

COMPTE-RENDU BALLON STRATOSPHERIQUE MOUISOSCOPE

Version 2.1 du 24/12/2005
Rédaction : Florent Bouchoux et Xavier Jean

Sommaire

Présentation du projet
Présentation de l'équipe – Furobalex

Expériences

- *Photos*
- *GPS*
- *Température*
- *Pression*
- *Luminosité*
- *Condensation*

Electronique
Informatique embarquée
Informatique
Mécanique

Le lâcher
On l'a retrouvé !

Analyse des résultats
Analyse des problèmes

Prix Espace et Industrie 2005
Conclusion
Perspectives d'avenir



Présentation du projet

Le projet Mouisoscope est un ballon-sonde réalisé par l'équipe ballon du séjour de vacances Furobalex, organisé par l'association Planète Sciences.

Bien que conçu en seulement 3 semaines, il embarquait les 6 expériences suivantes :

- **Photographies** de l'horizon pendant tout le vol ;
- Un **GPS** afin de connaître la position, l'altitude, la vitesse et la direction du ballon ;
- Une mesure de **pression** ;
- Trois mesures de **température** – dans la nacelle, dans les matériaux de celle-ci et à l'extérieur ;
- Deux mesures de **luminosité** ambiante ;
- Un détecteur de **condensation** à l'intérieur de la nacelle.

Mise à part l'expérience de photographie, toutes les mesures sont retransmises au sol en temps réel grâce à un système de télémétrie radio.

Le ballon a été lâché le vendredi 29 juillet à 16h15, lors la campagne de lancements de La Courtine.

Présentation de l'équipe – Furobalex

Depuis une trentaine d'années, l'association Planète Sciences organise des séjours de vacances scientifiques qui allient sciences et détente, et permettent à de jeunes passionnés de concevoir des projets allant de la micro-fusée à la fusée expérimentale, en passant par les robots, l'astronomie ou l'environnement.

Existant depuis 15 ans, le séjour de vacances Furobalex est organisé à destination des 15-18 ans.

Se déroulant généralement pendant le mois de juillet durant 3 semaines – dont une sur la campagne nationale de lancements – il permet à une trentaine de jeunes de réaliser par équipe un projet de leur choix, à savoir :

- **Robots**, afin de tester les règlements des coupes de robotiques E=M6 et Eurobot ;
- **Fusées expérimentales** lancées sur la campagne nationale à la fin du séjour ;
- **Ballons-sonde** lâchés également lors de la campagne de lancements.

La complexité des projets varie évidemment en fonction des connaissances techniques des équipes et de l'âge des membres. Toutefois, grâce à un encadrement assuré par des animateurs spécialement formés, il est possible à tout un chacun de réaliser un projet, même sans aucune expérience : c'est l'occasion d'apprendre !

Le projet Mouisoscope a donc été réalisé en seulement 3 semaines, pendant l'été ; par 4 jeunes du séjour de vacances. Mis à part le module GPS et l'émetteur KIWI Millénium, l'équipe a conçu elle-même la mécanique de la nacelle, l'électronique, l'informatique de réception et le logiciel embarqué.



L'équipe de Mouisoscope lors du lâcher.

De gauche à droite :

- **Luc Fontaine** : informatique embarquée ;
- **Xavier Jean** : électronique ;
- **Florent Bouchoux** : électronique, informatique et logiciel embarqué ;
- **Guillaume Joslin** : mécanique.

Expériences

Photos

Ce module est constitué par un appareil photo argentique déclenché de manière électronique par le microcontrôleur central, via un CD 4066.

Ce déclenchement se produit toutes les 4 minutes à partir du moment où le vol a démarré. Ainsi, avec une pellicule de 36 poses, on dispose de 2h30 de photos ; soit à peu près la durée du vol en considérant une vitesse de montée de 5 m/s et une vitesse moyenne de descente de 12 m/s.

Par ailleurs, le nombre de photos prises est retransmis par télémétrie de manière à connaître précisément l'altitude, la localisation ainsi que l'orientation de la nacelle lors du déclenchement de l'appareil photo.

GPS

Mouisoscope utilise un GPS Motorola Oncore UT+ et une antenne active située au dessus de la nacelle, accrochée à la chaîne de vol.

Ce GPS n'est pas bridé en altitude, ce qui permet d'obtenir des mesures correctes au dessus de 18km d'altitude.

Le ballon retransmet les paramètres suivants :

- **Latitude, longitude et altitude** GPS : ces 3 données permettent de situer précisément le ballon ;
- Le **cap vrai** afin de déterminer la direction du vent en fonction de l'altitude et donc en fonction des différentes couches traversées ;
- La **vitesse** totale ;
- Le **nombre de satellites visibles** afin de savoir s'il existe des différences de visibilité importantes entre le sol et la haute atmosphère ;
- Le **nombre de satellites utilisés** ;
- L'**état** du récepteur GPS.

Température

Les capteurs utilisés sont des thermistances CTN de précision de petite taille.

Contre toute attente, leur précision est excellente et leur seul inconvénient est leur éventuel auto-échauffement en atmosphère raréfiée.

Trois capteurs permettent de connaître :

- **la température extérieure de la nacelle à l'ombre** : le capteur est placé sous la nacelle, dans une cavité évitant qu'il ne puisse être atteint directement par les rayons du soleil.
- **la température de la nacelle** : le capteur est intégré dans le polystyrène de la nacelle afin de connaître l'échauffement des structures qui la constituent, de manière à connaître l'influence des rayons solaires sur l'échauffement des structures de la nacelle par rapport au sol, puisque l'intensité des radiations est plus importante et l'air, permettant une dissipation de la chaleur, moins présent.
- **la température intérieure** : cela permet de déterminer la température moyenne régnant globalement à l'intérieur de la nacelle. On peut ainsi connaître les facultés d'isolation thermique pour une nacelle moyenne, en présence de pressions très faibles et de rayonnement solaire intense, avec une température de -50°. Le capteur est placé sur le circuit principal, la température intérieure est donc la température régnant près de l'électronique.

La mesure de la température se fait à l'aide d'un pont diviseur délivrant une tension de sortie à peu près proportionnelle à la température ; ceci de -60°C jusqu'à +60°C.

La non-linéarité de cette tension est bien entendu prise en compte par le logiciel de réception et de décodage.

Pression

Cette expérience utilise un capteur de pression industriel, le MPX 2100 de Motorola.

Celui-ci permet la mesure de pressions absolues allant de 1050hPa jusqu'à 0hPa, tout en délivrant une tension de sortie différentielle proportionnelle à la pression ambiante. Cette tension est mise en forme par un amplificateur de mesure avant d'être convertie en numérique sur 10 bits pour être émise par télémesure. Au sol, le logiciel est capable de calculer en temps réel la pression et l'altitude correspondante, avec une compensation des dérives – offset et gain – de l'amplificateur de mesure.

Des tests ayant montré une grande vulnérabilité du capteur aux parasites EMI, tout le module – y compris le capteur de pression – a été placé dans un blindage sur le circuit principal ; avec plusieurs condensateurs de découplage et des filtres passe-bas.

Cette expérience permet d'une part de calculer l'altitude approximative à l'aide de la table d'atmosphère standard par connaissance de la pression, mais surtout permet l'établissement d'une table de correspondance altitude – pression fiable et basée sur des données réelles, ici l'altitude fournie par le GPS.

Luminosité

Cette expérience vise à mesurer la différence de luminosité et de contraste entre le sol et la haute altitude.

Ce module est basé sur deux photorésistances placées à l'extérieur sur deux côtés opposés de la nacelle.

La luminosité de chaque photorésistance, exprimée en unités arbitraires (UA), est envoyée par télémesure toutes les 3 secondes. Cette faible fréquence d'échantillonnage au vu de la rotation possible de la nacelle oblige à utiliser un moyennage et à relativiser les résultats de mesure.

Condensation

Cette expérience ne permet pas d'obtenir des résultats analogiques, mais simplement de mesurer une présence / absence de condensation. Il s'agit donc à proprement parler d'un détecteur de condensation.

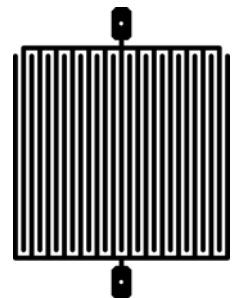
Le but de l'expérience est de déterminer si, au cours du vol, de la condensation se forme à l'intérieur de la nacelle. En effet, bien que les circuits électroniques soient conçus pour être le plus résistants possible, ils ne sont pas conçus pour faire face à un dépôt humide. Ainsi, s'il s'avère que de la condensation s'est formée – ce qui se produit lors des tests thermiques froid / chaud -, il faudra, à l'avenir, prendre plus de précautions sur ce point.

De plus, cette expérience permet d'expliquer la formation d'une éventuelle couche de givre sur la vitre du module photo, et peut permettre de montrer l'utilité ou l'inutilité du papier alu pour empêcher la condensation dans la nacelle.

Le capteur de condensation en lui-même est un simple circuit imprimé dont les pistes – suffisamment proches – sont reliées si de l'eau s'y dépose.

Un circuit de traitement mesure l'impédance du capteur et déduit la présence ou non de condensation, en fonction d'un seuil préalablement fixé à un dépôt léger mais visible de condensation.

Ce détecteur est bien entendu placé à l'intérieur de la nacelle – sur le circuit principal – puisque c'est le seul endroit où le dépôt d'eau est possible – les températures à l'extérieur de la nacelle étant trop basses pour que l'eau soit liquide.

