

Lancer d'un ballon sonde : 24 avril 1999

par PROJET AURORE
36b, avenue de l'Observatoire - 25000 Besançon
et PAVILLON DES SCIENCES
69, faubourg de Besançon - 25200 Montbéliard
friedt@lpmo.univ-fcomte.fr

RÉSUMÉ

Nous décrivons dans ce document les objectifs et moyens mis en œuvre pour la mesure de données à partir de capteurs placés dans un ballon sonde pouvant atteindre l'altitude de 30 000 m. Le délai de dix semaines pour la préparation des expériences et le budget inférieur à 5000 FF ont limité les capteurs utilisés à des composants commercialement disponibles, simples d'emploi. Les mesures réalisées sont la variation de la pression (altitude), de l'accélération dans les trois directions du ballon (déplacement), de l'orientation du ballon par rapport au champ magnétique terrestre et du rayonnement ultraviolet. De plus, deux appareils photos déclenchés automatiquement et des détecteurs solides de traces nucléaires ont été installés sur la nacelle.

1. MOTIVATIONS ET OBJECTIFS

Deux aspects d'un ballon sonde nous semblent particulièrement intéressants. Tout d'abord, bien entendu, la possibilité d'atteindre une altitude élevée et donc de pouvoir réaliser des mesures dans une atmosphère raréfiée qui s'oppose moins au passage de rayonnements tels que les UV ou les rayons cosmiques (particules de haute énergie d'origine extraterrestre).

D'autre part, la possibilité de suivre un instrument porté par les écoulements dans l'atmosphère nous permet d'envisager la mesure de la dynamique d'un écoulement - turbulent ou laminaire selon les altitudes - à des échelles beaucoup plus importantes que celles accessibles en soufflerie (mètre - centaine de mètres).

2. RÉALISATIONS

Nous avons sélectionné quatre types de capteurs pour réaliser les mesures que nous envisageons : accéléromètres et boussole pour la mesure de la dynamique de l'écoulement, diode UV et détecteur solide de particules nucléaires chargées pour l'étude des rayonnements à haute altitude. Deux capteurs supplémentaires nous servent d'étalon durant l'ascension : un capteur de pression pour une estimation de l'altitude et un appareil photo à déclenchement automatique.

Dans la plupart des cas, l'électronique consiste en une simple adaptation d'impédance et de mise à niveau des signaux fournis par des capteurs commerciaux. Les suiveurs de tension et la mise à niveau des signaux se font au moyen d'amplificateurs opérationnels alimentés de façon asymétrique OP413 (low power precision quad OA) spécialement prévus pour une utilisation sur systèmes embarqués alimentés par batterie.

2.1. Les accéléromètres (*Jean-Michel FRIEDT*)

La première information que nous tentons de mesurer est l'accélération subie par le ballon au cours de son ascension, dans le but d'en déduire les caractéristiques de l'écoulement atmosphérique en fonction de l'altitude. L'hypothèse fondamentale est que le ballon, de dimensions beaucoup plus petites que l'échelle des phénomènes qui nous intéressent, suit les courants aériens (*i.e.* le système {ballon + nacelle} forme une particule solide dans l'écoulement).

Quatre accéléromètres placés à deux coins opposés du ballon, orthogonaux deux à deux, permettent par une mesure différentielle de déduire la vitesse de rotation du ballon et, en sommant leurs sorties, de déduire l'accélération linéaire de la nacelle. L'hypothèse que le ballon est emporté par les courants interdit une mesure directe de la vitesse (par une mesure au fil chaud par exemple). Le temps alloué au développement de la nacelle et le mode de communication utilisé (transmission de valeurs analogiques) ne permet pas l'utilisation simple d'un récepteur GPS. Le choix s'est donc porté sur des capteurs d'accélération Analog Device ADXL0202 comportant deux accéléromètres orthogonaux et fournissant une tension proportionnelle à l'accélération dans une gamme de ± 2 g (utilisation possible jusqu'à ± 4 g). Ces accéléromètres possèdent une très bonne stabilité en température.

La gamme ± 2 g devrait être suffisante dans les directions radiales : la diagonale de notre nacelle étant d'environ 40 cm, la vitesse de rotation correspondant à 2 g est de 2,2 rad/s soit de un tour en trois secondes.

2.2. La boussole (*Jean-Michel FRIEDT*)

Pour pouvoir déduire le déplacement latéral du ballon il est nécessaire de pouvoir ramener les axes des accéléromètres à une direction fixe dans le repère terrestre. L'utilisation d'un capteur de champ magnétique terrestre (capteur magnéto-résistif à un axe intégrant le pont de Wheatstone pour une gamme de mesure de $\pm 2,2$ gauss Honeywell HMC1001) nous donne l'orientation de la nacelle par rapport au champ magnétique terrestre.

