

bant dans le fond marin, les pelotes fécales des salpes alimentent une autre voie, rapide et directe, de recyclage du carbone. En 2009, d'après les mesures de vitesse de défécation de *Salpa thompsoni* effectuées lors de deux croisières à l'Ouest de la péninsule Antarctique en 2004 et 2006, L. Madin et ses collègues ont calculé qu'une population dense de ces salpes, représentant plus de 400 milligrammes par mètre carré de carbone, produit environ 20 milligrammes de carbone par mètre carré et par jour *via* sa matière fécale. Si une partie est mangée, la majorité de cette matière fécale atteint le fond marin, où elle rejoint la couche sédimentaire. Cette couche stocke le carbone en se minéralisant.

Par la taille de leurs « essaims », les salpes, lorsqu'elles meurent, contribuent probablement aussi de façon non négligeable à la fossilisation du carbone dans les sédiments. C'est ce que suggère la découverte de plusieurs dépôts de thaliacés dans les fonds marins durant les dernières décennies, notamment en 2009 par Mario Lebrato, de l'Institut Leibniz de science marine, à Kiel en Allemagne, et ses collègues. Les sal-

pes ayant peu ou pas de prédateurs, leurs dépouilles tombent au fond des océans, où les produits de leur décomposition se minéralisent. Les biologistes ont mesuré que les tissus des thaliacés des dépôts trouvés contenaient un tiers de carbone en poids.

Aujourd'hui, plusieurs équipes dans le monde étudient les caractéristiques des « essaims » de salpes – leur taille, les conditions de leur développement, leur vitesse de croissance en fonction de la température ou de la quantité de phytoplancton disponible, leur évolution selon les saisons – afin de préciser leur impact sur l'écosystème marin. Pourquoi les salpes prennent-elles le dessus certaines années ? Comment régulent-elles leur activité reproductive en fonction de la nourriture disponible ? Peut-on évaluer la quantité de carbone stocké grâce à elles ? De nombreuses questions entourent encore ces organismes, dont même les mécanismes internes n'ont pas livré tous leurs secrets : le mécanisme permettant une production du filet muqueux continue et adaptée à la quantité de nourriture disponible n'a toujours pas été élucidé... ■

■ BIBLIOGRAPHIE

J. D. Everett *et al.*, Three-dimensional structure of a swarm of the salp *Thalia democratica* within a cold-core eddy off southeast Australia, *J. of Geophys. Res.*, vol. 116, C12046, 2011.

K. R. Sutherland *et al.*, Filtration of submicrometer particles by pelagic tunicates, *PNAS*, doi: 10.1073/pnas.1003599107, 2010.

B. Phillips *et al.*, Defecation by *Salpa thompsoni* and its contribution to vertical flux in the Southern Ocean, *Mar. Biol.*, vol. 156, pp. 455-467, 2009.

Q. Bone *et al.*, Tunicate feeding filters, *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, vol. 83, pp. 907-919, 2003.

Q. Bone (sous la dir.), *The Biology of Pelagic Tunicates*, Oxford University Press, 1998.

G. Seguin et J.-C. Braconnot, *Le plancton*, PUF, 1997.



L'association Objectif Science
pour la promotion des sciences et de la technologie
vous propose

Communication offerte par



Vous avez entre 14 et 20 ans
Vous aimez les sciences et la technologie

Participez au concours



Concours sur projet organisé par Sciences à l'École
en partenariat avec la fondation C.Génial



Finale nationale
Palais de la Découverte, Paris

Date limite d'inscription : 16 novembre 2012

Renseignements : www.objectifscience.org

L'astronomie en ballon

Françoise Delcelier-Douchin

L'arsenal des astronomes ne se limite pas aux télescopes terrestres et spatiaux. Les ballons stratosphériques permettent aussi de réaliser des observations précises.

M. Janssen avait prêté à Crocé-Spinelli un petit spectroscopie, en lui indiquant les points à observer. Il s'agissait surtout de savoir ce que devenaient, dans les hautes régions, les deux bandes obscures qui se trouvent à droite et à gauche de la double raie du sodium et qui sont celles de la vapeur d'eau. M. Janssen, qui leur attribue une origine terrestre, pensait que si l'on s'élevait suffisamment haut dans l'atmosphère pour laisser au-dessous de soi presque toute la vapeur d'eau, les bandes devaient devenir tout à fait invisibles.

