

ATELIER SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Un projet stratosphérique

SAHED YAHY [1]

Mené en partenariat avec le Cnes et le CNRS, ce projet embarque des expériences imaginées par ses participants dans une nacelle emportée par un ballon-sonde. Développé en AST, il fournit de nombreuses possibilités d'exploitation pédagogique, de la seconde au BTS. Un projet vertigineux... aux retombées très positives.

Les activités de projet font partie intégrante de la pédagogie actuelle, du collège à l'université. Au lycée, elles s'intègrent dans les programmes et font l'objet d'évaluations aux examens. Cette approche calquée sur la démarche suivie dans les entreprises se doit de trouver son aboutissement dans la finalisation du travail accompli. Bien que le calendrier scolaire et les répartitions horaires des cours induisent des contraintes fortes, il est important d'aller jusqu'à l'intégration des sous-ensembles élaborés et construits par les élèves et étudiants. Cette partie cruciale de la réalisation d'un système est très enrichissante, car elle révèle de nombreux problèmes cachés lors de la phase d'étude et de développement.

Le choix du projet et ses exploitations

Fort de mon expérience dans le domaine aéronautique et spatial, acquise dans l'industrie, plus particulièrement les bureaux d'études, et dans les laboratoires scientifiques du CNRS, j'ai fait le choix de proposer des activités environnementales autour d'un véhicule expérimental, un ballon-sonde stratosphérique transportant des expériences conçues et réalisées par les élèves afin d'étudier le milieu physico-chimique de l'atmosphère du sol à la stratosphère, aux frontières de l'espace, à travers des conditions climatiques très sévères.

Un tel projet peut se conduire en classe durant les activités de projet, mais des cellules de travail comme les ateliers scientifiques et techniques (AST) sont plus adéquates. Les AST sont des structures pédagogiques officielles déclarées au projet d'établissement sous forme de fiches actions qui sont transmises au rectorat pour approbation. Si le projet est accepté, les établissements reçoivent des moyens financiers et une dotation horaire afin de mener les activités en dehors des heures de classe ; ils peuvent inviter des intervenants afin d'animer les activités conduites par l'enseignant.

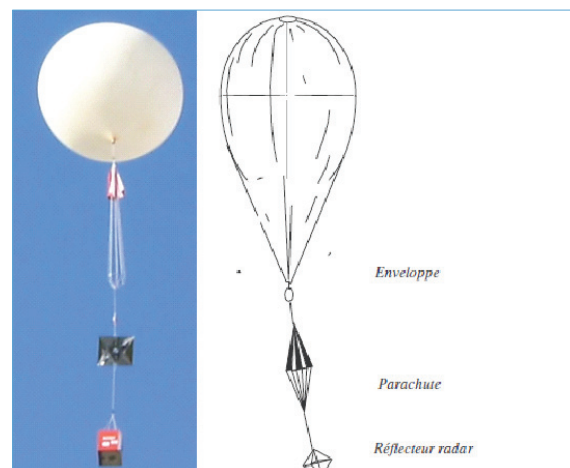
mots-clés
pédagogie,
projet

L'AST2E (espace & environnement) a été créé au sein de mon établissement, le lycée Gustave-Eiffel de Cachan, dans le Val-de-Marne, en 2008. Au début, il a centré ses activités sur l'étude physique et chimique de l'atmosphère. Depuis, nous étudions plus particulièrement le circuit électrique naturel global de l'atmosphère, en mesurant le champ électrique vertical. La vocation aéronautique, spatiale et environnementale de l'AST est d'être un creuset où sont développées une multitude d'expériences servant de supports de projet aux différentes classes prébac ou postbac (projet BTS, TIPE pour les CPGE TSI, projet bac STI2D). Son caractère expérimental laisse place au développement de prototypes permettant l'étude et la recherche de solutions prospectives.

La mise en œuvre et le cahier des charges

Plusieurs approches peuvent être mises en œuvre pour atteindre un objectif commun dans une activité de projet. J'ai choisi quant à moi de laisser à l'élève une part importante de créativité afin d'accentuer son implication et son investissement.