L'utilisation d'un amplificateur opérationnel d'instrumentation nous permet de facilement d'obtenir une tension de mesure proportionnelle à la différence de potentiel aux bornes du pont de Wheatstone (différence de potentiel elle-même fonction du champ magnétique appliqué). Le principal problème rencontré lors du développement de la boussole est la sensibilité du composant à un champ magnétique extérieur intense (un petit aimant pour fermeture de placards utilisé comme test des montages électroniques) qui provoque la dépolarisation du matériau magnéto-résistif. L'exposition à un champ magnétique trop intense d'un premier composant a nécessité l'achat d'un second composant correctement étalonné. Pour donner un ordre de grandeur, le champ magnétique d'un aimant permanent de fermeture de placards a été mesuré à 0,7 G à 10 cm, 2,2 G à 5 cm, 10 G à 3 cm et 20 G à 2 cm. Nous constatons donc qu'un tel aimant perturbe rapidement de façon irrémédiable le capteur magnéto-résistif (champ limite pour conserver une précision de mesure de 500 μG : 2 gauss). Ces valeurs sont à comparer aux 0,4 G du champ magnétique terrestre.

2.3. La diode UV (*Jérôme LOPINOT*)

Une diode UV commercialement disponible (Centronic OSD35-7CQ) est utilisée pour mesurer l'intensité lumineuse dans la gamme 200-400 nm (UVA-UVB). Nous nous attendons, vu l'altitude atteinte (30 km), à observer une nette croissance de l'intensité lumineuse UV suite à la traversée d'une grande partie de la couche d'ozone (dont le maximum de concentration se situe à une altitude de 20 km).

La conversion courant-tension et l'amplification des signaux de sortie de la diode UV se fait au moyen d'un demi OP213. La très grande sensibilité de la diode aux longueurs d'onde allant du visible à l'infrarouge impose l'utilisation d'un filtre coupant ces rayonnements et ne laissant passer que l'UV : un tel filtre passe bande entre 200 et 400 nm est disponible chez Optosigma. Une alternative à l'achat de ce filtre relativement coûteux est la soustraction des signaux provenant de deux diodes identiques, une de ces deux diodes étant protégée du rayonnement ultraviolet (par une plaque de verre par exemple). La difficulté d'étalonnage d'un tel système (problème de la transparence du filtre coupe-UV dans le visible et l'infrarouge) nous a décidé à acheter le filtre passe-bande 200-400 nm.

La partie la plus délicate avec la détection de la dose de radiation UV avec l'altitude est une estimation du rayonnement prévu. L'étalonnage, très délicat, n'a d'ailleurs pas été fait correctement comme nous le verrons plus loin.

2.4. La commande de l'appareil photo et du détecteur de particules nucléaires

(Christophe THIEBAUD, Richard VARJABEDIAN, Yann BERTOGLI)

Deux appareils automatiques motorisés (Hanimex FFM 6300) sont embarqués et contrôlés par des servomoteurs eux-mêmes dirigés par un micro-contrôleur PIC 16C84 programmé pour prendre les photos à intervalle de temps régulier lors du vol du ballon. Le temps de pose de l'appareil photo est déterminé mécaniquement (tension d'un ressort dans l'appareil retendu lors de l'avancement de la pellicule) et empêche un déclenchement totalement électronique (par relais par exemple) mais nécessite de simuler l'appui sur le bouton de prise de cliché. Sachant qu'une pellicule photographique devient plus sensible lorsque la température descend, nous optons pour une pellicule de faible sensibilité (100-200 ASA) pour ne pas saturer les photos prises en altitude. L'angle du servomoteur, compris entre 0° et 270° , est déterminé par la largeur d'un pulse envoyé à une fréquence de 50 Hz sur la broche de contrôle. Ce pulse a une durée moyenne de 1,48 ms pour une position au repos avec des extrema à 1,18 ms et 1,85 ms correspondant à peu près à des positions à $\pm 30^\circ$ de la position d'équilibre (valeurs mesurées sur un récepteur de radiomodélisme).

Le mode de programmation d'un servomoteur de type radiomodélisme est très simple et le micro-contrôleur PIC est particulièrement adapté à cette application : des pulses d'une durée de 1,3 à 2,1 ms - pour avoir une large plage angulaire - sont envoyés à une fréquence de 50 Hz à la broche de contrôle du servomoteur. La largeur du pulse détermine l'angle pris par le servomoteur. Les délais sont programmés par des boucles, sachant qu'un cycle d'instruction du contrôleur vaut le quart de la fréquence d'horloge, soit 1 MHz.