L'Aéronaute, 1874

Cet extrait de journal publié en mai 1874 décrit la première expérience d'astronomie en ballon conduite à Bar-sur-Seine par les Français Joseph Crocé-Spinelli et Théodore Sivel à bord de l'*Étoile Polaire*. Ces pionniers de l'astronomie en ballon voulaient savoir si l'atmosphère altère les observations du Soleil et des étoiles effectuées depuis le sol. Ils mirent en évidence des effets perturbateurs : certaines longueurs d'onde sont absorbées par l'épaisse couche d'air, et des turbulences empêchent d'obtenir des images nettes. Crocé-Spinelli et Sivel démontraient ainsi l'intérêt de l'astronomie en ballon : en réalisant les observa-

tions au-dessus de l'atmosphère, on éviterait ces perturbations. Mais, en 1875, les deux Français moururent d'hypoxie – un manque d'oxygène – lors d'un vol ayant atteint 8600 mètres d'altitude.

Malgré cet accident, les astronomes ont continué à utiliser les ballons pour étudier le ciel. En 1912, l'Autrichien Victor Hess découvrit l'origine des rayons cosmiques lors de mesures en ballon. Il fut récompensé par le prix Nobel de physique en 1936 pour ces observations, ouvrant la voie à l'étude des astroparticules, domaine de recherche qui utilise, encore aujourd'hui, des ballons pour transporter des instruments de mesure à plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude.

Les ballons modernes utilisés pour les expériences scientifiques n'emportent plus d'équipage et sont contrôlés depuis le sol, mais le principe reste le même : une enveloppe de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes enferme un gaz plus léger que l'air. Une nacelle, contenant des instruments de mesure, est accrochée à des sangles reliées au ballon. Divers progrès réalisés depuis les premiers ballons permettent d'assurer des vols à plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude, sur des durées plus longues

L'ESSENTIEL

■ Les ballons peuvent emporter à plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude des instruments scientifiques. Ils offrent la possibilité de faire des mesures d'astronomie de qualité.

■ L'expérience PILOT, prévue pour 2013, étudiera le rayonnement diffusé par les poussières galactiques.

■ Les missions en ballon présentent une grande fiabilité, une souplesse et une simplicité des opérations de lâcher ainsi qu'une grande complémentarité avec les missions spatiales.

ONIS



et avec une bonne stabilité, ce qui permet de faire des mesures de qualité.

Pour illustrer le fonctionnement des ballons utilisés par les astrophysiciens, nous suivrons le déroulement, de sa préparation à son retour au sol, de l'expérience PILOT (*Polarized Instrument for Long-wavelength Observation of the Tenuous interstellar medium*, ou Instrument polarisé pour les observations à grandes longueurs d'onde de la matière interstellaire ténue), un projet international prévu pour l'année 2013. Cette mission est mise au point par le CNES (Centre national d'études spatiales) qui coordonne le vol et l'IRAP (Institut de recherche en astrophysique et planétologie de Toulouse) qui développe le télescope. L'IAS (Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay) ou encore le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) participent également à ce projet.

Quelques dizaines de vols de ballons à but scientifique sont organisés chaque année par le CNES, la NASA (l'Agence spatiale américaine), ou la JAXA (l'Agence d'exploration aérospatiale japonaise). À noter que l'astronomie n'est pas le seul domaine qui utilise les ballons ; elle représente d'ailleurs une part minoritaire des vols au CNES. La plupart des missions en ballon portent sur la chimie ou la dynamique de l'atmosphère.

Étudier la poussière galactique

Suivant la date à laquelle sera prêt l'instrument PILOT et en fonction de la disponibilité des sites de lâcher, le ballon décollera de la nouvelle base de Timmins dans l'Ontario, au Canada, ou de Kiruna en Suède.