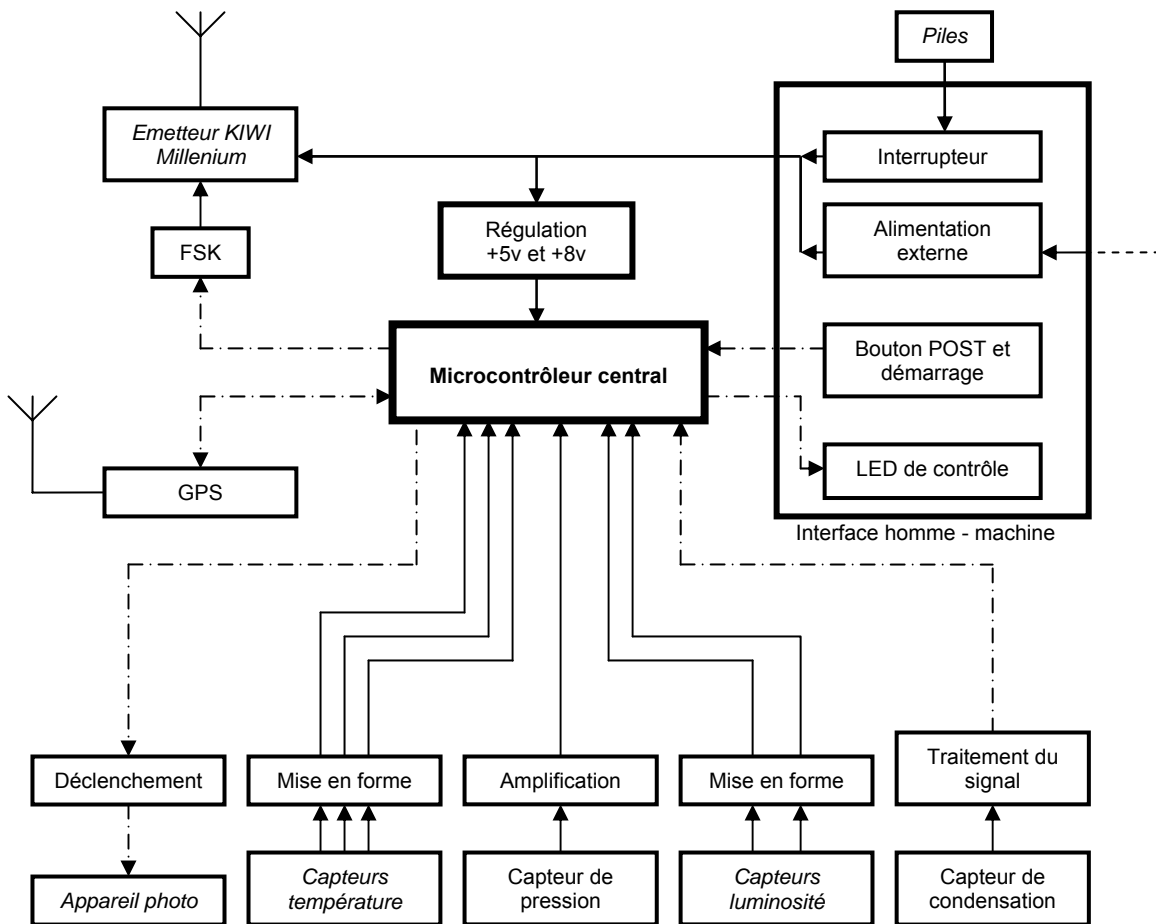


Electronique

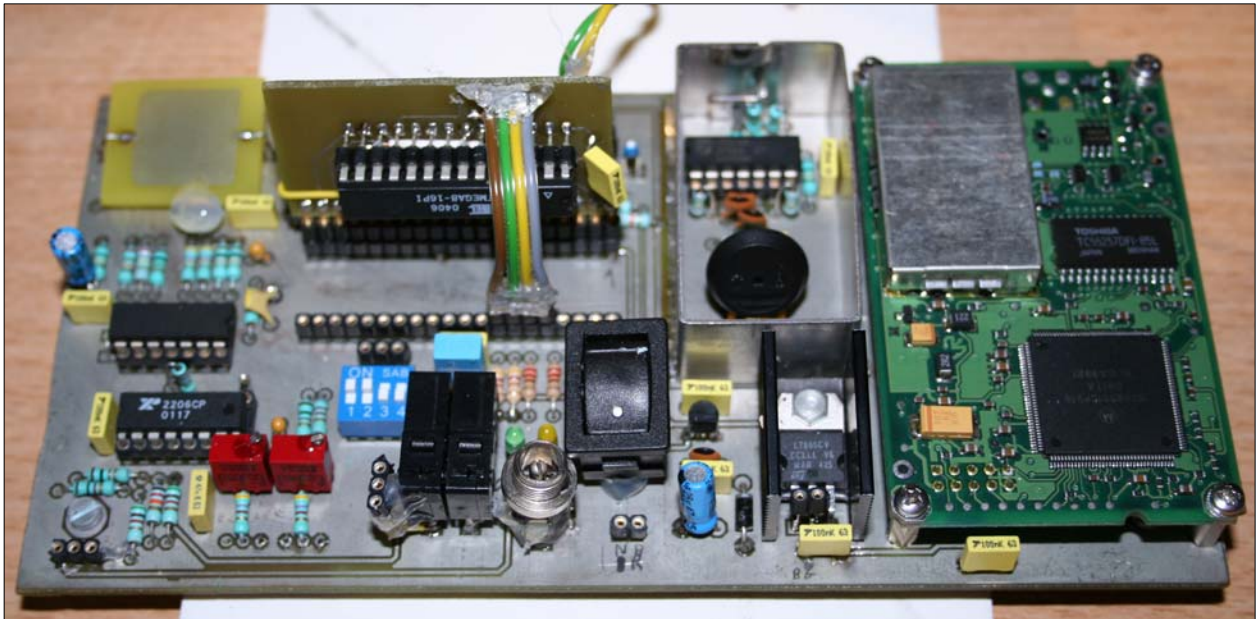
Exception faite de l'émetteur radio et du module récepteur GPS, toute l'électronique du ballon a été conçue par les membres du Furobalex.

Tirant parti des expériences et des projets précédents, toute l'électronique a été placée sur un seul et même circuit imprimé, permettant d'éviter les problèmes de connexion entre les cartes.

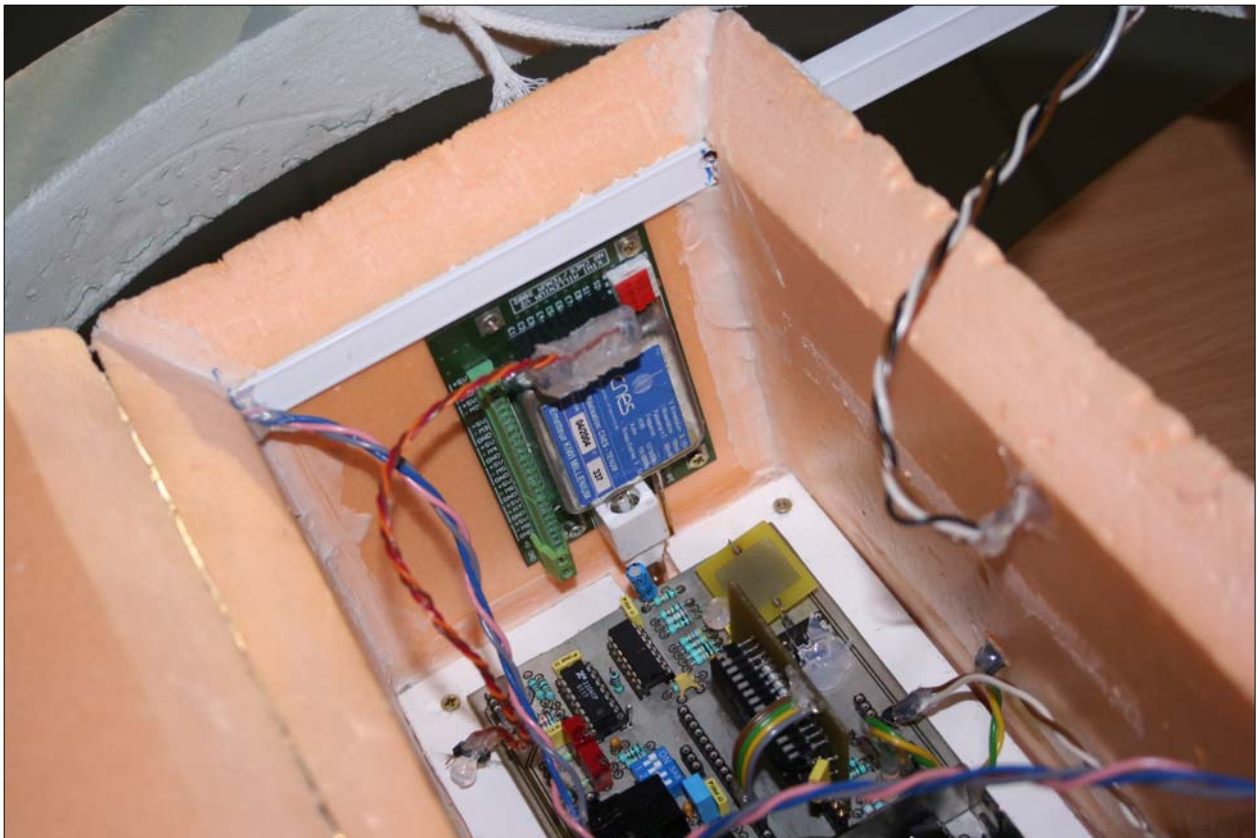
Le synoptique de l'électronique est le suivant :



Les modules en italique sont solidaires de la partie mécanique de la nacelle. Par conséquent, ils sont reliés à la carte électronique principale via des connecteurs, afin de pouvoir désolidariser l'électronique de la nacelle à tout moment, si nécessaire.



La carte électronique principale du ballon, avec le récepteur GPS à droite



Vue sur l'émetteur radio KIWI Millénium une fois fixé dans la nacelle

Interface homme – machine

Mouisoscope utilise par ailleurs une interface homme-machine particulièrement réfléchie, constituée de :

- Un **interrupteur** permettant de connecter les piles au reste de l'électronique ;
- Un **connecteur d'alimentation externe** qui permet de réaliser des tests avant le lâcher et de ne connecter les piles qu'au dernier moment ;
- Un **bouton** permettant de **démarrer le programme de vol** – c'est-à-dire de commencer à prendre les photos – déporté à l'extérieur de la nacelle ;
- Un **bouton** réalisant un **test POST** (*Power On Self Test*) de toute l'électronique du ballon ;
- Deux **LEDs de contrôle**, dont une pour signaler le bon fonctionnement du microcontrôleur central, et une pour indiquer un test POST correct.

Alimentation

Durant le vol, l'électronique de la nacelle est alimentée par 22 piles alcalines de type AA, qui se décomposent en :

- 10 piles en série générant du +15v pour alimenter l'émetteur KIWI ;
- 2x6 piles générant du +9v pour alimenter l'électronique et en particulier le GPS.

Grâce à des régulateurs linéaires DC/DC, ces tensions sont réduites à +8v et +5v, afin d'être utilisables directement par les circuits électroniques.

Par ailleurs, la nacelle peut être alimentée sur batterie grâce à un connecteur d'alimentation externe déconnectant automatiquement les piles. Cela permet de faire des tests une fois l'électronique intégrée dans la nacelle sans utiliser les piles de vol.

Système de télémesure

Etant donné le grand nombre de données à transmettre, il a été nécessaire de recourir à une télémesure numérique utilisant l'émetteur KIWI Millenium. Le standard SNR préconisé par Planète Sciences pour ce type de télémesure étant trop limité, l'équipe ballon a créé son propre standard de télémesure, basé sur le protocole RS232.

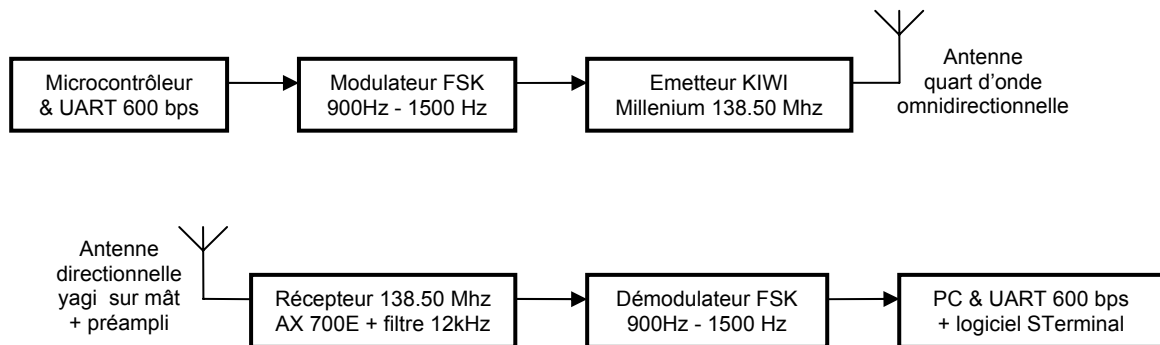
Cependant, afin de garder une compatibilité maximale avec le matériel existant et de faciliter l'interfaçage du matériel de réception, la télémesure reprend en partie les caractéristiques de celle utilisée en standard sur le KIWI Millenium.

A cet effet, les caractéristiques suivantes ont été définies :

- La trame utilise le protocole série RS232, et est constituée de 8 bits de données, 1 bit de start et 1 bit de stop ; le tout avec un débit de 600 bauds ;
- Une trame est constituée de 37 octets donc un octet de checksum et 3 octets de synchro ;
- Un générateur FSK constitué d'un circuit XR2206 module la porteuse avec les caractéristiques suivantes :
 - Fréquence modulante 0 : 900 Hz sinus,
 - Fréquence modulante 1 : 1500 Hz sinus,
 - Amplitude du signal en entrée du KIWI : 400mV.

La station de réception au sol utilise le récepteur AX 700E du CNES avec un filtre NFM de 12kHz ; et une antenne Yagi à fort gain montée sur mât et pointée vers le ballon.

Le signal reçu est ensuite démodulé par une PLL à base du circuit XR2211, puis envoyé sur le port série d'un PC afin d'être décodé par le logiciel STerminal développé par les membres du projet.



Informatique embarquée

L'électronique du ballon est basée sur un microcontrôleur 8 bits, l'ATMEGA8 de ATMEL cadencé à 14.31818Mhz. Celui-ci contient 6 convertisseurs analogique – numérique (CAN) 10 bits qui permettent de faire les acquisitions des valeurs envoyés par les capteurs, ainsi qu'un USART qui permet de dialoguer avec le GPS et d'envoyer les trames de télémesure vers le module FSK.

Le programme embarqué a été réalisé en C grâce au compilateur GCC adapté pour les microcontrôleurs ATMEL.