Une estimation de la distance de l'horizon visible de l'altitude h du sol se déduit des considérations géométriques suivantes : l'intersection de la tangente à un point sur un cercle de rayon R situé au point de paramètre θ (pour un cercle défini par $(x, y) = (R \cos(\theta), R \sin(\theta))$) avec l'axe de symétrie verticale du cercle à une hauteur h vérifie l'égalité $\cos(\theta) = \frac{R}{R+h}$. Les applications numériques, en prenant pour rayon

de la Terre $R = 6340$ km, intéressantes dans le cas du ballon sonde sont pour des valeurs de $h = 20$ km et $h = 30$ km qui donnent respectivement $\theta = 4,54^\circ$ et $\theta = 5,56^\circ$ et une distance de l'horizon de respectivement 502 km et 615 km. Ces valeurs se comparent avec les valeurs pour la station Mir située à une altitude de l'ordre de 400 km : $\theta = 19,83^\circ$ et donc un horizon à 2195 km.

Sachant de plus que l'ouverture angulaire d'un objectif [1] 28 mm est de $65^\circ \times 45^\circ$ et pour un objectif 35 mm (tel que celui qui équipe notre appareil photo) de $54^\circ \times 38^\circ$, nous pouvons prédire les dimensions de la surface de terrain photographié ainsi que l'angle optimum de l'appareil photo pour minimiser la surface de ciel sur les clichés.

Le même type de mécanisme (servomoteur) déplace une fine feuille de plomb (1 mm) sur le polymère utilisé pour détecter les particules du rayonnement cosmique (polycarbonate d'allyle diglycol ou CR-39 [4-5]) et devait initialement permettre de connaître la densité de particules en fonction de l'altitude (sous hypothèse que la plaque de plomb est capable d'arrêter une particule cosmique). Une étude bibliographique a cependant rapidement révélé qu'il serait impossible d'arrêter systématiquement les particules chargées cosmiques (énergie de l'ordre du $\text{GeV} \cdot \text{u}^{-1}$) et que seules les réactions nucléaires pourraient s'opposer au passage des ions cosmiques.

2.5. Le Détecteur Solide de Traces Nucléaires (DSTN)

Intercalé avec le premier type de DSTN (CR39 TASTRAK Univ. Bristol, épaisseur : 0,9 mm), un second polymère, détecteur solide de traces nucléaires de type LR115 (Kodak Pathé, épaisseur : 12 μm), a été disposé de la façon suivante : nacelle - CR39 - LR115 - CR39 - LR115 - CR39 - LR115 - plaque de plomb - CR39 - LR115. L'ordre a été choisi de façon à soutenir au mieux les plaques de polymères, le LR115 se présentant comme des films fins souples tandis que le CR39 se présente comme une plaque rigide. L'objectif de cet empilement est de pouvoir déduire la trajectoire incidente d'une particule détectée, reconstituée à partir des positions relevées sur les plaques successives.

2.6. Le capteur de pression (Luís BELMAR-LETELIER)

Une jauge de pression disponible commercialement (Honeywell 26PCCFA1D) calibrée entre 0 et 15 psi (0 - 1035 mbar^2), théoriquement compensée en température, est disposée dans la nacelle pour donner une information sur l'altitude atteinte par le ballon et éventuellement comparer le résultat de la double intégration de l'accéléromètre vertical avec la distance parcourue déduite de la pression.

La seule électronique nécessaire autour du capteur de pression 26PCCFA1D utilisé est une conversion du signal de sortie du pont de Wheatstone et sa mise à niveau. Cette opération est réalisée par un amplificateur opérationnel d'instrumentation AD620. Il est à noter qu'une mesure correcte de la sortie d'un pont de Wheatstone (*i.e.* sans perturber le pont par un appel de courant trop élevé) est une opération délicate avec un

1. u^{-1} : par unité de masse atomique - *i.e.* par nucléon.
2. 1 psi (livre par pouce carré) = 68,95 mbar.

amplificateur opérationnel classique (cf. les caractéristiques de l'AD620 qui est en fait un montage de deux suiveurs et d'un amplificateur non-inverseur reliés de façon à permettre une mesure efficace de la sortie d'un pont de Wheatstone). L'AD620 est de plus conçu pour un travail en alimentation unipolaire et sa faible consommation en fait un composant idéal pour les applications embarquées. La figure 1 présente un étalonnage grossier du capteur de pression au moyen d'une trompe à vide munie d'un affichage de la dépression créée. Un offset de 5 cm de mercure en l'absence de dépression est à noter (rappel : la pression atmosphérique moyenne de 1013 mb équivaut à 76 cm de mercure).

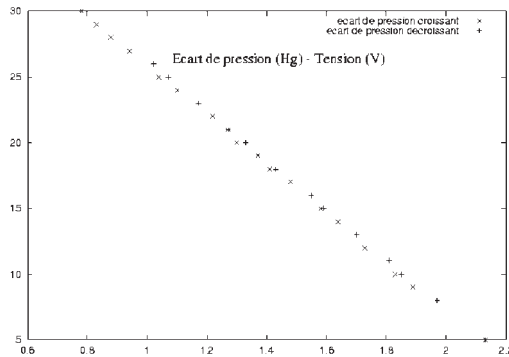


Figure 1 : Étalonnage approximatif du capteur de pression. La réponse linéaire est bien vérifiée. L'axe des ordonnées comporte un offset dû à un défaut du manomètre lié à la trompe à vide.