PILOT étudiera le champ magnétique de la galaxie, sa structure, ses interactions avec la poussière interstellaire, ou encore son rôle dans les nuages moléculaires où se forment les étoiles. Il s'agira d'observer la lumière polarisée diffusée par la poussière, dont la distribution spatiale permettra de reconstruire le champ magnétique galactique. En précisant les caractéristiques de ce champ magnétique, il sera possible d'améliorer la connaissance du « fond diffus cosmologique », lequel est étudié, par exemple,

1. OPÉRATION DE GONFLAGE d'un ballon à l'hélium, en vue d'une mission scientifique à plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude.

par le satellite *Planck*. Ce rayonnement émis par l'Univers âgé de quelque 380 000 ans révèle de nombreuses informations sur l'Univers primordial. Les caractéristiques de ces photons indiquent les conditions régnant dans l'Univers jeune, mais les photons émis plus tard se mélangent au flux primordial qui nous parvient et perturbent les observations. Par conséquent, il faut pouvoir séparer les photons du fond diffus cosmologique des photons plus jeunes, dits d'avant-plan. Le rayonnement du fond diffus étant polarisé, il est crucial de connaître les effets de la polarisation dus à la poussière interstellaire.

L'expérience PILOT illustre la complémentarité des missions d'astrophysique en ballon et des missions spatiales : les données recueillies par les premières peuvent servir de précurseurs pour les secondes. Cet exemple n'est pas unique. Ainsi, des instruments sous ballon, tels que *Archeops* (voir l'encadré page 49) ou BOOMERanG, ont établi des cartes du fond diffus cosmologique d'une grande précision. *Archeops* a aussi permis de tester certains détecteurs qui ont été ensuite utilisés par le satellite *Planck*. Dans un autre domaine, l'expérience CREAM (voir l'encadré page 50) effectuera son septième vol en 2012 pour étudier la nature des rayons cosmiques, ce qui est aussi la mission scien-

L'AUTEUR



Françoise DELCELIER-DOUCHIN est ingénieur au Centre spatial de Toulouse du CNES. Elle est responsable du développement des filières aérostatiques.

BIBLIOGRAPHIE

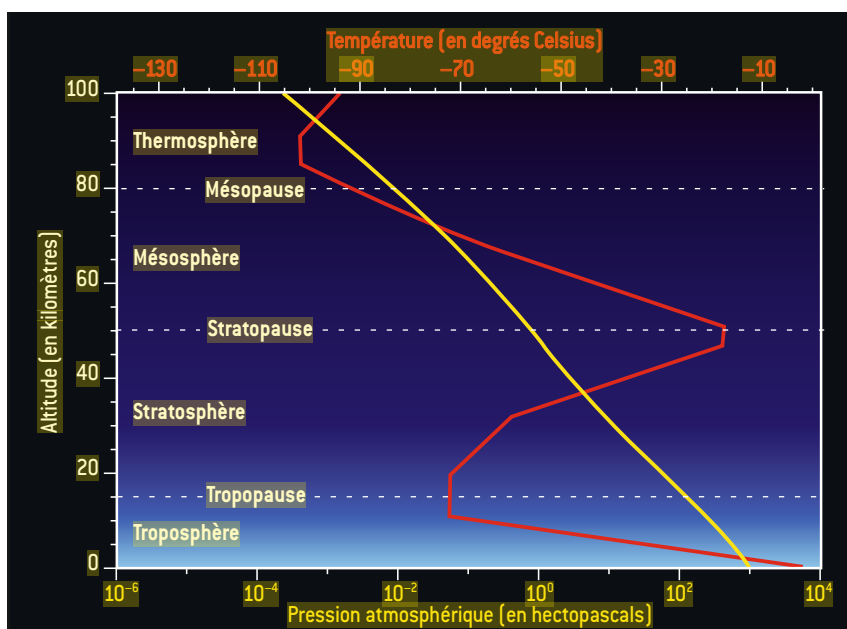
A. Lebeau et J.-P. Sanfourche (sous la dir. de), *Les ballons au service de la recherche ; l'aérostation des origines à nos jours*, E-dite, 2011.

tifique du détecteur AMS installé sur la Station spatiale internationale.