Dans un premier temps, on procède à une mise en situation. La description technique et environnementale du projet et de son milieu apporte aux participants les éléments nécessaires à la réflexion et à la proposition de solutions nouvelles. On présente le véhicule expérimental, une chaîne de vol composée d'une enveloppe gonflée à l'hélium (le ballon), à laquelle est accroché un réflecteur radar et une nacelle contenant le matériel expérimental [1]. Le milieu qui sera étudié est l'environnement atmosphérique du sol à la stratosphère.



[1] Le décollage de la chaîne de vol

[1] Professeur d'électronique au lycée Gustave-Eiffel de Cachan (94).

11. FICHE DE CONTROLES, NACELLE SANS TELEMESURE

Nom du projet : Date de la qualification :/...../.....

Nom du club ou de l'équipe : Signature :

Nom de la personne qui assure la qualification : Signature :

Définition de l'expérience

DEF 1 - Description des objectifs de l'expérience	<input type="checkbox"/> OK	<input type="checkbox"/> OK
DEF 2 - Performances des éléments de la chaîne de mesure	<input type="checkbox"/> OK	
DEF 3 - Interprétation des données étalonnage	<input type="checkbox"/> OK	
DEF 4 - Plans des sous-ensembles électriques et des interconnexions	<input type="checkbox"/> OK	
DEF 5 - Plans interconnexion électrique	<input type="checkbox"/> OK	
DEF 6 - Plans mécaniques de la nacelle	<input type="checkbox"/> OK	
DEF 7 - Délai de déclaration	<input type="checkbox"/> OK	

Expériences embarquées

EX 1 - Pas d'animaux	<input type="checkbox"/> OK	<input type="checkbox"/> OK
EX 2 - Pas d'expérience dangereuse	<input type="checkbox"/> OK	
EX 3 - Pas de largage d'objet sans système de récupération	<input type="checkbox"/> OK	
EX 4 - Protection des sources hautes tensions	<input type="checkbox"/> OK	

Systèmes de stockage des données à bord

TE 1 - Sauvegarde des données à bord	<input type="checkbox"/> OK	<input type="checkbox"/> OK
TE 2 - Etanchéité du système de stockage	<input type="checkbox"/> OK	
TE 3 - Essai de décodage	<input type="checkbox"/> OK	
MES 2 - Etalonnage des mesures	<input type="checkbox"/> OK	

Système de récupération

SR 1 - Présence d'un parachute CNES uniquement	<input type="checkbox"/> OK	<input type="checkbox"/> OK
SR 2 - Masse de l'élément largué < 1 kg	<input type="checkbox"/> OK	
SR 3 - Présence d'un parachute météo uniquement pour largage	<input type="checkbox"/> OK	

Système de localisation

LOC 1 - Présence d'un réflecteur-radar	<input type="checkbox"/> OK	<input type="checkbox"/> OK
LOC 2 - Présence d'un réflecteur-radar sur élément largué	<input type="checkbox"/> OK	
LOC 3 - Conformité des systèmes de localisation par radio	<input type="checkbox"/> OK	
LOC 4 - Essai du système de localisation	<input type="checkbox"/> OK	
LOC 5 - Présence de l'étiquette CNES	<input type="checkbox"/> OK	
LOC 6 - Présence des étiquettes d'identification	<input type="checkbox"/> OK	
LOC 7 - Absence de ballons radioamaturs	<input type="checkbox"/> OK	

Mécanique de la nacelle

MEC1 - Masse de la nacelle inférieure à 2,5 kg	<input type="checkbox"/> OK	<input type="checkbox"/> OK
MEC2 - Dimension > à 30 cm	<input type="checkbox"/> OK	
MEC3 - Masse surfacique < à 13 g/cm ²	<input type="checkbox"/> OK	
MEC4 - Tension de rupture des cordes < 23 kg	<input type="checkbox"/> OK	
MEC5 - Densité des matériaux utilisés	<input type="checkbox"/> OK	
MEC6 - Vitesse ascensionnelle > 4 m/s	<input type="checkbox"/> OK	
MEC7 - Accessibilité du contenu	<input type="checkbox"/> OK	