La relation est linéaire et le capteur ne présente pas d'hystérésis. Le 26PCCFA1D étant prévu pour une mesure différentielle, il a été nécessaire de fixer à une pression constante une des entrées pour effectuer une mesure «absolue» (par rapport à cette référence arbitraire) de la pression lors de l'ascension. Un des embouts a donc été bouché par de la colle époxy par une pression extérieure élevée (jour de beau temps : 1026 mbar).

2.7. La réalisation de la nacelle (Sylvain BERNARD)

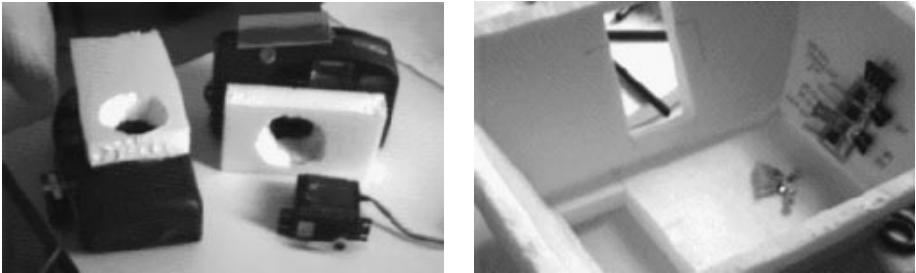


Figure 2 : Méthode de déclenchement et de positionnement des appareils photographiques.

La nacelle a une forme pyramidale tronquée pour limiter l'emprise de l'air sur les bords et ainsi éviter les oscillations du ballon (qui ajouteraient une composante imprévue à l'accélération verticale). La surface de la paroi inférieure est choisie de façon à respecter les contraintes de sécurité de surface par unité de masse.

Les seules contraintes au niveau des emplacements des capteurs viennent des accéléromètres qui doivent être équidistants du centre de la nacelle, et de la diode UV qui doit se trouver sur la face supérieure de la pyramide pour éviter les variations de la surface illuminée que causerait un positionnement sur une des faces de la nacelle avec la rotation de celle-ci.

La face supérieure de la pyramide tronquée est couverte de polymères détecteurs de particules. Des barres de fibres de carbone (prévues comme armature des cerfs-volants Décathlon) de 6 mm de diamètre sont collées sous la base de la pyramide pour supporter celle-ci. Les ficelles reliant la nacelle au ballon sont glissées dans ces tubes. Un trou est pratiqué dans la base de la pyramide pour le passage de l'appareil photo, trou qui est rebouché par du silicone pour l'isolation thermique après installation de l'appareil photo.

Le corps de la nacelle est réalisé en polystyrène «roofmat» de 2 cm d'épaisseur. L'ensemble des joints entre les façades de la nacelle a été réalisé avec de la colle spéciale pour le polystyrène et rendu étanche au moyen de silicone.

Les dimensions de la nacelle ont été déterminées de façon à pouvoir positionner les deux appareils photo sur la face inférieure («fond» de la nacelle : $14 \times 24 \text{ cm}^2$) et telles que les façades latérales soient à 60° de la verticale. Ainsi, un des appareils photographiques est placé horizontalement tandis que le second appareil peut précisément, par construction, être orienté à 60° de la verticale (angle nécessaire pour faire couvrir le plus grand champ possible aux deux appareils combinés).

2.8. Les batteries

Une rapide étude a été menée pour déterminer le type de batteries à embarquer dans la nacelle pour alimenter l'électronique des capteurs. Les quatre principaux facteurs sont la tension d'alimentation, l'intensité consommée, le poids et l'encombrement.

Du fait de l'aspect unique de l'expérience, le choix s'est porté sur des piles alcalines (plutôt que sur des piles rechargeables) de faible coût pour une utilisation unique et une autonomie raisonnable. La tension par batterie est donc imposée à 1,5 V. La courbe de décharge présentée à la figure 3 montre qu'il faut compter en moyenne sur 1 V par

batterie durant le vol, la tension étant réglée aux valeurs voulues (+ 5 V et + 12 V) par des régulateur de tension 7805 et 7812. La tension minimale d'entrée détermine le nombre de piles à embarquer : le 78(L)05 nécessite une tension en entrée entre 7 et 20 V, le 7812 nécessite entre 14,5 et 27 V. Nous alimentons donc le 7805 par sept piles en série et le 7812 par quatorze piles en série. Les principaux consommateurs de courant sont l'émetteur radio (150 mA sous 12 V) et l'offset du capteur de champ magnétique (20 mA sous 5 V). Les amplificateurs opérationnels ont été sélectionnés pour leur faible consommation et les capteurs à base de pont de Wheatstone n'ont qu'une consommation négligeable.