Les astrophysiciens disposent de trois techniques pour réaliser des observations : les grands télescopes au sol, les missions spatiales (sur satellite) et les ballons. Elles présentent toutes des atouts et des limites qui leur sont propres.

Les télescopes au sol ne sont limités ni par le poids ni par la taille, mais par les perturbations créées par l'atmosphère. Les satellites sont positionnés à plusieurs centaines de kilomètres d'altitude et peuvent effectuer des observations en continu sur de très longues périodes (jusqu'à plusieurs années) ; cependant, ces expériences sont lourdes à mettre en place et coûtent cher. Enfin, les ballons – ou aérostats – imposent moins de contraintes mécaniques, telles que la résistance aux accélérations et aux vibrations, que les expériences embarquées sur satellite. La conception ne nécessite que quelques années, contre une dizaine pour une expérience spatiale, avec un coût réduit. De surcroît, à la fin d'un vol, on peut récupérer les instruments scientifiques et les améliorer pour les vols suivants.

En revanche, les missions d'astrophysique en ballon sont limitées par la durée d'un vol – de quelques heures à quelques jours – et par la masse de la charge utile transportée, qui ne peut guère excéder deux tonnes.



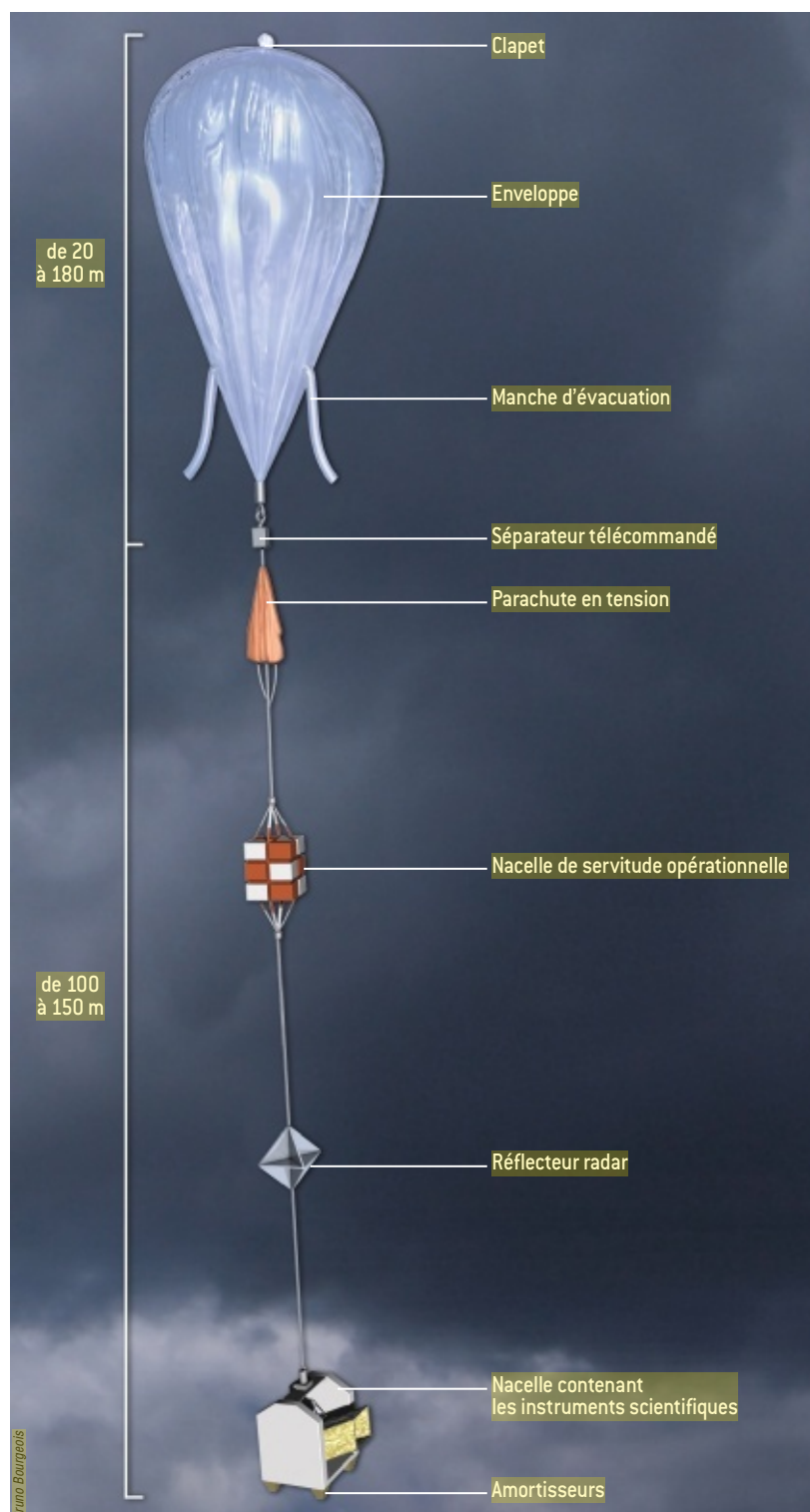
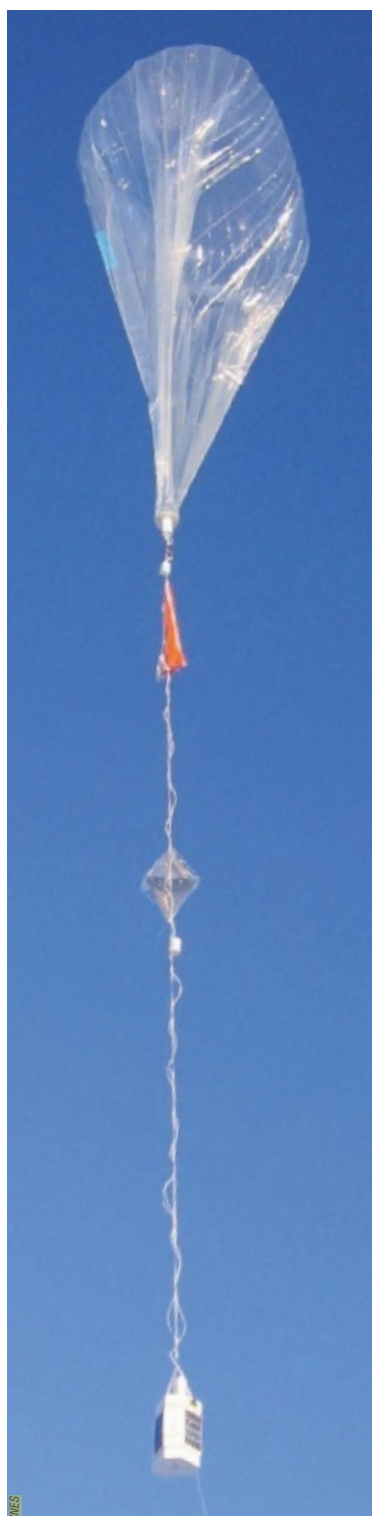
2. PROFIL DE L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE indiquant l'évolution de la pression et de la température. La pression diminue régulièrement depuis le sol. La température diminue avec l'altitude dans la troposphère, puis augmente dans la stratosphère, où l'air est réchauffé par l'absorption des rayons ultraviolets du Soleil.

La météo, élément incontournable de la planification

D'un point de vue technique, pour emporter l'instrument scientifique dans les airs, l'enveloppe du ballon doit contenir un gaz moins dense que l'air, tel l'hydrogène ou l'hélium (suivant le principe d'Archimède). Certains types de ballons, telles les montgolfières à infrarouges utilisées pour des missions scientifiques (très différentes des montgolfières de loisir qui emportent des passagers et volent à basse altitude), ont pour gaz porteur de l'air chauffé contenu dans l'enveloppe.