Systèmes pyrotechniques

PY 1 - Absence de systèmes pyrotechniques	<input type="checkbox"/> OK	<input type="checkbox"/> OK
---	-----------------------------	-----------------------------

2 Un extrait de la fiche de contrôle validée par l'aérotechnicien avant le vol

Les expériences embarquées peuvent avoir un lien direct avec le milieu ou servir de tests de validation des technologies mises en œuvre dans les conditions climatiques extrêmes du vol (température minimale de -70 °C et pression de 20 mbar). Le premier travail demandé aux participants est donc d'imaginer des expériences en rapport de près ou de loin avec le milieu, sans se soucier de leur faisabilité. C'est un brainstorming où les idées qui émergent sont consciencieusement notées par l'enseignant, comme dans certains cercles de qualité. Suit alors l'étape de la crédibilité scientifique et technique et de la faisabilité des idées d'expériences, dont débattent d'abord les participants eux-mêmes. Le ou les encadrants (professeurs) n'ont qu'un rôle d'expertise technique.

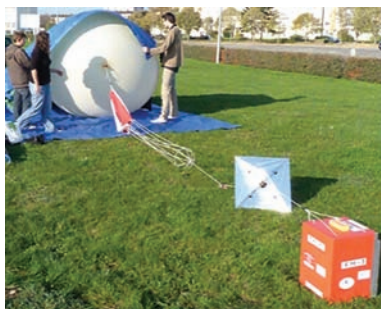
Les idées d'expériences validées peuvent alors passer à la phase développement.

Pour l'élaboration de leurs expériences, les élèves doivent respecter scrupuleusement les règles de sécurité de vol dictées par la réglementation internationale des vols aériens des ballons légers et reprises dans le cahier des charges imposé par le Cnes (Centre national d'études spatiales) et Planète Sciences, relais du Cnes dans chaque région de France. Labouissement du cahier des charges – recueil de prescriptions et de contraintes à respecter – est la fiche de contrôle (*checklist*) vérifiée avant lancement par l'aérotechnicien [2](#). Tous les points mécaniques, électriques et environnementaux sont contrôlés sur site avant le lâcher.

La phase de développement, expérimentale puis technique, nécessite une rigueur scientifique, dont un expert, scientifique de laboratoire ou industriel, peut être le garant. Le soutien de cet expert peut être obtenu et mis en œuvre dans le cadre d'un mécénat, d'une convention ou d'une commande particulière d'instrumentation émanant d'une entreprise. Il est important de savoir que le mécénat scientifique et technologique porté par de grands groupes industriels est accessible aux établissements de formation. Il est source d'enrichissement de l'enseignement à dispenser et favorise l'implication des élèves.

C'est ainsi que l'AST2E a pu répondre à la demande d'un laboratoire du CNRS pour participer à la réalisation d'une instrumentation destinée à mesurer le champ électrique vertical en haute atmosphère. Les élèves répondent alors à un double cahier des charges, celui du lanceur (le Cnes) et celui du partenaire scientifique de l'expérimentation, ce qui favorise l'échange et la discussion entre les différents participants afin de trouver les compromis possibles.

Le temps est compté, un projet de ce type peut se réaliser généralement en quelques mois ou durant l'année scolaire, mais nécessite une planification du travail et des revues de projet afin de résoudre les problèmes d'avancement. Une fois les différentes phases du projet terminées et après l'intégration des expériences, les tests et l'étalonnage de l'instrumentation vient le jour du lancement, dont la date doit être fixée au minimum deux mois à l'avance pour l'obtention des autorisations de vol – une démarche administrative auprès de la DGAC (direction générale de l'Aviation civile) assurée par Planète Sciences. Cette contrainte pousse à une coordination des efforts afin que le planning actualisé tout au long du développement coïncide avec cette échéance. Il n'est pas



3 La phase de préparation de la chaîne de vol après gonflage à l'hélium de l'enveloppe



4 Vue intérieure de la nacelle avec l'enregistreur numérique de données

inhabituel que les derniers jours, comme dans les projets professionnels, on multiplie les heures de travail pour finaliser l'expérimentation et tenir les engagements pris.