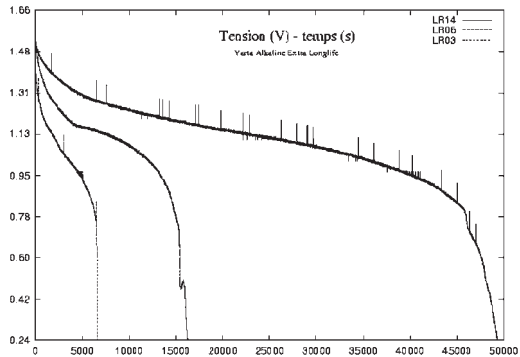


Figure 3 : Courbe de décharge de divers types de piles court-circuitées sur une résistance de puissance de $4,7 \Omega$.

Les courbes de décharge ci-dessus ont été obtenues en court-circuitant une batterie avec une résistance de $4,7 \Omega$ et en observant la tension à ses bornes. Il est à noter que le courant de décharge n'est pas constant - de 300 mA au départ il passe à 200 mA en moyenne - mais est toujours supérieur aux 170 mA prévus.

Il faut noter que les courbes de décharge de toutes les piles sont de la même forme générale, avec un long palier autour de 1,1 V suivi d'une chute brutale vers 0 V.

Les batteries de type LR14 semblent largement sur-dimensionnées (treize heures d'autonomie) compte tenu de leur masse élevée. L'autonomie des piles de type LR06 (quatre heures et demie) semble raisonnable pour notre projet, puisque l'utilisation de piles légères permet d'embarquer un second appareil photo couvrant ainsi un angle de 120° pouvant atteindre l'horizon.

Les alimentations sont divisées en trois paquets indépendants de piles pour garantir le succès d'au moins une partie des expériences, même en cas de court-circuit d'un

des paquets : un ensemble de piles alimente le système {appareils photo et capteur de particules nucléaires} commandé par le micro-contrôleur PIC, un autre ensemble alimente tous les capteurs renvoyant leurs données en temps réel au sol. Le troisième paquet de batteries alimentant l'émetteur à 144,025 MHz (servant de balise) a été rajouté quelques jours avant le lancement et ne comporte pas de régulateur de tension.

Type de pile	Masse (g)	Puissance théorique (Ah)	Autonomie observée (tension > 1 V, s)
R03	10,9	1,175	4 000 (= 1 h 05)
R06	23,2	2,700	12 500 (= 3 h 30)
R14	65,8	7,750	37 000 (= 10 h 15)

Tableau 1 : Résultats de mesures d'autonomie des divers types de piles.

Il est à noter que les rapports de masse, de puissance et d'autonomie donnent toujours la même valeur entre les divers types de piles. Le choix du type de piles utilisées est donc principalement déterminé par la durée de l'expérience et non pas par le rendement de la pile (une fois le choix de l'utilisation de piles alcalines fait). De plus, la puissance théorique est largement surévaluée par rapport à une estimation de la durée de maintien d'une tension supérieure à 1 V lors d'une décharge par un courant moyen de 250 mA (d'un facteur 3 environ).

3. RÉSULTATS

Le lancement du ballon s'est déroulé sans problèmes majeurs le 24 avril 1999 à 11 h 15 par un vent faible et une couverture nuageuse importante. L'émission radio à 137,950 MHz servant à la transmission des résultats des capteurs a cessé dans les premières minutes du vol à cause d'une rupture de la piste reliant l'émetteur à l'antenne. Il semble donc fondamental de correctement fixer l'antenne à la nacelle, et non pas de simplement la faire traverser le polystyrène pour la fixer à une corde. Le régulateur de tension alimentant l'émetteur radio de télémesure et les packs de piles ont tous fonctionné correctement. Un second émetteur à 144,025 MHz, utilisé pour la triangulation de la position du ballon par les groupes de radioamateurs du Doubs et du Territoire de Belfort, a parfaitement fonctionné pendant toute la durée du vol.

Une baisse de niveau du signal de la balise a été observée 1 h 41 min après le lancement. Ce résultat semble indiquer un éclatement du ballon peu avant cette date, compatible avec la dernière photo prise. En effet, la prise de vue a cessé à la vingt-et-unième pose (sur un film de trente-six poses), certainement suite à un dysfonctionnement lié à l'accélération induite par l'éclatement du ballon. Avec un intervalle de temps de 4 min 33 secondes entre deux poses, la vingt-et-unième pose correspond à 1 h 35 min de vol.

Des vitesses ascensionnelles de 5 ou 6 m/s donnent des altitudes, respectivement, de 28 700 m et 34 400 m, dans la plage prévue d'éclatement du ballon.