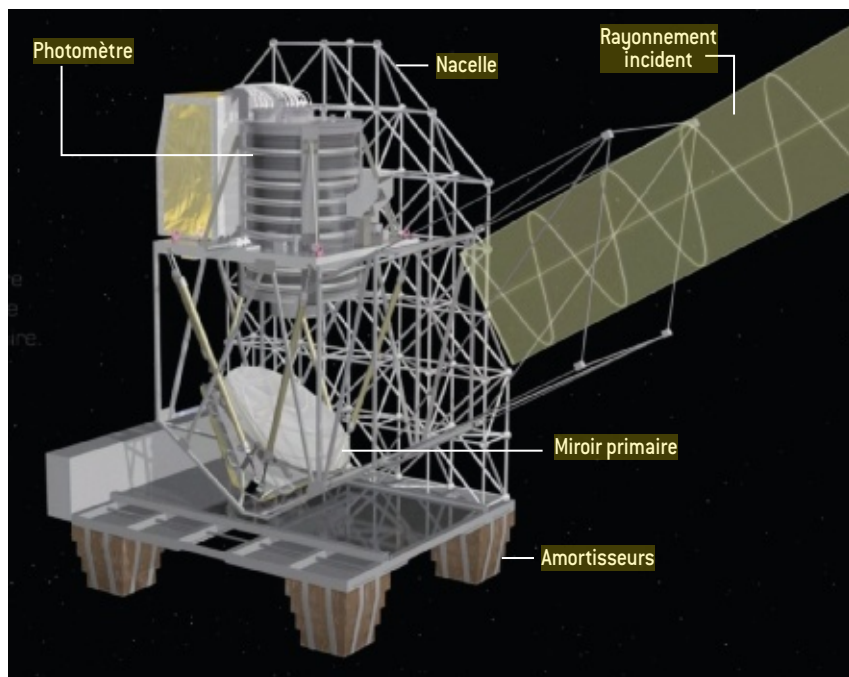
Une fois lâché, l'aérostat s'élève et se déplace en fonction de la vitesse du vent, de la température, de la pression atmosphérique... Il n'est pas possible de contrôler précisément la direction du vol. L'équipe de pilotage au sol peut, tout au plus, influencer sur l'altitude du ballon en larguant plus ou moins de lest et en ouvrant un clapet

LE BALLON STRATOSPHERIQUE OUVERT



Un ballon est constitué de deux éléments principaux : l'enveloppe de polyéthylène, contenant le gaz, et la chaîne de vol, sur laquelle sont accrochés un certain nombre d'éléments tels que le parachute, plusieurs systèmes de signalisation et de positionnement (réflec-

teur radar, balises et un récepteur pour le système de géolocalisation GPS). La nacelle de servitude assure la communication avec le pilote au sol et le transfert des données enregistrées par les instruments embarqués dans la nacelle scientifique.



3. LE TÉLESCOPE DE PILOT EST CONSTITUÉ DE PLUSIEURS ÉLÉMENTS : un baffle (non représenté) protège le miroir primaire de la lumière parasite qui vient d'autres directions et perturbe la mesure. Le miroir, de 83 centimètres de diamètre, renvoie la lumière vers le photomètre placé verticalement au-dessus. Ses détecteurs, des bolomètres refroidis à 300 millikelvins par de l'hélium, transforment le rayonnement électromagnétique en chaleur, qui est ensuite convertie en signal électrique. Des filtres placés à l'avant des détecteurs permettent d'étudier la polarisation du rayonnement à des longueurs d'onde de 240 et 550 micromètres.

d'échappement du gaz placé au sommet du ballon. Il est alors possible de chercher une « veine de vent » dans une couche d'air, plus favorable à la direction souhaitée. Ainsi, la première étape dans la préparation du vol d'un ballon est d'estimer la trajectoire de l'aérostat en fonction des conditions météorologiques. On effectue cette étape environ cinq heures avant le décollage.

Connaître la trajectoire est crucial : la réglementation de l'aviation civile nécessite une coordination aéronautique lorsque le ballon traverse des couloirs aériens, et les règles de sauvegarde du CNES imposent d'éviter les axes de circulation, les agglomérations et les sites industriels comme lieu d'atterrissage. Qui plus est, à la fin de la mission, la nacelle doit se poser dans une région ni trop humide ni trop accidentée, pour que les instruments ne soient pas détériorés et que l'on puisse les récupérer sans trop de difficultés.