Le cahier des charges stipule également des règles très précises à respecter sur les sites de lancement. Si en province le lâcher peut presque s'effectuer dans l'enceinte de l'établissement scolaire, ce n'est pas le cas en région parisienne où le trafic aérien est trop dense. Il nous a donc fallu la quitter pour trouver un site suffisamment grand (de la taille d'un terrain de football)

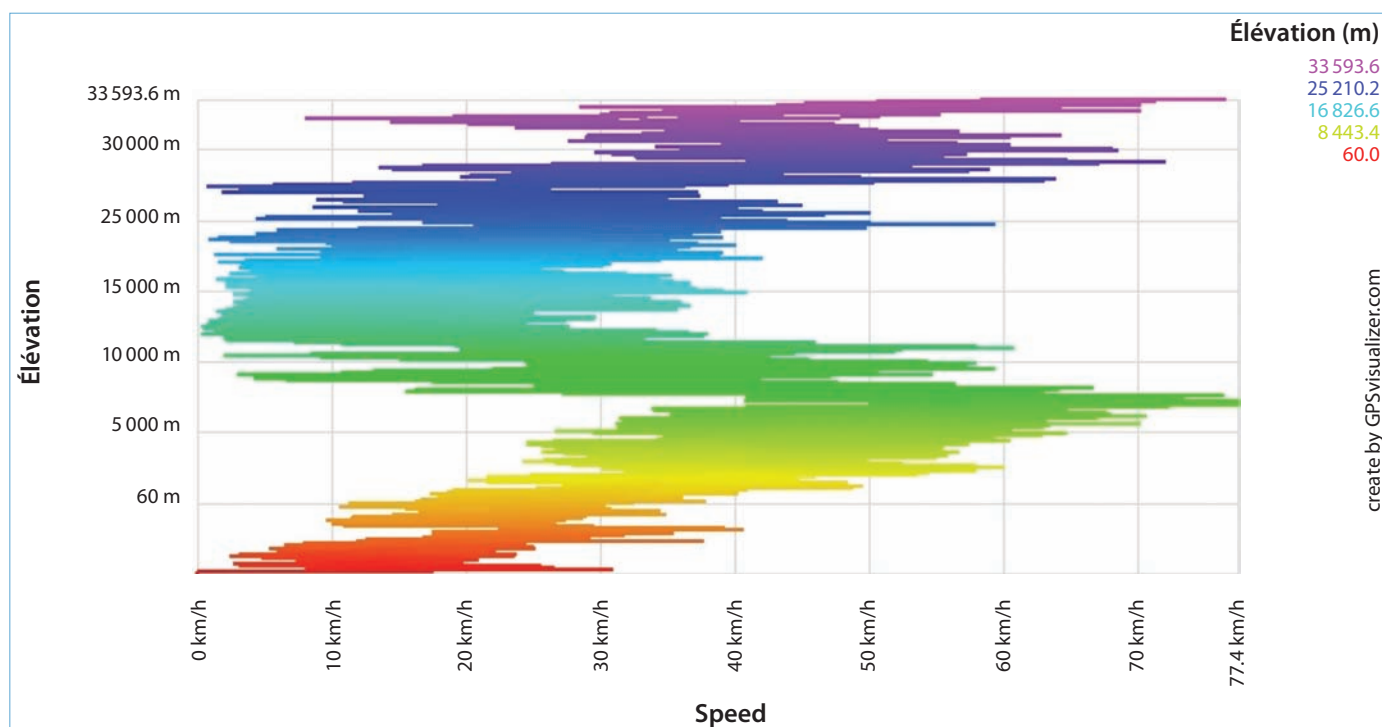
pour accueillir le groupe d'élèves, l'aérotechnicien et le matériel nécessaire **3**.

Une fois l'expérience contrôlée par l'aérotechnicien et la fiche de contrôle remplie, la chronologie – procédure importante – rédigée par les élèves peut débuter : préparatifs de réception des données via la télémesure ; gonflage à l'hélium de l'enveloppe ; lâcher.