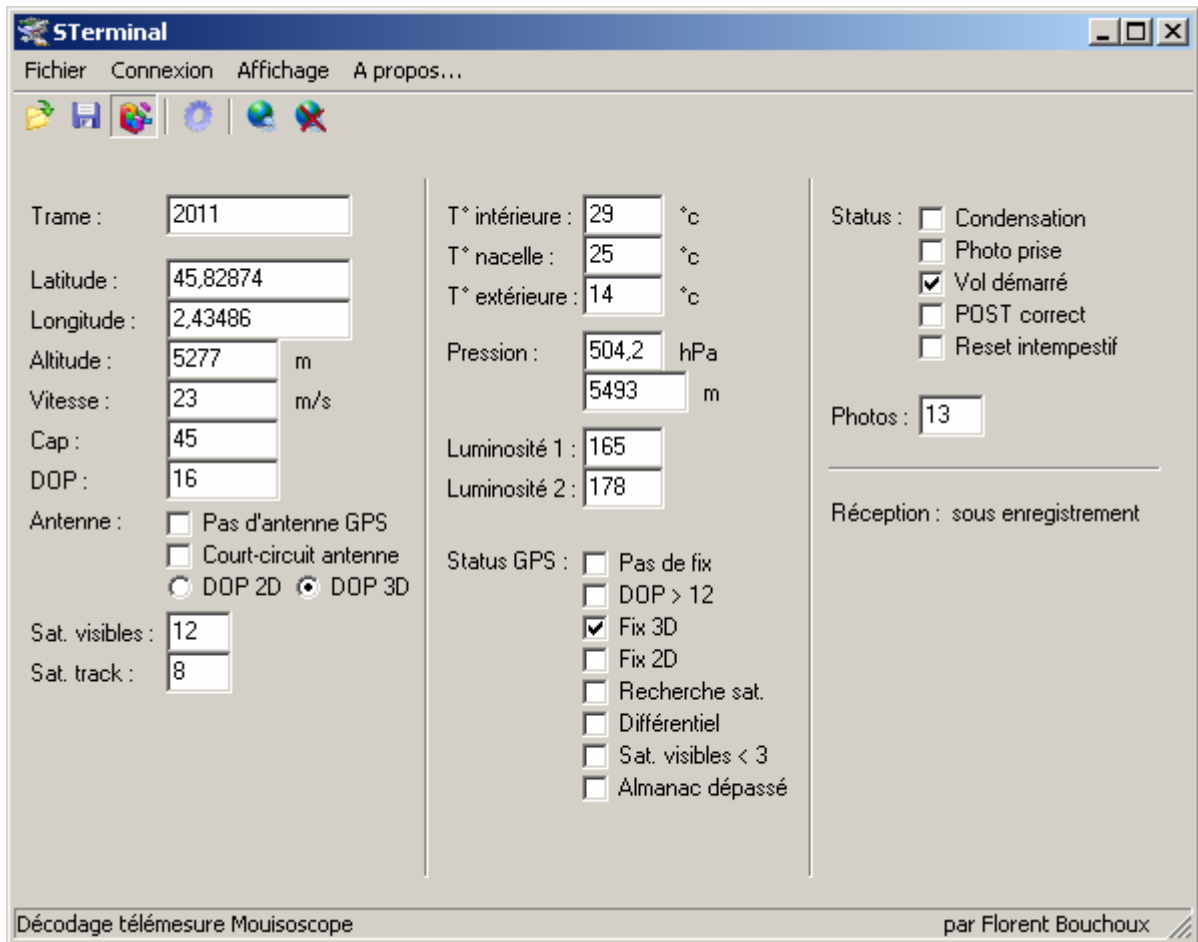
Ce programme est très sécurisé et optimisé pour un vol ballon puisqu'il :

- Gère le mode Sleep afin d'éviter une consommation inutile quand le microcontrôleur ne fait rien ;
- Utilise le WatchDog intégré pour éviter un plantage du programme ;
- Dispose d'une protection contre les resets qui pourraient se produire pendant le vol grâce à l'enregistrement d'une valeur dans sa mémoire EEPROM dès que le vol a démarré.

Informatique

En raison du standard de télémétrie utilisé, il a été nécessaire de développer intégralement un logiciel de décodage sur PC spécifique au projet Mouisoscope.

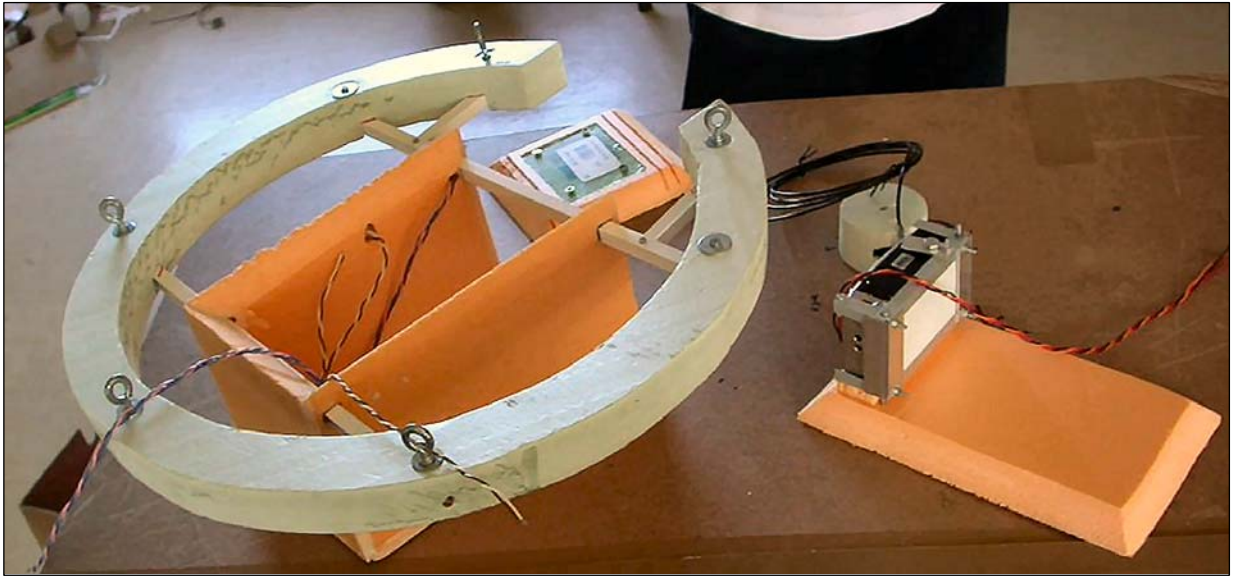
Programmé en C++ avec le compilateur Borland C++ Builder, STerminal permet de décoder la télémétrie en temps réel et d'afficher directement les résultats sous une forme exploitable, contrairement à la plupart des logiciels qui se contentent d'afficher la tension reçue. Parallèlement, il réalise un enregistrement des données reçues en vue d'une exploitation future.



STerminal pendant le vol

Mécanique

La nacelle est quasi-exclusivement construite avec du polystyrène extrudé. Celui-ci permet en effet une bonne isolation thermique et une bonne résistance aux chocs, tout en étant suffisamment léger et peu dense pour satisfaire au cahier des charges. Par ailleurs, il conserve ses propriétés mécaniques sous l'effet du froid et des pressions faibles, comme en haute atmosphère.



La nacelle en cours de construction avec l'appareil photo et l'antenne GPS

Afin d'éviter des problèmes de poids, la taille de la nacelle contenant la charge utile a été réduite au maximum. Ainsi, la nacelle proprement dite – orangée sur les photos – mesure 16x26cm, ce qui laisse 12x22cm pour l'électronique embarquée.

Dans l'optique de prises de vues vers le haut (solution qui ne sera finalement pas retenue), les suspentes sont écartées de la nacelle et accrochées à un anneau externe fendu dans l'axe de l'appareil photo. Comme le montre le schéma de la nacelle vue de haut, cet anneau est fixé à la nacelle grâce à des profilés en U en PVC, qui permettent une grande solidité de la structure tout en évitant l'utilisation de métal. Ceux-ci sont directement collés à l'intérieur des matériaux de la nacelle, afin que les profilés retiennent la nacelle et non le contraire.

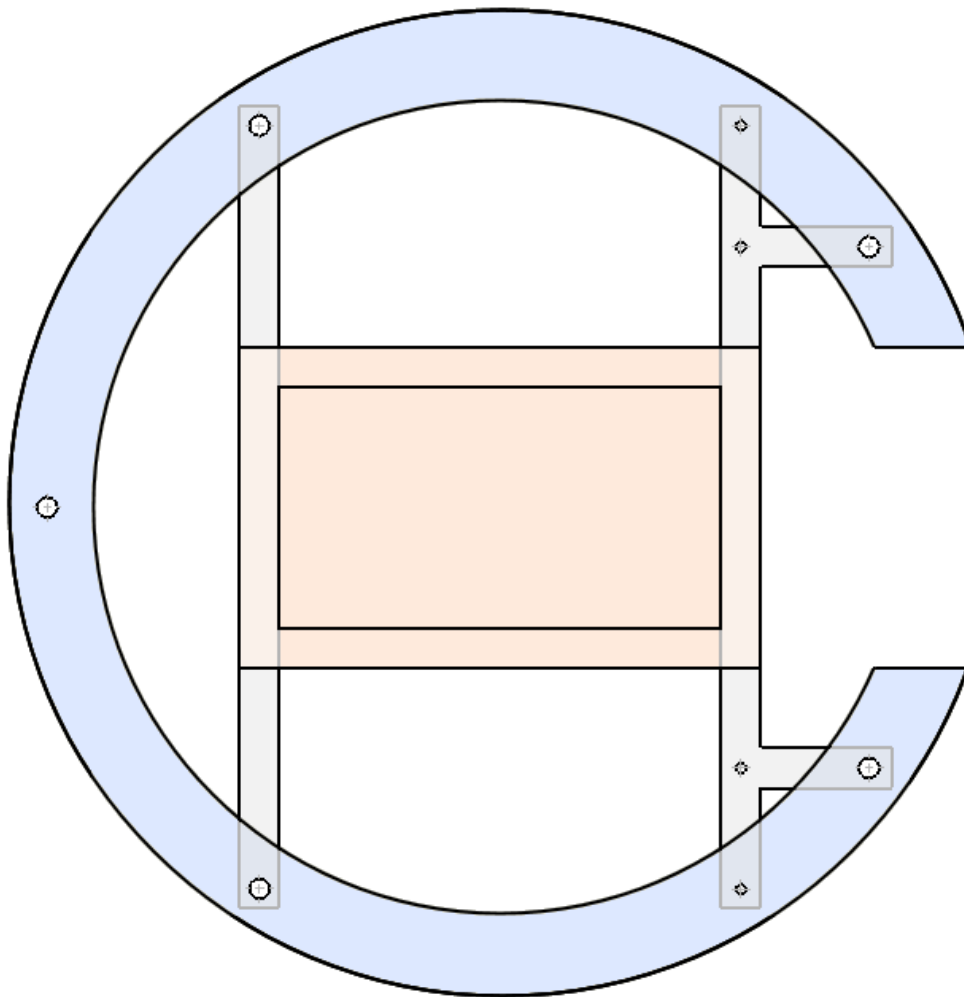


Schéma de la nacelle vue du haut

Par ailleurs, afin d'éviter des interférences entre le module GPS et l'émetteur KIWI, l'antenne GPS a été placée en hauteur sur la chaîne de vol. Elle a donc été placée à l'intérieur d'un bloc de polystyrène pour qu'elle ne soit pas dangereuse lors de l'atterrissage du ballon.

Le lâcher

La campagne nationale de lancements 2005 s'est déroulée du mardi 26 au samedi 30 juillet 2005 sur le terrain militaire de La Courtine.

Dès l'arrivée des participants du Furobalex sur la Courtine, le lâcher a été planifié pour la journée VIP du vendredi 29.

Cela a permis de terminer l'électronique de la nacelle, de réaliser des tests et de terminer le logiciel de réception. Toutefois, un problème dû au microcontrôleur du ballon a provoqué un sérieux contretemps.

En raison d'un choix fait par les responsables du Furobalex, l'équipe utilisait un microcontrôleur PIC de Microchip. Or, le mercredi 27, le programmeur PIC – qui fonctionnait déjà aléatoirement – est tombé en panne. Le programme embarqué étant encore en version bêta, il était impossible de continuer le développement et les tests ; et cela devenait problématique étant donné que le lâcher était prévu 2 jours plus tard. L'équipe de projet a donc décidé d'utiliser un microcontrôleur ATMEL, l'ATMEGA8 qui pouvait être programmé grâce à une platine d'expérimentation appartenant à un des membres de l'équipe ballon.

Ainsi, le programme embarqué a été complètement recommencé et un adaptateur a été réalisé, permettant de connecter le microcontrôleur ATMEL à la place du PIC.

Grâce à une bonne organisation et surtout une bonne connaissance de l'ATMEGA8, l'électronique a été terminée le jeudi 28 au soir, permettant de confirmer le lâcher pour le vendredi.