Il est à noter que le choix des batteries a été correct puisque la chute de tension après réception du ballon a été minimale, malgré la température étonnamment élevée des batteries après utilisation. Le pack de quinze batteries LR6 alimentant l'émetteur Kiwi (137,950 MHz) et les capteurs est passé de 22,36 V à 21,1 V. Le pack de huit batteries LR3 alimentant le PIC et les servomoteurs est passé de 12,75 à 11,8 V. Les piles alimentant les appareils photos étaient quant à elles déchargées, ce qui explique la fin des prises de vues à la vingt-quatrième photo. La tension aux bornes des huit piles LR6 alimentant directement l'émetteur 144,025 MHz n'avaient pas notablement baissé.

La durée totale du vol, estimée par la perte de contact radio, a été de 2 h 30.

3.1. Résultats de la télé-mesure

Les deux minutes de télémesure, interrompue par la déconnexion de l'antenne de l'émetteur embarqué, nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- les montages utilisés étaient certainement très instables en température (affirmation corroborée par d'autres tests), ce qui explique la dérive rapide de la mesure de pression ;
- l'étalonnage n'a pas été fait avec suffisamment d'attention : les gains des accéléromètres n'étaient pas assez élevés tandis que la diode UV a très rapidement saturé.

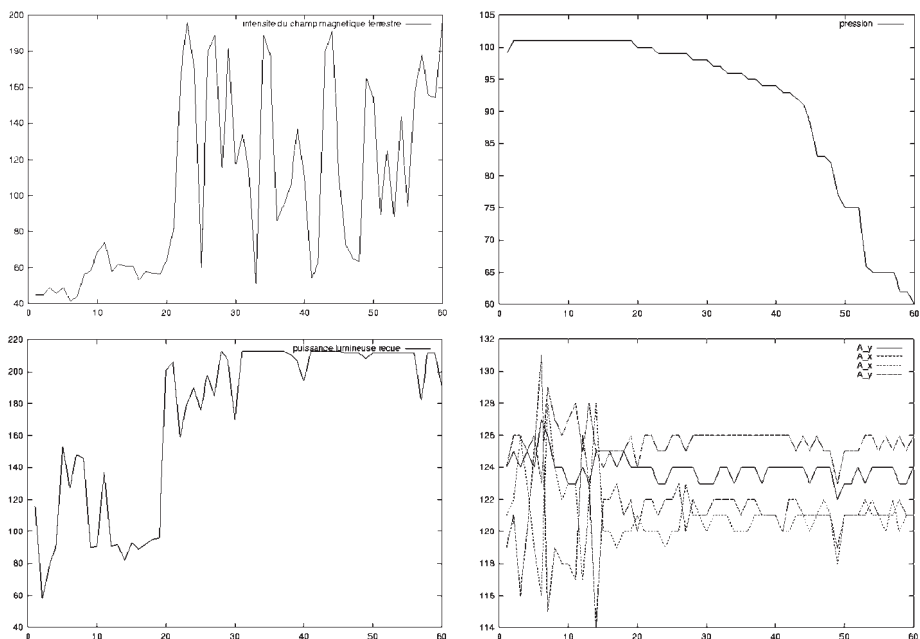


Figure 4 : De gauche à droite et de haut en bas : la boussole, la pression, le capteur d'UV et les accéléromètres.

3.2. Résultats des photographies prises durant le vol



Photo 1 : Vue aérienne de Besançon.



Photo 2 : Vue d'une altitude estimée à 25 000 m.



Photo 3

Photo 4

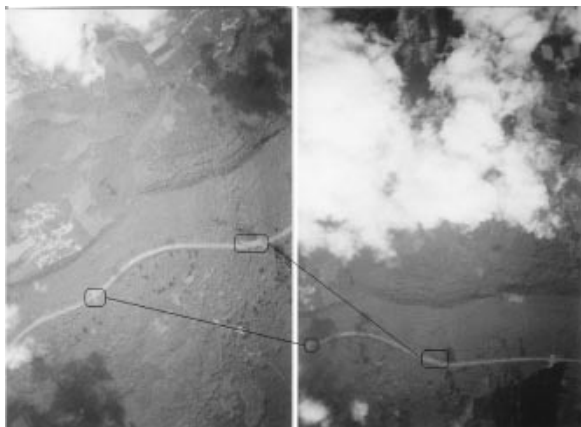


Photo 5

Photo 6

Photos 3 à 6 : Recherche de points communs dans des photographies successives pour identifier des éléments communs et en déduire la vitesse d'ascension. La route visible sur ces photographies est l'auto-route A36-E60 au nord et nord-est de Besançon.

4. DÉTECTION DE PARTICULES COSMIQUES (*François VAGINAY*)

Une des plaques de Détecteurs Solides de Traces Nucléaires (DSTN) CR-39 embarquées sur la face supérieure de la nacelle a été soigneusement analysée par le

Laboratoire de Microanalyse Nucléaire (LMN) de Besançon. Trois traces proviennent de façon irréfutable du passage de particules cosmiques.