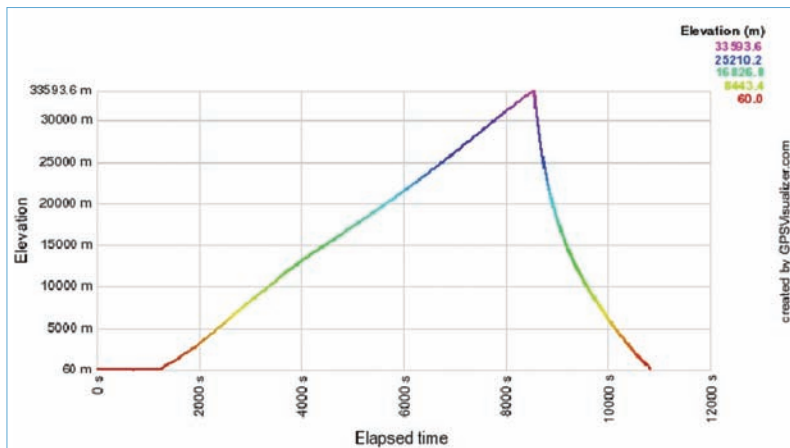
Une journée de lâcher

Nous sommes au printemps et cela fait six mois que les élèves de différents niveaux travaillent à la conception de l'instrumentation d'ENVIAT-3 (Étude des eNVIronnements ATmosphériques) dans le cadre d'un AST. C'est le 3^e vol de ce type. La nacelle de polystyrène est fin prête à recevoir l'instrumentation dotée de capteurs de lumière, d'humidité, de pression, de température, d'un appareil de prise de vue et autres. L'ensemble est maintenant intégré **4**, étalonné, prêt à être lancé avec sa chaîne de vol.

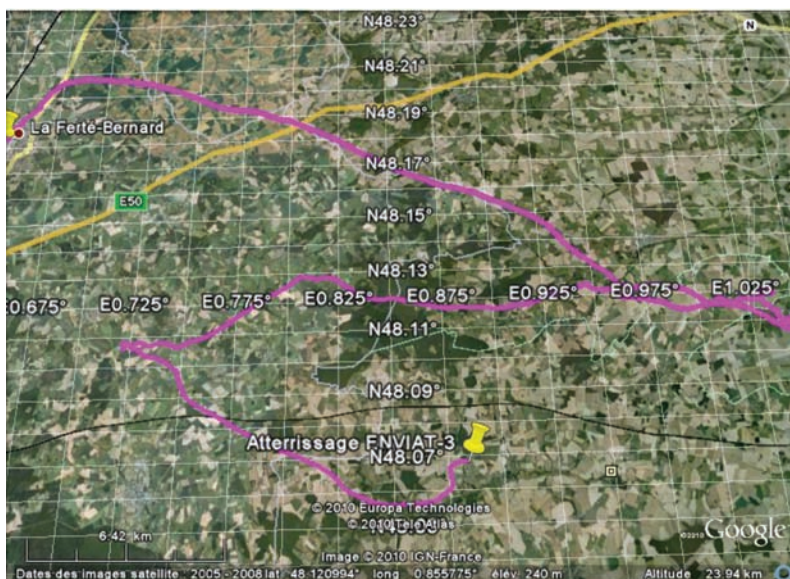
Départ à 9 heures du lycée, direction La Ferté-Bernard, 160 km de trajet en car pour quitter la région parisienne et son trafic aérien. L'équipe d'aérotechniciens de Planète Sciences est déjà sur place. Les vérifications procédurales commencent très vite. Il n'y a pas de télémesure et donc pas besoin d'installer une station de réception des données au sol. Ce dispositif est remplacé par un enregistrement des données à bord (vitesses du vent rencontrées durant le vol, par exemple **5**) et un système de géolocalisation, un traceur GSM-GPS, indiquant la position et l'altitude de la nacelle lorsqu'il est sollicité par SMS **6**.