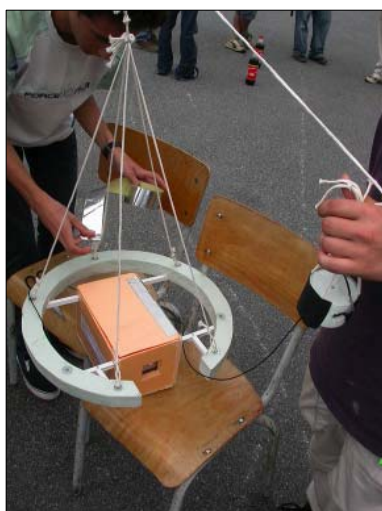
En raison de la météo particulièrement dégradée le vendredi, il n'a été possible d'envisager le lâcher que vers 16h, alors qu'il était initialement prévu pour 14h.

Le lâcher a donc été effectué à 16h15, entre deux orages. Malgré la météo et les rafales de vent, il s'est parfaitement déroulé, et l'appareil photo a même pris plusieurs photos au sol en raison du temps de gonflage du ballon.

Après le lâcher, le public a pu suivre en temps réel l'ascension du ballon par télémétrie, notamment grâce au module GPS indiquant entre autres la vitesse et l'altitude.

Malheureusement, sans doute à cause de la puissance de l'émetteur et de la météo capricieuse, la télémétrie est progressivement devenue inexploitable après 12km d'altitude, alors que le ballon était toujours en montée.

De plus, la chasse au ballon organisée par le club Nodal S n'a pas permis de retrouver le ballon une fois posé, en partie en raison des orages et du coucher du Soleil.



Fermeture de la nacelle



Gonflage du ballon



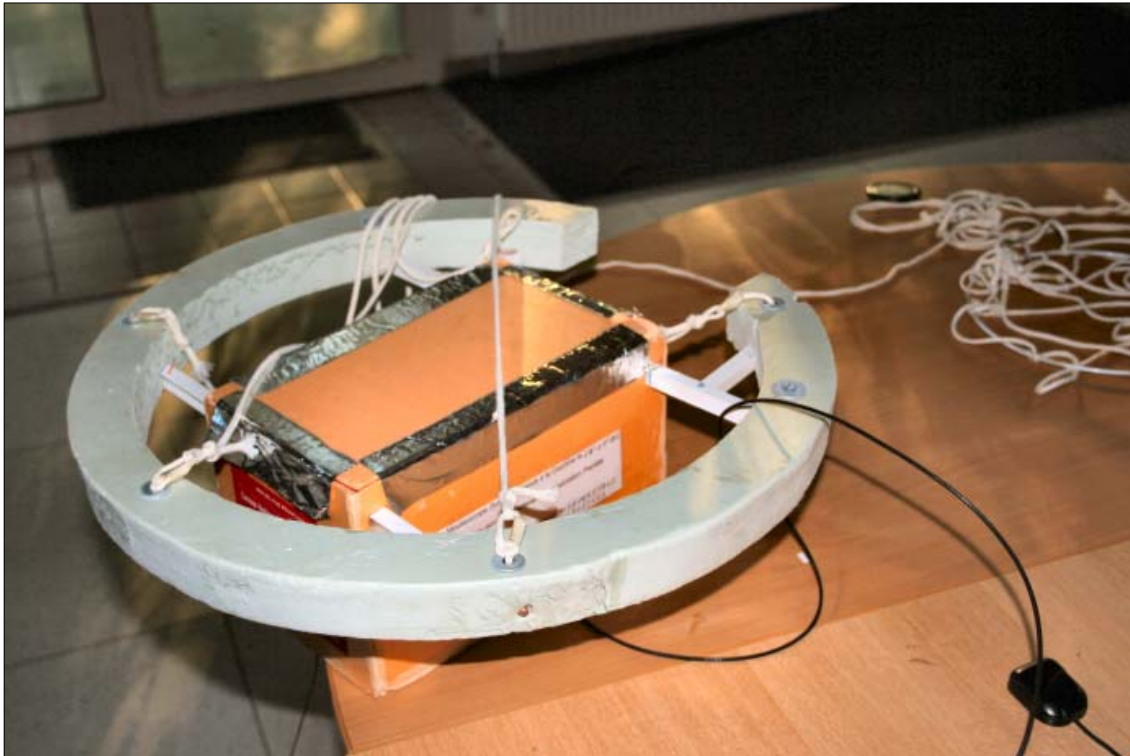
Lâcher

On l'a retrouvé !

La nacelle a été retrouvée le 31 juillet par Mr Luc Giard – que nous remercions au passage -, dans un champ près du village de Croisy dans le Cher.

Grâce aux autocollants placés sur la nacelle indiquant le numéro de téléphone de l'équipe ballon ; il a été possible aux membres du projet de connaître exactement la position du ballon et l'état de la nacelle après atterrissage ; ceci sans passer par Planète Sciences.

Toutefois, bien que la nacelle ait été retrouvée le 31 juillet, l'équipe ballon n'a pu accéder à la nacelle et ouvrir l'appareil photo que vers mi-octobre, en raison des délais inhérents à Planète Sciences.



La nacelle après récupération, en excellent état

Analyse des résultats

Jusqu'à la perte de télémétrie à 12km d'altitude, tous les résultats ont été enregistrés, ce qui permet de les analyser, notamment sur courbe.

Malheureusement, aucune trame n'a été reçue après 12km. Pourtant, quelques trames seulement auraient permis d'en savoir plus et d'avoir quelques résultats d'expériences, en particulier pour le capteur de condensation.

Photos

Le module de photographie utilisant une pellicule argentique, les photos n'ont pas été transmises par radio mais ont été développées après la récupération de la nacelle.

Tirant parti des expériences et des ballons précédents, l'équipe a pris la précaution de tester l'appareil photo au sol avant le lâcher. Cela explique que 4 des 36 photos ont été prises au sol, pendant le gonflage du ballon.



790 m - sol



790 m - sol



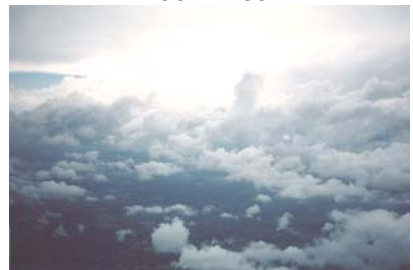
790 m - sol



790 m - sol



1600 m – FL50



2400 m – FL80



3300 m – FL110



4000 m – FL130



4600 m – FL150



5700 m – FL190



13 km – FL430



14 km – FL460



15 km – FL500



16 km – FL530



17 km – FL560



18 km – FL600



19 km – FL630



19 km – FL630



20 km – FL660



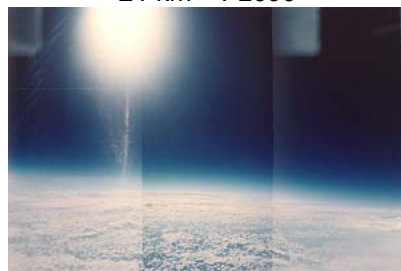
21 km – FL690



22 km – FL730



24 km – FL790



25 km – FL830



26 km – FL860

On peut noter sur certaines photos un léger chevauchement avec les photos adjacentes.
Des tests complémentaires sur l'appareil photo n'ont pas permis de reproduire ce problème ; la cause de celui-ci reste donc, pour le moment, inconnue.

Les altitudes sont exprimées à partir du niveau de la mer, déduit de l'altitude GPS et avec une correction tenant compte de l'ondulation du géoïde en France ; l'altitude fournie par le GPS étant par rapport à l'ellipsoïde WGS84 et non par rapport au niveau de la mer.

Les niveaux de vol – *Flight Level* – sont utilisés en aéronautique. Ils correspondent aux centaines de pieds par rapport à l'isobare 1013hPa, que l'on a approximé comme étant le niveau de la mer.



1600 m



5700 m



19 km



22 km

GPS

Le GPS a fort heureusement parfaitement fonctionné, avec la plupart du temps 8 satellites en track et 10 à 12 satellites visibles.

Cela confirme donc que le positionnement de l'antenne au dessus de la nacelle ne pose pas de problèmes, même si elle n'est pas accrochée à une plate-forme mais suspendue à la chaîne de vol.

La carte suivante montre le tracé des points GPS du ballon (ronds rouges), la trajectoire prévue par radio-sondage et le point d'atterrissage réel, au nord-est de Blet :



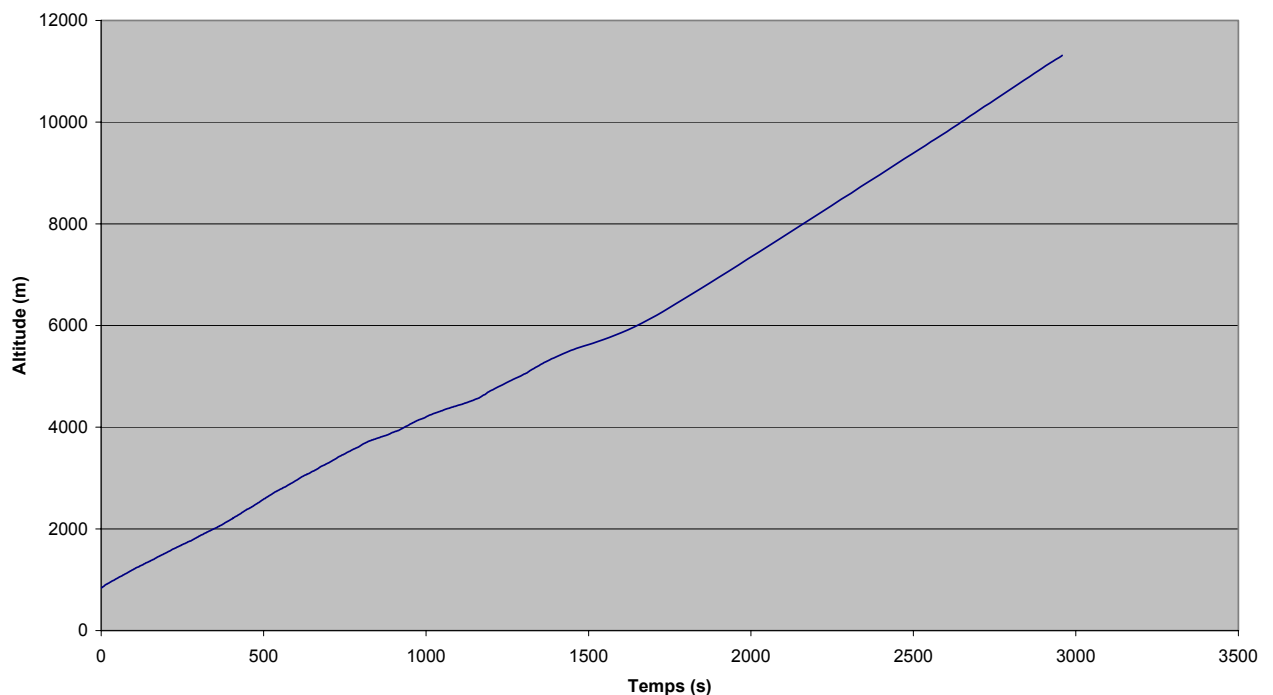
Lors de la réception du dernier point GPS, le ballon se trouvait approximativement à 60km de La Courtine. La trajectoire prévue par Météo France, qui correspond à peu près à celle du ballon au départ, prévoit un atterrissage vers Blet, au sud-est de Chartres.

En réalité, le ballon a été retrouvé à Croisy, soit à environ 10km du point prévu. La précision de la prévision par radio-sondage est donc excellente, et il serait souhaitable de s'en servir pour faciliter la récupération du ballon, et notamment pour que l'équipe de récupération puisse arriver sur les lieux avant l'éclatement du ballon.

Mouisoscope a ainsi parcouru quelques 200km au total, et a atterri à environ 150km du lieu de lâcher. Cette longue distance parcourue s'explique par la mauvaise météo le jour du lâcher, avec des vents violents notamment à l'altitude de la tropopause – plus de 150 km/h à 11km d'altitude !

Le GPS a également transmis l'altitude en fonction du temps. Celle-ci ne correspond pas tout à fait à l'altitude réelle mais au modèle de la terre WGS84, qui sert de référence pour les calculs GPS. Toutefois, la marge d'erreur est négligeable, on considèrera donc l'altitude GPS comme l'altitude réelle durant tout le vol du ballon.

