);
  pinMode(8,OUTPUT);
  analogWrite(8,0);

  // On utilise la fonction de calibration et les fonctions de lecture pour
  //lire la valeur de la pression au sol (tu peux l'utiliser si besoin).
  Wire.begin();
  bmp085Calibration();

  temperature = bmp085GetTemperature(bmp085ReadUT());
  pressure = bmp085GetPressure(bmp085ReadUP());
  // Add this into loop(), after you've calculated the pressure
  altitude = (float)44330 * (1 - pow(((float) pressure/p0), 0.190295));
  delay(10);

  temperature = bmp085GetTemperature(bmp085ReadUT());
  pressure = bmp085GetPressure(bmp085ReadUP());
  // Add this into loop(), after you've calculated the pressure
  altitude2 = (float)44330 * (1 - pow(((float) pressure/p0), 0.190295));
  delay(10);

  temperature = bmp085GetTemperature(bmp085ReadUT());
  pressure = bmp085GetPressure(bmp085ReadUP());
  // Add this into loop(), after you've calculated the pressure
  altitude3 = (float)44330 * (1 - pow(((float) pressure/p0), 0.190295));
  delay(10);

```



```

temperature = bmp085GetTemperature(bmp085ReadUT());
pressure = bmp085GetPressure(bmp085ReadUP());
// Add this into loop(), after you've calculated the pressure
altitude4 = (float)44330 * (1 - pow(((float) pressure/p0), 0.190295));
delay(10);

temperature = bmp085GetTemperature(bmp085ReadUT());
pressure = bmp085GetPressure(bmp085ReadUP());
// Add this into loop(), after you've calculated the pressure
altitude5 = (float)44330 * (1 - pow(((float) pressure/p0), 0.190295));
delay(10);

// Valeur moyenne de la pression au sol :
Sol = (altitude + altitude2 + altitude3 + altitude4 + altitude5)/5;
}

// Fonction loop, qui va s'executer en boucle tout au long du vol :

void loop()
{
//Lecture de la pression et moyenne sur 5 valeurs :

temperature = bmp085GetTemperature(bmp085ReadUT());
pressure = bmp085GetPressure(bmp085ReadUP());
// Add this into loop(), after you've calculated the pressure
altitude = (float)44330 * (1 - pow(((float) pressure/p0), 0.190295));
delay(10);

temperature = bmp085GetTemperature(bmp085ReadUT());
pressure = bmp085GetPressure(bmp085ReadUP());
// Add this into loop(), after you've calculated the pressure
altitude2 = (float)44330 * (1 - pow(((float) pressure/p0), 0.190295));
delay(10);

```



```

temperature = bmp085GetTemperature(bmp085ReadUT());
pressure = bmp085GetPressure(bmp085ReadUP());
// Add this into loop(), after you've calculated the pressure
altitude3 = (float)44330 * (1 - pow(((float) pressure/p0), 0.190295));
delay(10);

temperature = bmp085GetTemperature(bmp085ReadUT());
pressure = bmp085GetPressure(bmp085ReadUP());
// Add this into loop(), after you've calculated the pressure
altitude4 = (float)44330 * (1 - pow(((float) pressure/p0), 0.190295));
delay(10);

temperature = bmp085GetTemperature(bmp085ReadUT());
pressure = bmp085GetPressure(bmp085ReadUP());
// Add this into loop(), after you've calculated the pressure
altitude5 = (float)44330 * (1 - pow(((float) pressure/p0), 0.190295));
delay(10);

// Moyenne des 5 valeurs mesurées :
Moy4 = Moy3;
Moy3 = Moy2;
Moy2 = Moy;
Moy = (altitude + altitude2 + altitude3 + altitude4 + altitude5)/5;

// Moyenne glissante sur 20 valeurs avec 4 fois 5 valeurs :
Alti = (Moy + Moy2 + Moy3 + Moy4)/4;
// C'est cette valeur d'altitude que tu peux récupérer comme la mesure d'altitude
// de la nacelle.
Serial.println(Alti);
}

```