5 La vitesse des vents en altitude rencontrés durant le vol



6 Profil de vol d'un ballon fermé de 5 mètres cube d'hélium (données du GPS embarqué)



7 Le report des données GPS relevées durant le vol sur Google Earth

Une heure trente plus tard, c'est le lancement, et les élèves voient s'élever avec une certaine fierté leur travail. On peut alors suivre visuellement le ballon pendant un long moment, mais il faut faire vite pour rejoindre le point d'atterrissage, situé à 120 km, déterminé par le logiciel de prédiction de vol. Après trois heures de vol et d'attente, un premier contact par SMS indique que la chaîne de vol, en descente, est près de regagner le sol. Le report des coordonnées sur Google Earth nous permet de rejoindre le point d'impact **7**. Après de longues minutes de recherche, les reflets du réflecteur radar au sol nous indiquent la présence de la chaîne de vol **8**. Les élèves courent pour encercler leur prise. Très vite, la chaîne de vol est chargée dans le véhicule, il est temps de rentrer, il nous reste deux heures de route. Pendant le retour, on ne peut s'empêcher de télécharger le contenu de la carte mémoire SD contenant les données et les prises de vues. Il est 20 heures à l'arrivée au lycée, la mission s'est achevée sur un succès.

L'analyse des résultats

Les causes des dysfonctionnements des expériences des systèmes embarqués dans les nacelles sont multiples ; les problèmes thermiques et les contraintes environnementales très sévères en sont les principales. L'analyse des échecs est très importante et constitue un facteur d'amélioration pour le prochain vol. Les données scientifiques sont analysées, à l'aide de tableurs ou de logiciels tels que Matlab, maintenant disponible dans beaucoup d'établissements ayant des classes de STI2D et particulièrement adapté à ce type de posttraitement. Sa puissance de calcul éprouvée dans les laboratoires et les universités est un atout majeur pour l'exploitation des données et l'analyse parfois complexe des phénomènes physiques.

Les exploitations possibles hors AST

Les AST sont les meilleures structures pour développer ce type d'activités expérimentales et de projets. Ils permettent de concentrer les activités en dehors des heures de cours, mais aussi de trouver un prolongement aux actions pédagogiques plus conventionnelles menées en classe.

Notre expérience nous a prouvé qu'il est parfaitement possible d'utiliser un même support, le ballon stratosphérique expérimental, pour mener des projets avec des élèves de différents niveaux de formation, de la seconde jusqu'au BTS, les notions abordées et le travail demandé étant en adéquation avec le référentiel de chaque classe.

Il est tout à fait possible d'effectuer avec des élèves de seconde un travail d'exploitation de données via un tableur pour tracer des courbes **9** et analyser le profil de la température, de la pression ou de la luminosité en fonction de l'altitude.

On demandera à des élèves de première et terminale STI2D de concevoir des prototypes simples, pour la régulation microprogrammée de température par exemple, des expériences de mesure scientifique de température, pression, luminosité, ou de séquencer des prises de vue durant le vol, d'étudier la propagation du son en fonction de la pression, de capturer des particules polluantes en haute atmosphère, d'étudier la télétransmission des données au sol via la télémesure. Ces études seront menées de manière conjointe avec leur professeur de physique-chimie.

Les sujets proposés en BTS visent plus spécifiquement le traitement microprogrammé de l'information et particulièrement le stockage des données scientifiques à bord, l'amélioration de la géolocalisation par un traceur GPS.

Il n'est pas rare de voir des élèves de sections scientifiques se joindre aux équipes pour apporter un regard plus scientifique sur le phénomène mesuré. L'AST joue alors pleinement son rôle de creuset, et peut fournir des sujets pour les travaux encadrés en S et en CPGE, offrant ainsi une structure d'étude bien établie au sein de l'établissement.