4.1. Rappels sur les rayons cosmiques

Les rayons cosmiques [5] auxquelles le CR-39 est sensible sont en fait des particules chargées se déplaçant à très grande vitesse. Ce sont en général des atomes ionisés, allant du simple proton au noyau de fer et au-delà, d'origine solaire ou extra-solaire. Chaque seconde, environ deux cents particules cosmiques avec des énergies de quelques MeV frappent chaque mètre carré de la Terre après avoir subi l'accélération dû aux faibles champs magnétiques existant dans la galaxie ou entre les galaxies.

Le DSTN est un matériau qui a les capacités d'enregistrer le passage d'une particule chargée (ou plusieurs) en son sein. Lorsque la particule chargée traverse le DSTN, cela entraîne des modifications chimiques le long de la trajectoire de la particule, modifications que l'on appelle «trace latente», non-observable car de l'ordre du nanomètre. Afin de visualiser le parcours de la particule dans le DSTN, il est nécessaire d'«agrandir» cette trace latente : cette étape s'appelle le développement chimique (conditions : solution de soude à 7,25 M, chauffée à 70°C).

Il apparaît, d'après les simulations, que plus la perte d'énergie lors du passage de la particule dans le polymère est importante, plus les dégâts dans le polymère sont importants et plus la vitesse d'attaque chimique le long de la trajectoire de la particule est grande. Pour une particule alpha d'énergie 6 MeV par exemple, les calculs indiquent un parcours de 38 μm .

4.2. Étude préliminaire

Les particules alpha présentes dans l'atmosphère possèdent une énergie maximum de l'ordre de 9 MeV, ce qui correspond à un parcours maximal de 72 μm . Connaissant la vitesse d'attaque chimique des polymères lors du développement, il est possible d'établir qu'en cinquante heures de développement les traces de rayonnement alpha d'origine atmosphérique auront été totalement révélées [4].

Les particules d'origine cosmique ont quant à elle une énergie initiale beaucoup plus élevée, de l'ordre de centaines de MeV. Avec une telle énergie, ces particules, si elles frappent le DSTN, ne vont pas être arrêtées comme les particules alpha mais vont le traverser entièrement. La discrimination entre des traces dues à des alphas et d'autres éventuelles dues à des particules cosmiques se fait donc après un développement de cinquante heures : les traces qui ne sont pas surdéveloppées (c'est-à-dire dont le parcours n'a pas été révélé entièrement) ou qui apparaissent de part et d'autre du détecteur sont d'origine cosmique.

4.3. Résultats

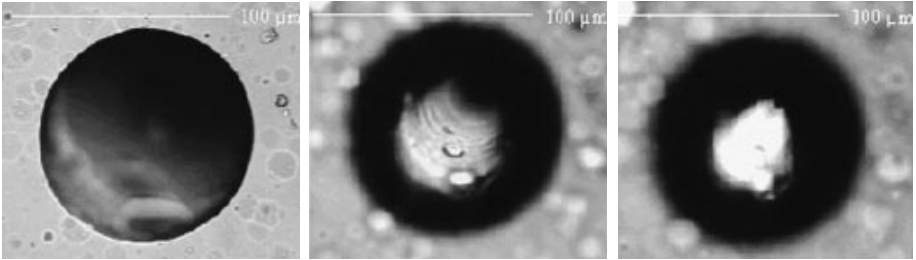


Figure 5 : Images au microscope optique en mode transmission de traces non-surdéveloppées après cinquante heures de développement chimique. La même trace est ici représentée à trois focalisations différentes (*grossissement* : $\times 750$).

Sur les photos de la figure 6 d'une même trace à différentes mises au point nous pouvons discerner, sans difficulté, la trace sur la surface du DSTN ainsi que son vis-à-vis, de l'autre côté du DSTN. Du fait de la diminution d'épaisseur du DSTN après soixante-dix heures de développement (environ $260 \mu\text{m}$) il est maintenant possible de visualiser des traces de particules qui ont traversé le détecteur. Nous pouvons donc affirmer que ces traces proviennent de particules cosmiques.

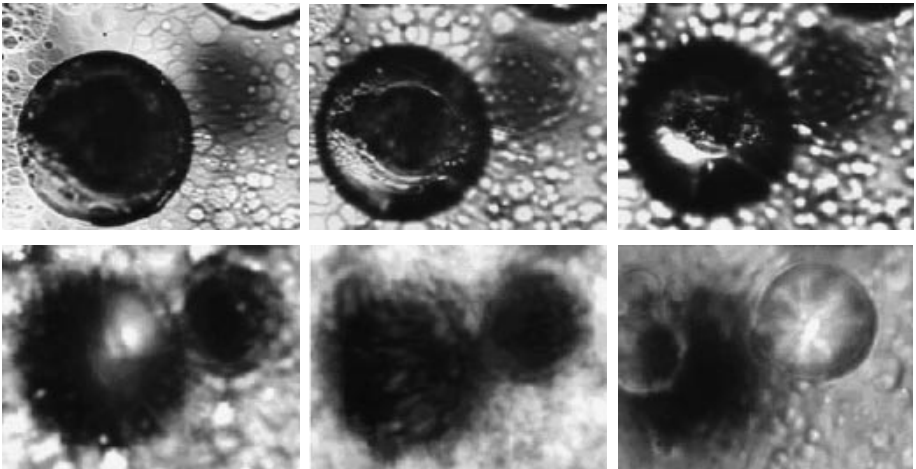


Figure 6 : Images au microscope optique de traces non-surdéveloppées après soixante-dix heures de développement chimique (*grossissement* : $\times 750$).