Altitude GPS en fonction du temps



On constate que l'altitude évolue linéairement par rapport au temps. En effet, lorsque le ballon monte, ρ_{air} diminue, mais simultanément V_{ballon} augmente. D'après la formule de la poussée d'Archimède :

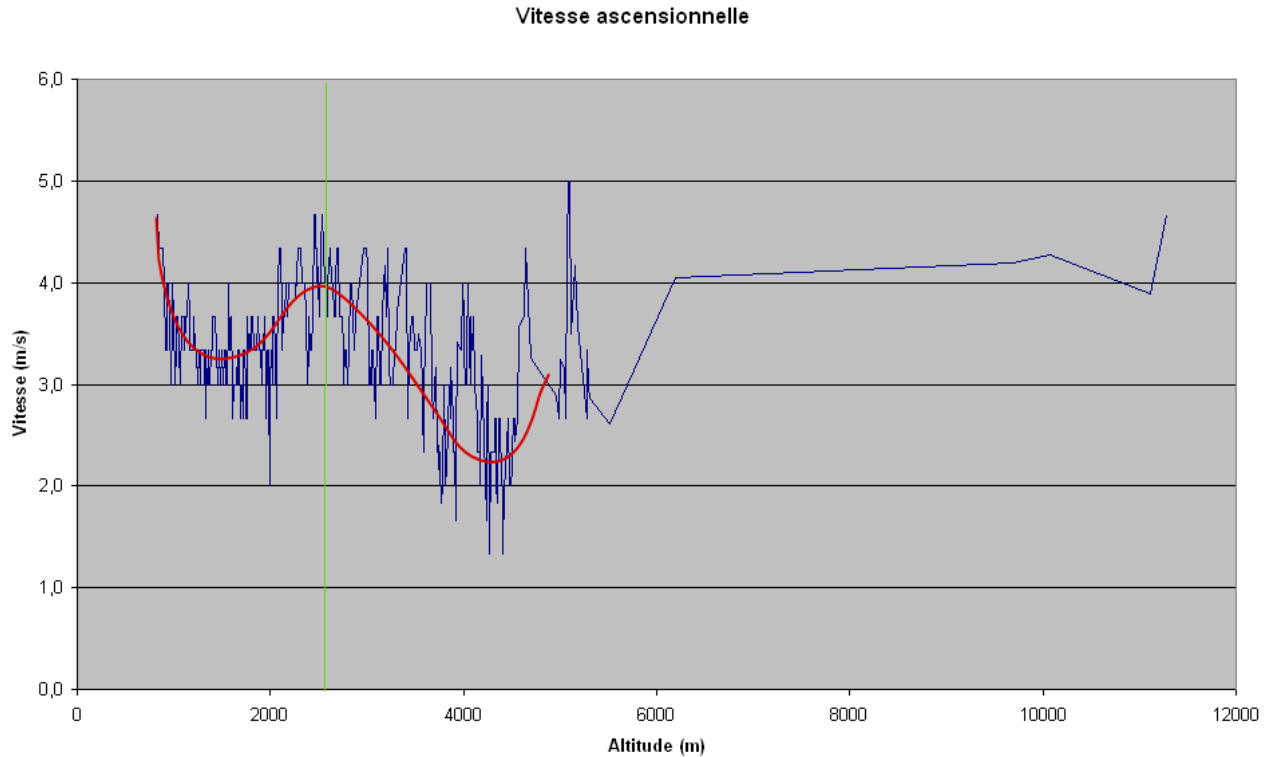
$$P_a = \rho V g$$

avec V le volume de l'enveloppe du ballon

on en déduit que la force P_a reste constante par compensation de ρ_{air} et de V_{ballon} .

Dans notre cas, la vitesse moyenne de montée est 3,5 m/s. Or, pour un lâcher de ballon par grand vent – comme c'était le cas pour Mouisoscope – la vitesse de montée doit être de 5 m/s.

Afin d'étudier plus en détail ce paramètre, on trace le graphique de l'évolution de la vitesse ascensionnelle en fonction de l'altitude GPS :



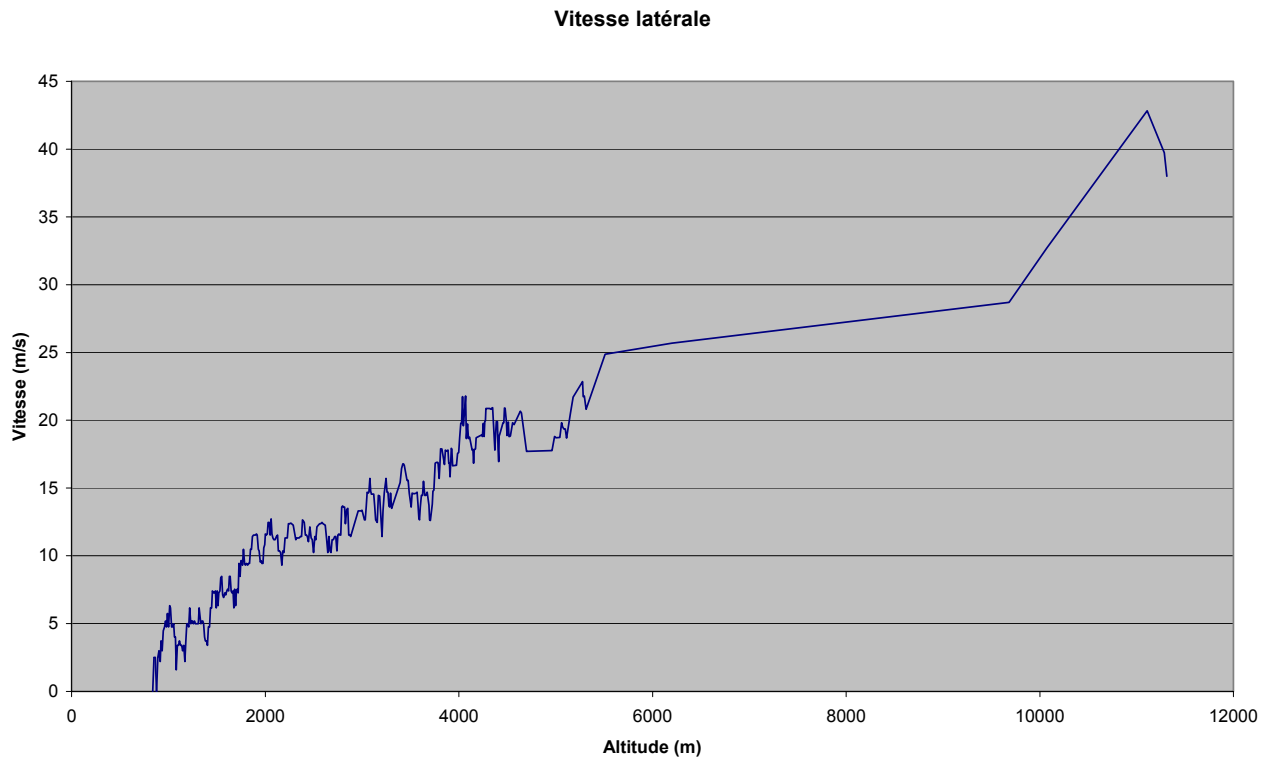
Malgré une variance importante, le graphique reste parfaitement exploitable, comme le montre la courbe rouge. La ligne verticale verte traduit le moment où, à partir du sol, on a constaté que le ballon était entré dans les nuages.

Au moment du lâcher, la vitesse de montée est de 4,7 m/s. Elle diminue rapidement, puis augmente avec un pic juste avant d'entrer dans les nuages vers 2500 m. Puis, une fois entrée dans un nuage, la vitesse ascensionnelle diminue progressivement, puis réaugmente rapidement aux alentours de 4500m.

Le pic de vitesse avant d'entrer dans le nuage traduit un courant vertical ascendant ou au moins stationnaire. Une fois entré dans le nuage, la vitesse diminue pour atteindre moins de 2 m/s, ce qui montre l'existence et l'intensification d'un flux descendant. Après 4000m, il est probable que le ballon se trouvait dans une zone moins turbulente, ce qui explique la remontée de la vitesse vers des valeurs plus correctes.

Dans tous les cas, la vitesse de montée n'excède pas 5m/s, ce qui est absolument anormal, étant donné que le ballon a été surgonflé afin d'éviter une trop grande dérive. On peut supposer l'existence de courants verticaux descendants sur toute la troposphère, mais l'hypothèse la plus probable est que le poids de la nacelle a été mal évalué et donc le ballon pas assez gonflé.

Grâce aux informations de localisation 2D du GPS, on peut également déterminer la vitesse horizontale :



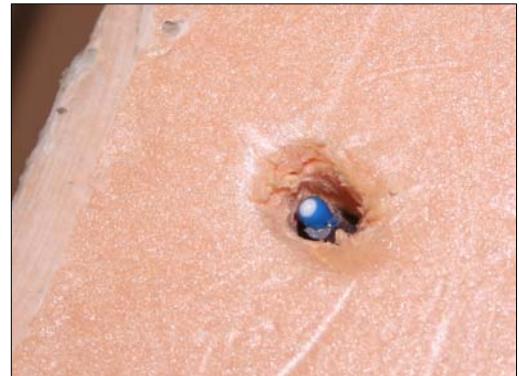
On constate une augmentation quasi-linéaire de la vitesse jusqu'à la tropopause située à environ 11km d'altitude. Le passage de la troposphère à la stratosphère est ici bien visible avec une diminution nette et rapide de la vitesse latérale.

Malheureusement, les quelques points du graphique obtenus vers 12km ne nous permettent pas d'en conclure beaucoup plus.

Température

Malgré la bonne précision des capteurs utilisés – résistances CTN de précision à 1% - les résultats obtenus ne sont pas à la hauteur. En effet, l'imprécision n'a pas été causée par la chaîne de mesure, mais par des parasites liés à l'environnement.

Si les courbes de la température intérieure et des matériaux paraissent cohérentes – et de toute manière difficilement vérifiables – ce n'est pas le cas de la mesure de la température extérieure. En effet, le ballon devrait mesurer des températures de l'ordre de -50°C lors du passage de la troposphère, soit vers 11km d'altitude. Or, à ces altitudes, le capteur mesure des températures de seulement -1°C.



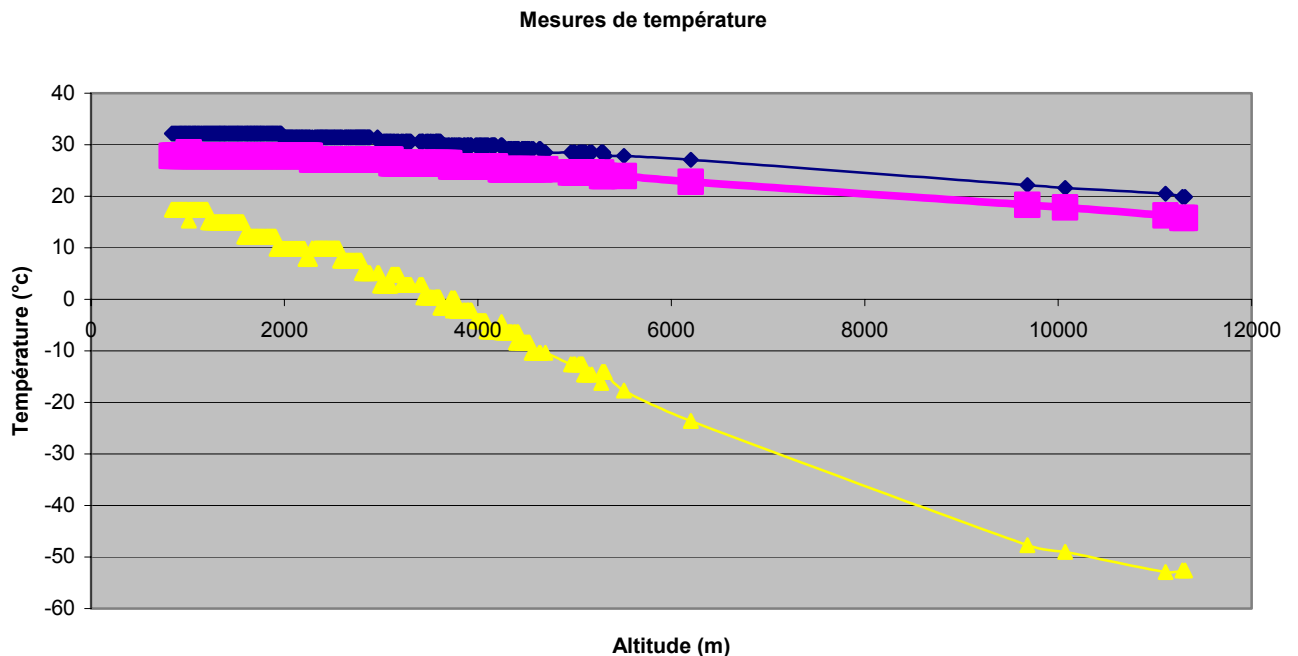
Après récupération et analyse de la nacelle, des tests ont montré que le capteur de température extérieure, bien que n'étant pas en contact avec le polystyrène de la nacelle, était bien trop proche de celui-ci. C'est cette proximité qui a engendré cette majoration non négligeable de la température.