Différents types d'aérostats sont utilisés pour des missions scientifiques dans la stratosphère (à plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude). Les plus courants sont le ballon stratosphérique ouvert, le ballon pressurisé stratosphérique et la montgolfière à infrarouges (nous y reviendrons). La

mission PILOT utilisera un ballon stratosphérique ouvert. Ce choix est lié aux exigences de la mission. En effet, l'instrument scientifique pèse 1,1 tonne et doit atteindre une altitude de croisière de 40 kilomètres. La masse à emporter exige un volume de gaz important, ce qui conduit au choix d'une enveloppe d'un volume de 800 000 mètres cubes – environ la moitié du volume occupé par la tour Eiffel.

Préparer le ballon : une opération délicate

Si la météo au sol le permet, les équipes préparent l'aérostat : elles injectent la quantité nécessaire d'hélium dans l'enveloppe et préparent la « chaîne de vol ». Le gonflage du ballon est une opération délicate, car l'enveloppe est très fragile. Elle est constituée de 157 bandes de polyéthylène translucide de 180 mètres de longueur, 2,7 mètres de largeur (au maximum) et de 15 à 25 micromètres d'épaisseur. Les bandes sont soudées à chaud au moyen de rubans, qui assurent l'étanchéité et la tenue mécanique de l'enveloppe. Le polyéthylène utilisé est souple et résiste aux températures très basses qui peuvent régner entre 10 et 20 kilo-

mètres d'altitude, à condition que la vitesse de montée du ballon soit ajustée par le pilote.

Pendant que l'enveloppe est préparée, les éléments de la chaîne de vol, longue d'une centaine de mètres (voir l'encadré page 47) sont assemblés. Plusieurs équipements assurent le signalement du ballon aux autorités aériennes. Un élément important de la chaîne de vol est la nacelle de servitude, qui assure la communication avec le pilote ainsi que le transfert des données enregistrées par l'instrument. Celles-ci sont transmises au sol par liaison radiofréquence à haut débit quand l'aérostat est dans le champ de l'antenne au sol ou *via* un satellite de télécommunication pour les liaisons ne nécessitant pas de haut débit.

À l'extrémité de la chaîne de vol est installée la nacelle PILOT, constituée de barres et de boules d'aluminium. Cette structure, d'environ deux mètres de côté et cinq de hauteur, abrite le télescope (voir la figure 3). Un parachute est placé à l'autre extrémité de la chaîne de vol, près du ballon. À la fin de la mission, le pilote commande la séparation entre l'enveloppe et la chaîne de vol. Le parachute s'ouvre automatiquement pour ralentir la chute de la chaîne de vol, tandis que l'enveloppe redescend seule.

Lors du décollage, pour éviter que la nacelle scientifique soit traînée au sol, celle-ci est suspendue à un système auxiliaire : une grue ou des petits ballons qui suffisent à la soulever du sol. La seconde méthode est privilégiée par le CNES. Quand le ballon principal est lâché, il soulève la chaîne de vol, qui atteint progressivement la position verticale. À ce stade, les ballons auxiliaires se décrochent.

Au départ, le volume de gaz injecté dans l'enveloppe est 100 à 200 fois inférieur à la capacité du ballon. Les ballons stratosphériques ouverts sont équipés de manches à air à la base de l'enveloppe, qui assurent un équilibre de la pression entre l'intérieur et l'extérieur du ballon. La pression atmosphérique diminuant avec l'altitude (voir la figure 2), le volume occupé par l'hélium augmente progressivement (conformément à la loi des gaz parfaits). La taille de l'enveloppe est déterminée en fonction de la quantité de gaz nécessaire pour arracher l'aérostat du sol et l'élever, et en fonction du volume qu'occupera ce gaz à l'altitude maximale où l'instrument effectuera ses mesures.

PILOT atteindra une altitude de 40 kilomètres en deux heures environ. Le ballon traversera la troposphère – la région de l'atmosphère la plus basse dont la limite se situe