Les clichés de la figure 7 représentent une même trace pour différentes mises au point. On peut remarquer que lorsque l'on passe de la mise au point sur la surface (gauche) à une mise au point dans le matériau (droite), on voit apparaître un canal (halo blanc) sur la trace du bas qui indique la trajectoire de la particule mais qui prouve également que la trace n'est pas surdéveloppée. D'après ce qui a été dit auparavant, cette trace proviendrait donc d'une particule cosmique. Les deux autres traces plus haut ne possèdent quand à elles pas ce halo blanc et sont dues à des alphas (marque en forme de cuvette qui ne traverse pas la plaque de polymère après développement).

Le cliché de la figure 8 montre la différence entre deux traces surdéveloppées et la trace de particule cosmique (en bas) pour laquelle le canal est visible en blanc selon la mise au point.

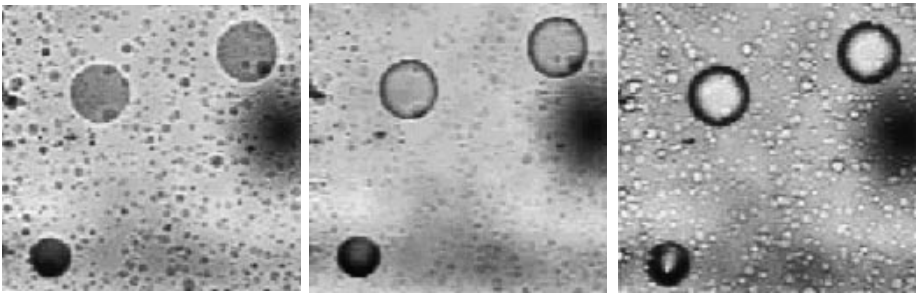


Figure 7 : Images au microscope optique en mode transmission de trois traces après cinquante heures de développement chimique (*grossissement : x150*).

5. PERSPECTIVE

Étant donné l'échec de la mesure de déplacement du ballon par les accéléromètres, il nous semblerait intéressant de réitérer les mesures d'accélération et d'orientation du ballon, et de corrélérer les résultats avec ceux d'un récepteur GPS embarqué. Ce même récepteur GPS devrait considérablement faciliter la récupération de la nacelle à la fin de l'expérience.

Les travaux réalisés depuis la réception du ballon incluent la réalisation d'un émetteur TV qui doit pouvoir être embarqué (la solution adoptée, peu coûteuse, consiste à utiliser un modulateur HF de magnétoscope et une petite caméra de vidéo-surveillance), et un module d'acquisition autonome capable de conserver 32 000 points en RAM. Un tel montage permet de rendre redondantes les acquisitions de données renvoyées au sol et conservées dans le ballon pour être lues après réception du ballon, et rend le nombre de variables mesurées quasiment illimitées vu le faible poids et le faible

encombrement du circuit utilisé (basé sur un 68HC11F1 et une RAM 62256). Ce dernier montage est déjà opérationnel et a été testé avec succès lors de plusieurs types d'acquisitions de données.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le Centre National d'Études Spatiales (CNES), Jean-Pierre GRANDJEAN (Pavillon des Sciences), Christian FERRANDEZ (LPMO) et Michel FROMM (LMN) pour leur collaboration dans ce projet, ainsi que Franck LARDET-VIEUDRIN (LPMO) pour son aide précieuse dans la réalisation de l'émetteur TV.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Patrick MARTINEZ, *Astronomie, le guide de l'observateur*, Tome 2, édition Société d'Astronomie Populaire, 1987.
- [2] *Questions d'atmosphère*, Revue du Palais de la Découverte, avril 1998.
- [3] G. BRASSEUR, *Physique et chimie de l'atmosphère moyenne*, Masson, 1982.
- [4] M. FROMM, P. MEYER et A. CHAMBAUDET, «Ion track etching in isotopic polymers : etched track shape and detection efficiency», *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 107, 337-343, 1996.
- [5] D.P. BHATTACHARYYA, R. MAJUMDAR, B. BASU, P. PAL et M. FUJII, *Estimation of elemental abundances of heavy Cosmic-Ray primaries at the top of the atmosphere using plastic emulsion chamber and the derived source spectrum from the steady-state leaky box model*, *Il Nuovo Cimento*, vol. 18C, num. 2, 1995.