Par corollaire, il est très probable que les deux autres mesures de températures n'ont pas été influencées de la même manière puisque les capteurs n'étaient pas positionnés de la même manière.

Afin d'avoir tout de même une idée de la température extérieure lors du vol, des corrections ont été apportées aux données de température envoyées par le ballon.

Comme le montre la photo, environ 75% de la surface du capteur sont à proximité immédiate du polystyrène ; et 25% de la surface sont au contact de l'air extérieur. Le capteur faisant une moyenne pondérée de ces températures, et connaissant la température du polystyrène, il est possible de retrouver la température extérieure facilement par une simple équation.

Les courbes corrigées sont les suivantes :



Courbe bleue : température intérieure ;
Courbe mauve : température des matériaux ;
Courbe jaune : température extérieure corrigée.

Les résultats sont alors tout à fait cohérents et le calcul de proportionnalité effectué pour corriger la température extérieure confirme que le problème venait effectivement du fait que le capteur n'était pas suffisamment au contact de l'air extérieur.

La différence importante de température entre l'extérieur et l'intérieur de la nacelle s'explique d'une part par les propriétés isolantes du polystyrène extrudé utilisé pour construire la nacelle ; et d'autre part par le fait que l'électronique – notamment l'émetteur KIWI Millenium – chauffait de manière importante.

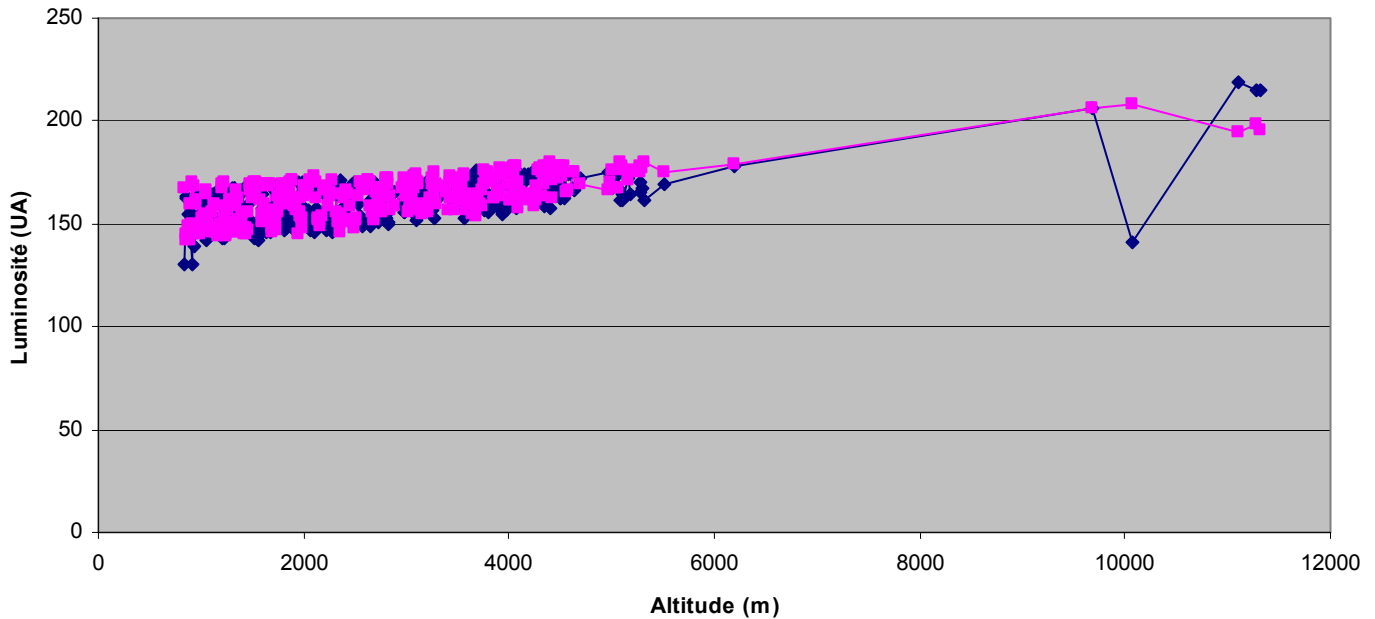
Il faut souligner que l'on ne dispose des données que pour la montée du ballon. Or, lors de la montée, la pression extérieure diminue et l'air dans la nacelle sort de celle-ci. Il y a donc pas – ou très peu – d'entrée d'air froid dans la nacelle. En revanche, lors de la descente, la pression réaugmente et l'air froid entre dans la nacelle : en descente, il est donc très probable que la température intérieure aurait été inférieure à celle mesurée lors de la montée.

Il n'est donc pas possible de tirer de conclusions sur la température minimale atteinte à l'intérieur de la nacelle.

Luminosité

Afin d'obtenir des mesures de luminosité cohérentes et intéressantes, il aurait été nécessaire de lâcher le ballon un jour ensoleillé, ce qui n'a pas pu se faire sur la campagne de lancements. Cependant, les résultats obtenus se révèlent tout à fait satisfaisants, puisque l'on constate une évolution progressive de la luminosité lors du passage du ballon dans les nuages.

Evolution de la luminosité en fonction de l'altitude



La courbe reflète l'évolution de la luminosité en fonction de l'altitude. En raison de l'imprécision des capteurs utilisés – des LDRs à bas prix – il n'est pas possible de donner des valeurs de luminosité précises ; cependant, pour avoir un ordre d'idée, la mesure est une fonction exponentielle de la luminosité en lux.

Le jour du lâcher, il y avait présence de cumulonimbus plafonnés par la tropopause. Lors du passage du ballon dans les nuages – notamment en dessous de 6 km – la valeur renvoyée par les capteurs de luminosité augmente linéairement. De plus, malgré l'uniformité de la couche, on peut constater une variance de la luminosité relativement constante ; ce qui signifie que le soleil reste globalement perceptible – la luminosité n'est pas diffuse – lorsque le ballon se trouve dans les nuages.

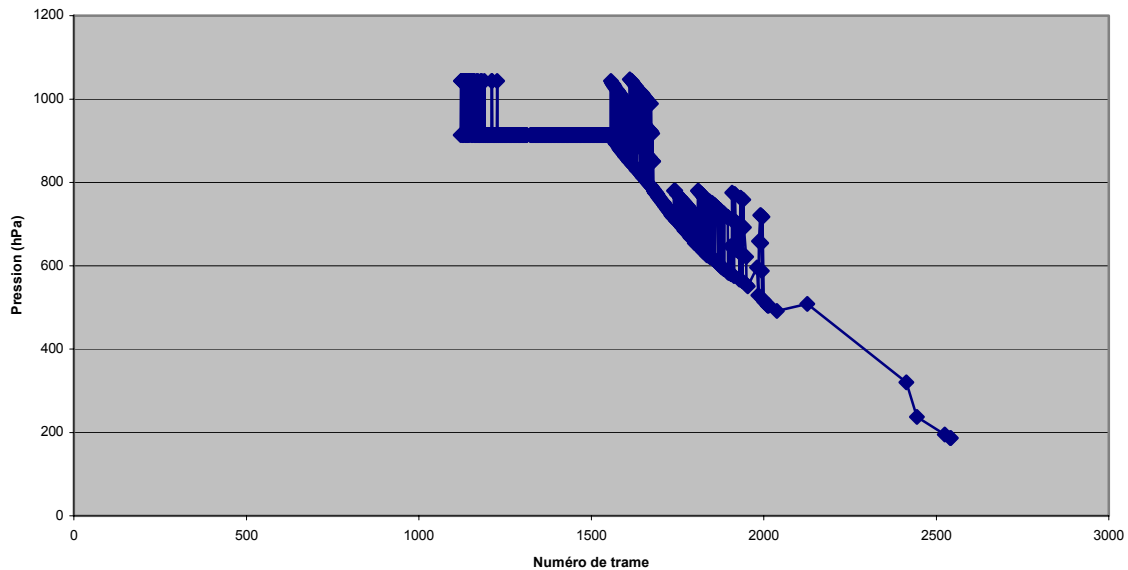
Même si une augmentation nette de la luminosité n'est pas visible explicitement sur le graphique, on peut toutefois supposer une relative constance de la luminosité après 10 km, étant donné l'absence complète de nuages. Cette absence de nuages se remarque toutefois clairement sur les photos.

La précision obtenue est bien au-delà des souhaits de l'équipe. Les mesures sont homogènes d'un capteur à l'autre en raison de la rotation de la nacelle, et on ne constate aucun pic anormal. Notamment dans la première partie de la courbe, les mesures des deux capteurs se recoupent et présentent la même étendue.

Une telle expérience reste donc intéressante même si les mesures ne donnent pas de valeurs précises, car contrairement à une température qui est le reflet d'une réalité simple – l'agitation thermique – la luminosité est plus complexe à mesurer et surtout à interpréter ; car la mesure réalisée par les LDR sur l'anneau de la nacelle tient non seulement compte de l'éclairement direct du Soleil, mais également la réflexion de la lumière sur les nuages, et sa diffusion dans l'atmosphère.

Pression

Malgré les précautions prises afin d'éviter un parasitage du capteur de pression par l'émetteur KIWI Millénium – blindage complet du capteur de pression et de son module d'amplification – il s'avère que ce dernier a été parasité par ajout d'une tension parasite à la tension du capteur de pression.



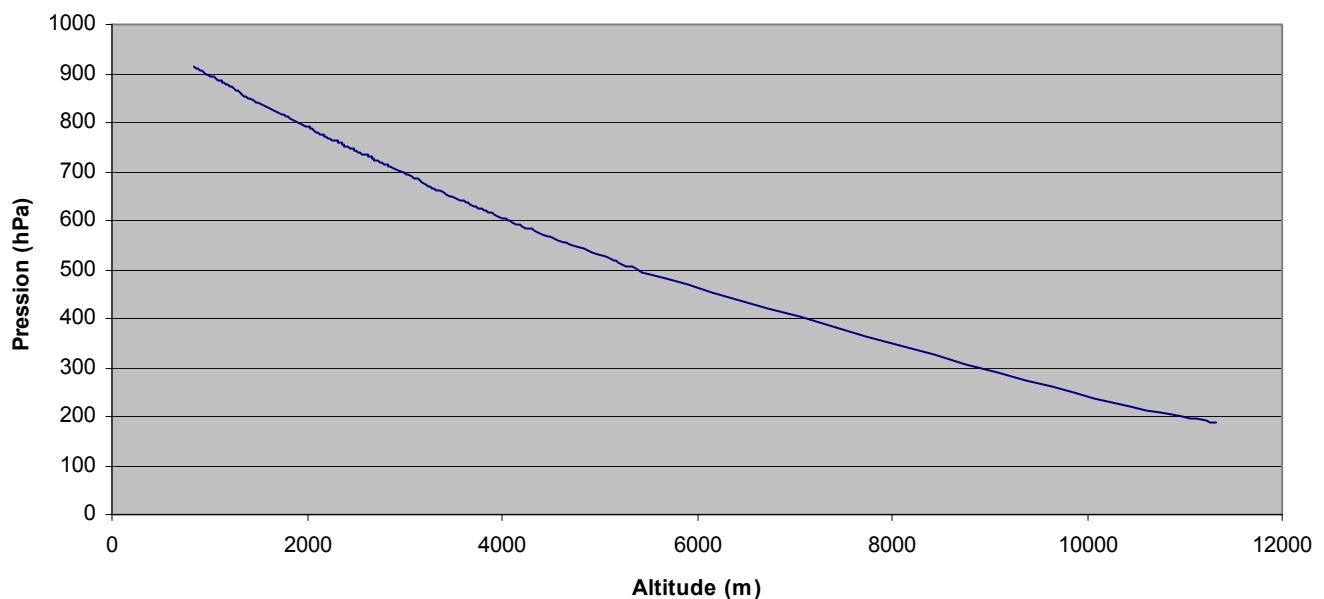
On peut toutefois constater que la tension ajoutée est rigoureusement constante, notamment lorsque le ballon est au sol avant le lâcher (0,6 V). De plus, lors du vol, il y a eu 3 paliers de tension en plus de la tension nominale et attendue, régulièrement placés.

Au jour d'aujourd'hui, il n'a pas été possible d'étudier la nacelle en détail afin de pouvoir déterminer la cause précise de ce problème.

On peut toutefois supposer que ces parasites ont été causés à cause de l'émetteur radio, ou en raison de faux contacts dans la chaîne de mesure avant le CAN du microcontrôleur.