8 La récupération de nuit de la chaîne de vol

Les apports pédagogiques

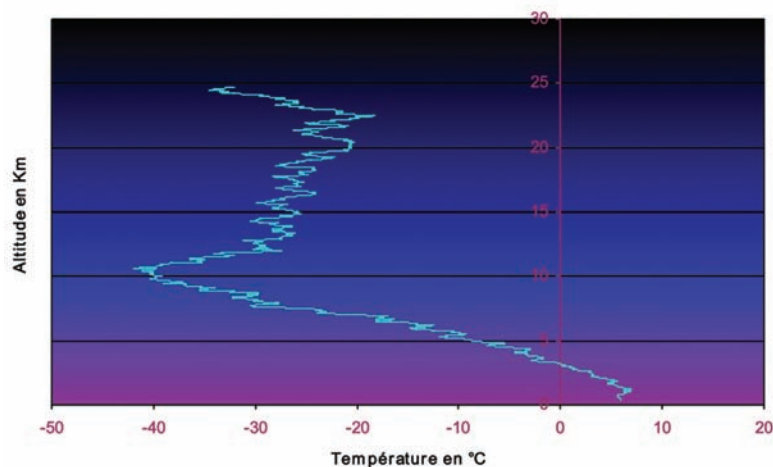
La transversalité d'un tel projet amène de fait les participants à se rapprocher de collègues de disciplines différentes, lorsqu'il s'agit de résoudre des problèmes thermiques ou mécatroniques, voire de collègues moins habitués à l'approche de projet : les problèmes techniques trouvant quelquefois leurs solutions à travers une approche plus fondamentale, le regard des enseignants de physique-chimie ou de mathématiques est toujours très apprécié.

Le travail du professeur encadrant devient très vite celui d'un chef de projet mettant en relation les différents interlocuteurs, y compris le personnel d'administration de l'établissement pour le financement de l'AST, les intervenants extérieurs comme les institutions, les laboratoires, les industriels, les mécènes et les lanceurs aérotechniciens (Cnes, Planète Sciences).

Pour mener ce type d'actions depuis de longues années, je peux dire que cette approche est adaptée à tous les niveaux d'études du secondaire comme du supérieur. Il n'est pas rare de voir s'inscrire à UBPE (« Un Ballon pour l'École ») des classes de lycée ou de collèges, ou même des écoles d'ingénieurs, avec des objectifs plus ambitieux.

Le virage pédagogique amorcé avec l'instauration du bac STI2D est particulièrement intéressant dans l'approche scientifique et environnementale et la transversalité des enseignements qu'il requiert. Le ballon-sonde exploite une grande partie des champs disciplinaires des STI2D, dans les matières techniques (SIN, ITEC, EE, AG), mais sans laisser de côté les disciplines comme la physique-chimie et les mathématiques. Les nouveaux outils logiciels mis à disposition dans les classes de STI2D permettront d'intégrer plus globalement une problématique multidomaine, que ce soient Simscape, Simulink dans la phase de conception ou Matlab pour le traitement des données au sol.

Altitude en fonction de la température extérieure



9 Le tracé du profil de température établi par des élèves de seconde

Les actions de communication

La valorisation des travaux de l'AST est multiple : elle prend la forme de présentations sur stand lors de la fête de la Science, de la Journée académique de valorisation des AST au palais de la Découverte à Paris, des journées portes ouvertes organisées dans l'établissement scolaire, mais fait aussi l'objet de concours. La promotion 2010-2011, constituée d'élèves de première et terminale en génie électronique, a ainsi remporté le grand prix spécial du jury de l'Association française pour le développement de l'enseignement technique (Afdet) pour ses travaux. L'année suivante, les étudiants de BTS Systèmes électroniques ont concouru pour le prix du Groupement des industries françaises aéronautiques et spatiales (Gifas), et ont été sélectionnés pour le projet international des universités européennes de l'ESA (European Space Agency) Bexus 2012 (Balloon Experiments for University Students). La prochaine promotion envisage quant à elle de participer aux Olympiades de physique.

Conclusion

Les structures extérieures à l'établissement scolaire permettant de développer des projets ambitieux existent. Le Cnes et Planète Sciences proposent ainsi une multitude de supports liés au domaine de l'aérospatial. Nous avons commencé notre collaboration avec eux en 2007 par le programme UBPE, des suivis de projet dans l'établissement scolaire et des lancements « clés en main », sans avoir recours à un AST. Nous avons par la suite fédéré les volontés et les ressources présentes dans l'établissement, via une structure de club comme peut l'offrir un AST. Cette structure sert maintenant au développement de projets internationaux dans le domaine des environnements des milieux atmosphériques et permet d'intégrer des étudiants d'universités étrangères. ■