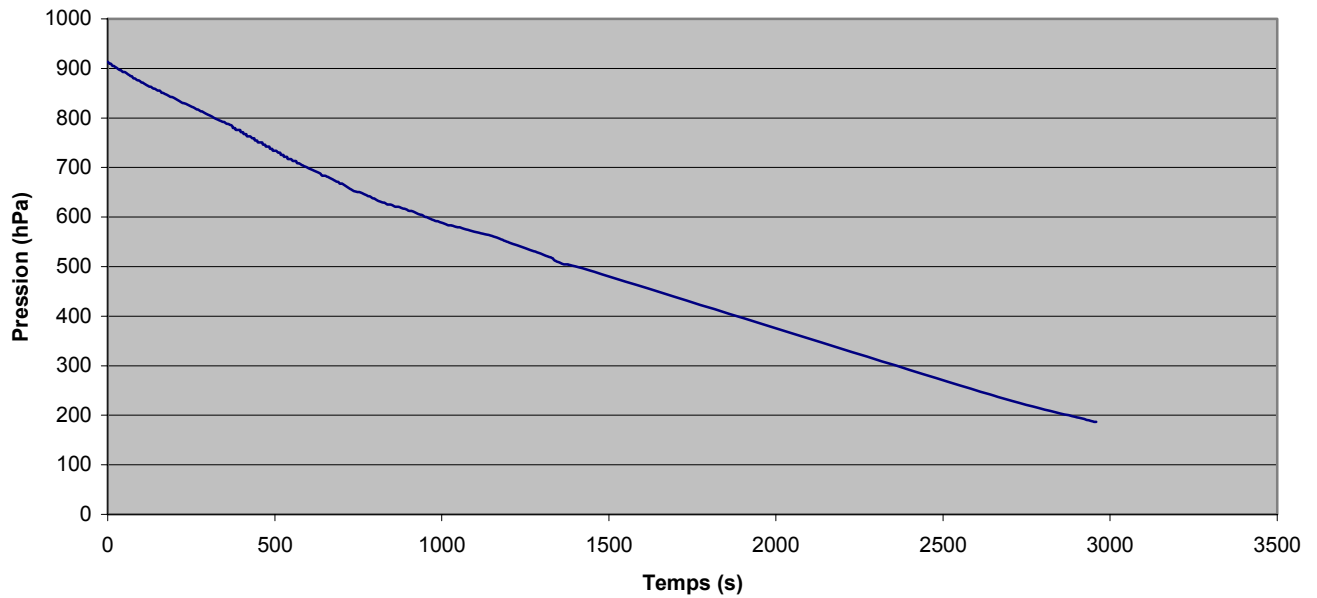
Il est possible, à partir de la courbe parasitée, de déterminer approximativement une courbe correcte de pression en fonction de l'altitude par suppression manuelle des points de mesure erronés :

Pression en fonction de l'altitude



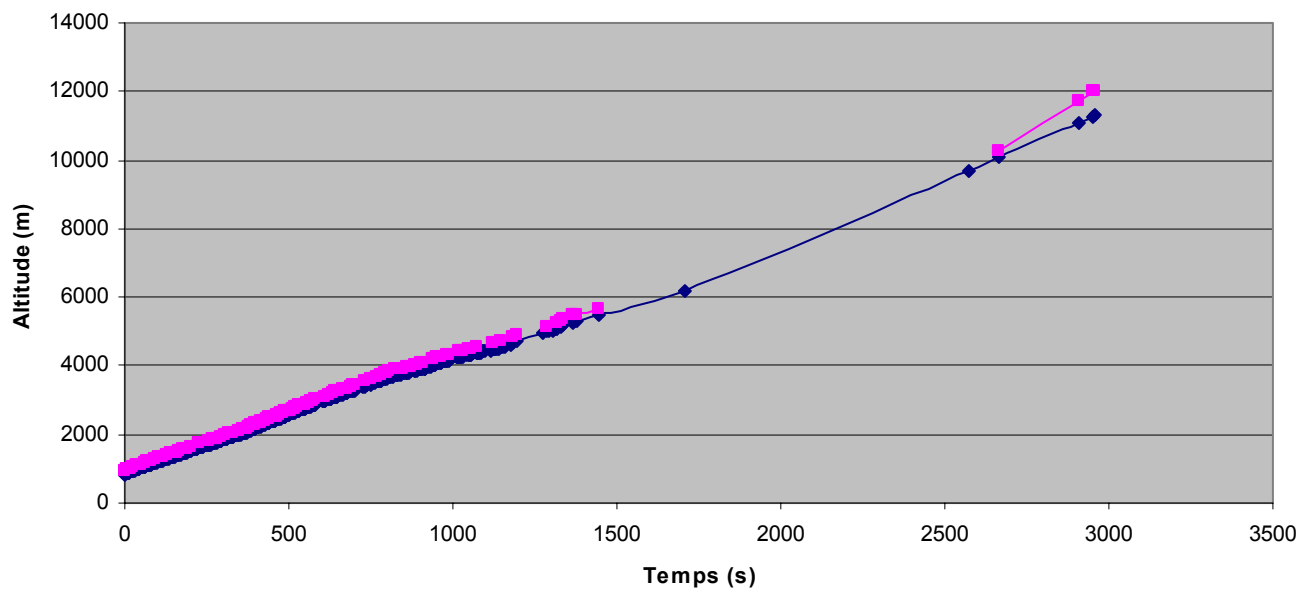
Comme on peut s'y attendre en raison du modèle d'atmosphère standard, la courbe a l'allure d'une fonction exponentielle de l'altitude, tout comme celle de la pression en fonction du temps :

Pression en fonction du temps



Grâce au modèle d'atmosphère standard, on peut également comparer l'altitude déterminée via le capteur de pression, et celle mesurée par le GPS :

Altitudes en fonction du temps



Courbe bleue : altitude GPS ;

Courbe mauve : altitude calculée à partir de la pression – voir méthode de calcul.

Bien que, au début du vol, les courbes sont très proches, elles divergent légèrement lorsque l'altitude augmente.

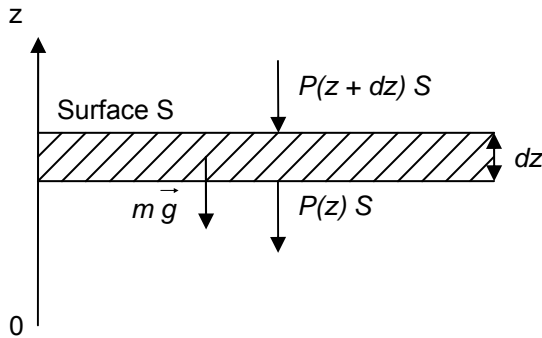
Cela s'explique par les imprécisions de mesure, qui ont un impact beaucoup plus important sur le calcul de l'altitude lorsque les pressions sont faibles ; ainsi que par le fait que le modèle d'altitude utilisé ne correspond pas exactement à la réalité. Ainsi, en haute altitude, le capteur de pression surestime l'altitude par rapport à celle calculée par le GPS.

Il est très probable qu'avec des altitudes avoisinant les 30km, la différence entre les deux mesures d'altitudes aurait été importante. La mesure d'altitude par GPS reste donc importante, puisque c'est la seule sur laquelle on peut se baser pour donner une altitude correcte. Cela dit, le capteur de pression reste un moyen simple pour mesurer l'altitude, à condition d'utiliser un modèle d'atmosphère suffisamment proche de la réalité et surtout une très bonne précision de la chaîne de mesure.

Méthode de calcul de la pression en fonction de l'altitude

Au lieu de simplement utiliser les tables d'altitude – pression que l'on peut trouver sur Internet et qui sont standardisées, l'équipe a cherché à retrouver par calcul une formule permettant de calculer la pression de l'air en fonction de l'altitude.

On considère une couche d'air d'épaisseur négligeable dz . 3 forces s'appliquent sur cette couche :



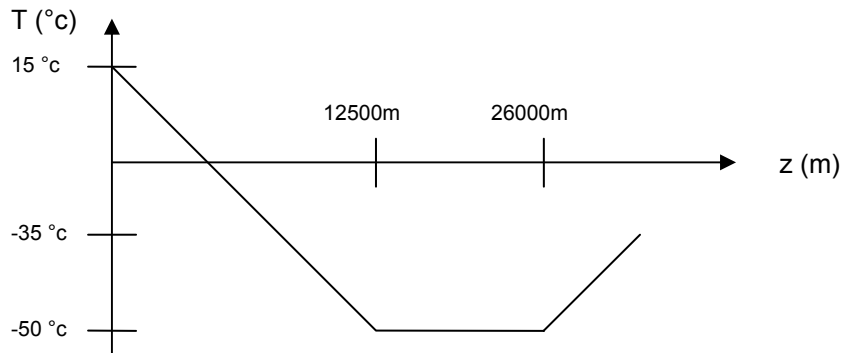
On a $m = S dz P(z)$
 $P(z + dz) = P(z) + dP$
 $S P(z + dz) + mg = S P(z)$
 d'où $P(z) + dP + P(z)g dz = P(z)$
 $\frac{dP}{dz} = -P(z)g$

L'air est assimilé à un gaz parfait ($M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$).

Il vérifie donc la relation : $PV = nRT$

soit $n = \frac{m}{M}$ $P = \frac{mRT}{VM} = P(z)\frac{RT}{M}$

Afin d'obtenir des résultats les plus véridiques possibles, on modélise l'évolution de la température dans l'atmosphère de la manière suivante :



On considère qu'il existe 3 possibilités d'évolution de la température en fonction de l'altitude :

Si T est constante, on a $P(z) = \frac{MP(z)}{RT}$

en substituant dans l'équation : $\frac{dP}{dz} = -g \frac{MP(z)}{RT}$

soit $\frac{dP}{P} = -\frac{Mg dz}{RT}$

$\ln \frac{P}{P_0} = -\frac{Mg (z - z_0)}{RT}$

$P(z) = P_0 \exp\left(\frac{Mg}{RT}(z_0 - z)\right)$

Si $T = -az + b$ – typiquement dans la troposphère, $T(z) = \frac{-6,5z}{1000} + 293$

on a $P(z) = \frac{M P(z)}{R(b - az)}$ et $\frac{dP}{dz} = \frac{M P(z)}{R(az - b)}$

d'où $\frac{dP}{P} = \frac{Mg dz}{R(az - b)}$

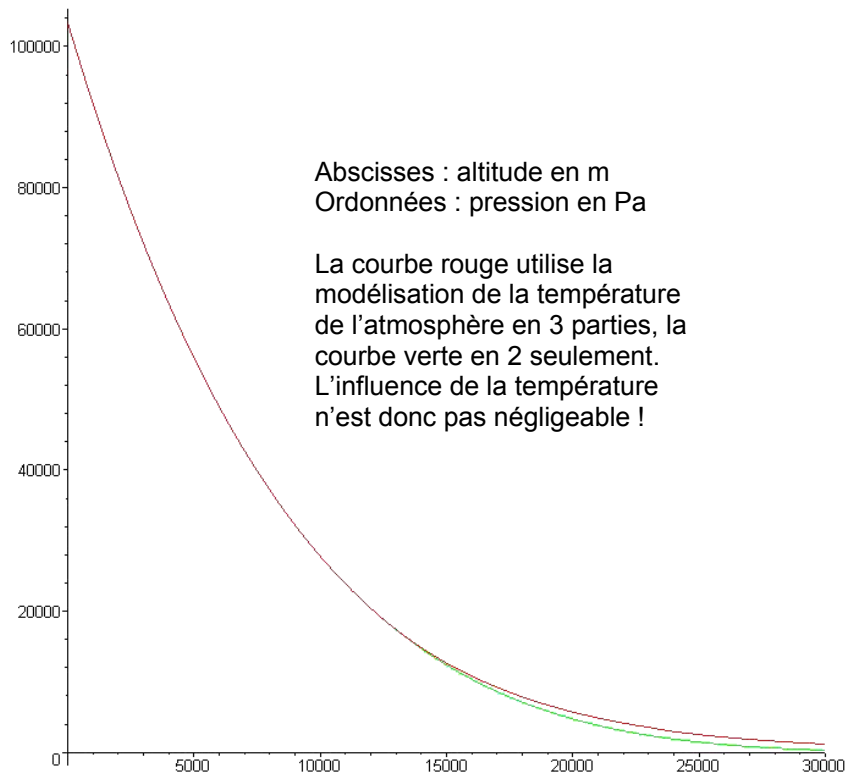
$\ln \frac{P}{P_0} = \frac{Mg}{R} \cdot \ln\left(\frac{az - b}{az_0 - b}\right)$

$P(z) = P_0 \left(\frac{az - b}{az_0 - b}\right)^{\frac{Mg}{R}}$

Si $T = az + b$ – comme dans la partie supérieure de la stratosphère, sachant que $a \geq 0$

$P(z) = P_0 \left(\frac{az + b}{az_0 + b}\right)^{\frac{Mg}{R}}$

Cette étude permet d'obtenir la courbe suivante, qui permet notamment de déterminer l'altitude à partir de la pression mesurée.

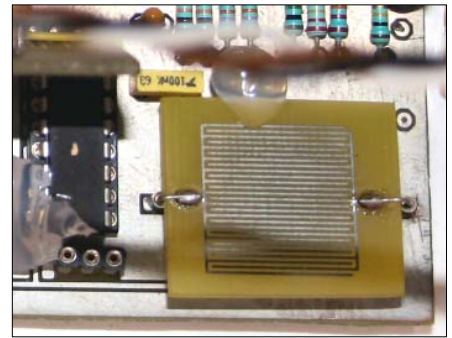


Condensation

En raison de la courte durée de réception de la télémessure, les résultats de l'expérience de détection de condensation ne sont pas tout à fait concluants.

En effet, dans aucune trame reçue, le ballon n'a mentionné de présence de condensation. Or, les photos montrent clairement que le ballon passe dans des nuages durant une partie non négligeable du vol ; et de la condensation s'est formé sur la vitre du module photo.

Et ce alors que la télémessure était toujours exploitable.



Bien que l'on ne puisse pas exclure une défaillance de ce module, il est bien plus probable qu'il n'y a pas eu formation de condensation sur le capteur. En effet, ce dernier est situé sur le circuit principal, donc avec une température relativement élevée ; alors que la vitre du module photo est située au contact de l'air extérieur, donc au contact du froid.

Cependant, ce module a été mis en place afin de déterminer si de la condensation se forme sur le circuit imprimé. Ainsi pendant la montée à travers les nuages, on peut déjà conclure qu'il n'y a pas de risque de condensation sur le circuit. Il aurait toutefois été intéressant de connaître l'évolution de ce paramètre au cours du vol, notamment lors du passage dans les nuages à la descente.

En tout état de cause, il serait intéressant de reconduire cette expérience sur un prochain projet ballon, en plaçant le capteur de condensation un peu à l'écart des cartes électroniques, afin de faciliter la formation de condensation sur celui-ci.

Analyse des problèmes rencontrés

Plusieurs problèmes ont été rencontrés :

- **perte de la télémesure à 12 km** d'altitude : après plusieurs essais ayant montré que la nacelle fonctionnait parfaitement après récupération, l'équipe s'en penché sur la source d'alimentation, à savoir dans notre cas des piles alcalines. Durant la conception de l'électronique du ballon, il avait été décidé d'utiliser intensivement la documentation des constructeurs, afin de ne rien laisser au hasard – ce qui a été fait avec les piles. La documentation indiquait qu'avec le nombre de piles utilisées, le ballon avait une autonomie d'au moins 3h30 avant d'avoir une tension trop faible pour alimenter l'électronique et en particulier le KIWI.
De plus, quelques jours avant le lâcher, l'équipe a décidé d'utiliser deux blocs de piles séparés, en raison de la différence de tension d'alimentation entre le KIWI et le reste de l'électronique. Cela a permis de réduire considérablement les pertes par effet Joule lors du passage du régulateur de tension principal. L'autonomie en était donc augmentée.
Or, il s'avère que ce sont bien les piles qui sont responsables de la perte de télémesure. Le KIWI et l'électronique étant alimentés par deux sources de courant différentes, et sachant qu'après 12 km d'altitude la trame KIWI restait perceptible mais trop faible pour être décodée, on peut facilement en déduire que le problème est seulement dû à l'alimentation du KIWI. La trame étant restée perceptible pendant quasiment tout le vol, la partie électronique était encore alimentée et fonctionnait toujours.

Plusieurs facteurs sont responsables de ce problème :

- la documentation du KIWI Millénium indique que celui-ci fonctionne correctement avec une tension d'alimentation de plus de 9v. Or, il s'avère que la puissance d'émission à 9v est bien plus faible qu'à 15v, tension d'alimentation nominale. Sachant que la puissance d'émission du KIWI n'est déjà pas très importante, une si faible puissance ne permet plus la réception sur un vol ballon. Pour les années à venir, il sera nécessaire de conserver une tension d'alimentation au dessus de 12v.
Par ailleurs, il nous semble utile de relativiser la documentation officielle du KIWI qui est non seulement succincte mais parfois erronée, par exemple pour la consommation ou l'amplitude du signal modulant. Ainsi, elle ne peut être considérée comme une documentation d'un constructeur, mais plutôt comme une indication sur laquelle on ne peut se fier totalement, comme cela peut se faire pour d'autres éléments électroniques.
- l'autonomie calculée reste théorique et est valable uniquement pour des piles entièrement chargées. Or, il s'avère que quelques jours avant le lâcher, il s'est produit un court-circuit de quelques secondes sur le bloc d'alimentation du KIWI. Bien que n'ayant pas eu de conséquences immédiates, celui-ci a peut être fait chuter suffisamment la capacité des piles pour que les calculs ne soient plus valables.
A la suite de cet incident, l'équipe a été particulièrement prudente avec les blocs de piles afin d'éviter un autre court-circuit, notamment juste avant le vol. Les piles ont donc été complètement isolées et tous les contacts ont été cachés par du Scotch. Par ailleurs, il était impossible de créer un court-circuit sans élément extérieur, les contacts des deux pôles ne pouvant en aucun cas se toucher.
- enfin, on ne peut négliger l'influence de la température. Des tests en caisson climatique ont montré que les piles étaient particulièrement sensibles aux températures négatives, leur capacité étant très fortement réduite. Cependant, les informations reçues par télémesure montrent que la température à l'intérieur de la nacelle n'est pas très basse lors de la perte de télémesure. Ce facteur peut donc être considéré comme négligeable au regard des deux autres.
- **influence de la sonde de température extérieure** par le polystyrène : bien qu'ayant pu être facilement corrigés par calcul, les informations de température envoyées par le ballon étaient faussées. A l'avenir, il serait souhaitable de faire des essais en caisson climatique avant le vol, et surtout d'éviter le contact de la CTN avec le polystyrène de la nacelle.

- **parasitage du capteur de pression** : ce problème est récurrent sur les projets ballons. Il semble être causé par l'émetteur KIWI Millénium qui rayonne de l'énergie, ajoutant un potentiel à la tension de sortie du capteur de pression. Cette tension étant fortement amplifiée, un faible parasitage suffit pour fausser complètement la mesure de pression. Le blindage mis en place autour du capteur de pression a toutefois permis de limiter le parasitage, ce qui a permis de retrouver la véritable pression à partir de la courbe parasitée. A l'avenir, pour éviter ce genre de problèmes, il sera nécessaire de réaliser un blindage plus important encore, avec une sortie en câble coaxial, ou bien un éloignement plus important du capteur de pression de l'émetteur KIWI.
- **chevauchement des photos** : à l'heure actuelle, aucune explication n'a été trouvée concernant ce problème. Il est très probable que la pellicule a été mal insérée lors du lâcher : à l'avenir, il sera donc préférable de l'installer au calme avant le lâcher. Toutefois, les photos ont été développées et restent très satisfaisantes.

Prix Espace et Industrie 2005

Etant donné la complexité technique du projet – d'autant plus qu'il a été réalisé en 3 semaines seulement – le projet a été présenté aux prix Espace et Industrie 2005 – anciennement prix GIFAS.

Les prix Espace et Industrie sont des aides financières importantes accordées par des industriels du spatial, membres du GIFAS – Groupement des Industriels Français de l'Aéronautique et du Spatial pour promouvoir les réalisations spatiales de jeunes.

Un membre de l'équipe ballon a donc préparé une présentation pour les prix Espace et Industrie 2005, se déroulant le 10 décembre 2005 au musée de l'air et de l'espace du Bourget.

Cette présentation comprenait une présentation PowerPoint, plusieurs posters de grandes dimensions et surtout un petit stand avec exposition du projet ouvert et en fonctionnement.



Le poster de présentation

12 projets participaient à cette édition des prix Espace et Industrie, dont 3 ballons. Cette année, il n'y avait que 7 prix – il est en effet arrivé qu'il y ait plus d'industriels que de projets présentés.

Les autres projets étaient tous des projets réalisés par des clubs espace. Le Furobalex était donc le seul séjour de vacances à présenter un projet.

La présentation a été faite par 2 membres de l'équipe ballon et 2 animateurs du Furobalex, pendant 6 minutes et avec 4 minutes de questions.



Le jury a été particulièrement intéressé par les résultats – bien que partiels – obtenus par Mouiscope.

Il a également été surpris de la complexité du projet pour le très faible temps de réalisation dont disposait l'équipe durant l'été.

L'équipe ballon s'est ainsi vue décerner le prix SNECMA, remis par Jean-Pierre Yribarren.

Au-delà du diplôme, il s'agit de 1000 € dont dispose à présent le Furobalex pour ses projets !

Conclusion – perspectives d’avenir

Malgré la perte de télémesure à 12km d’altitude, on peut raisonnablement considérer que le projet est un succès. En effet, toutes les expériences ont fonctionné convenablement, aucun problème important n’est à déplorer malgré le haut niveau de complexité de l’électronique du ballon. Le ballon a également rapporté de superbes photos de la Terre vue de la stratosphère.

Ce projet est la preuve que même sans budget important et avec une durée de réalisation très limitée, il est possible de réaliser des projets ambitieux – et même de remporter un prix Espace et Industrie !

Mouisoscope marque également une participation plus importante au côté associatif de Planète Sciences. Ainsi, c’est le premier projet du Furobalex pour lequel un compte-rendu complet a été rédigé et est disponible sur le site de Planète Sciences. Le projet Mouisoscope a également participé aux prix Espace et Industrie 2005 au côtés d’autres clubs et écoles d’ingénieurs. Il permettra au Furobalex de disposer d’un budget technique plus important et par là même, de réaliser des projets espace de plus grande envergure, notamment pour les fusées expérimentales qui manquent souvent de matériel en raison de leur coût élevé – par exemple les accéléromètres.

Dans ce contexte, on peut envisager la réalisation de projets encore plus ambitieux, non seulement grâce au budget des prix Espace et Industrie, mais aussi et surtout grâce à l’avancée technique que représente Mouisoscope pour le Furobalex.

Enfin, nous espérons que ce projet permettra une meilleure perception de l’activité ballon qui, notamment au sein du Furobalex, reste marginale par rapport aux fusées expérimentales.

Le vecteur ballon permet en effet la réalisation de projets extrêmement intéressants, car le ballon-sonde est le seul qui permette d’atteindre des altitudes stratosphériques. Il permet d’accéder à la porte de l’espace, à des altitudes où la plus grande partie de l’atmosphère se trouve sous le ballon : les conditions dans lesquelles opèrent les ballons-sondes sont très proches de celles des satellites.

Le vecteur ballon permet également, de par son imprévisibilité, la réalisation de projets techniquement intéressants et avancés. Ce côté technique ne doit pas être négligé, surtout pour les clubs : il ne s’agit pas de projets réalisés pour dire « je l’ai fait ! » mais une réelle formation à la réalisation de projets spatiaux – c’est d’ailleurs l’un des objectifs du CNES en proposant gratuitement son vecteur.

L’équipe déplore donc que certains clubs souhaitent réaliser, sous couvert de science et de performance des expériences, des projets ambitieux avec du matériel déjà réalisé et parfois commercial ; car l’aspect technique est alors complètement négligé.

Au contraire, l’équipe de Mouisoscope n’a pas souhaité utiliser du matériel déjà réalisé. En particulier, nous avons créé notre propre standard de télémesure, avons réalisé nous-même les circuits imprimés, réalisé le logiciel embarqué de toutes pièces et avons conçu le logiciel de réception au sol.

Mouisoscope est la preuve que même une petite équipe de jeunes peut, en seulement 3 semaines, réaliser un projet complet sans matériel ou logiciel préconçu.

Nous espérons donc qu’à l’avenir, les projets ne deviendront pas standardisés et que la réalisation technique ne sera pas prémâchée, ce qui se ferait finalement au détriment de la démarche expérimentale – dans laquelle la technique représente, quoi qu’on en dise, une part importante.

Sans la technique, un projet – même expérimental – n’est rien.

L’équipe ballon 2005 espère ainsi que le Furobalex continuera sur sa lancée et concevra des projets encore plus ambitieux et intéressants, avec une technique encore plus sophistiquée... mais toujours maîtrisée !