

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 ingénieure 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.

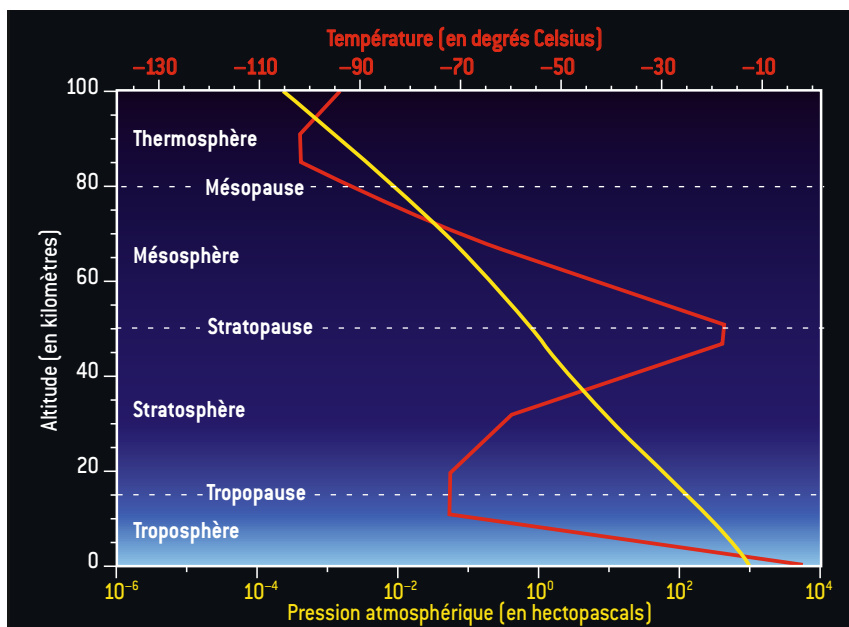
Les télescopes au sol ne sont limités ni par le poids ni par la taille, mais par les perturbations créées par l'atmosphère. Les satellites sont positionnés à plusieurs centaines de kilomètres d'altitude et peuvent effectuer des observations en continu sur de très longues périodes (jusqu'à plusieurs années); 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.

La météo, élément incontournable de la planification

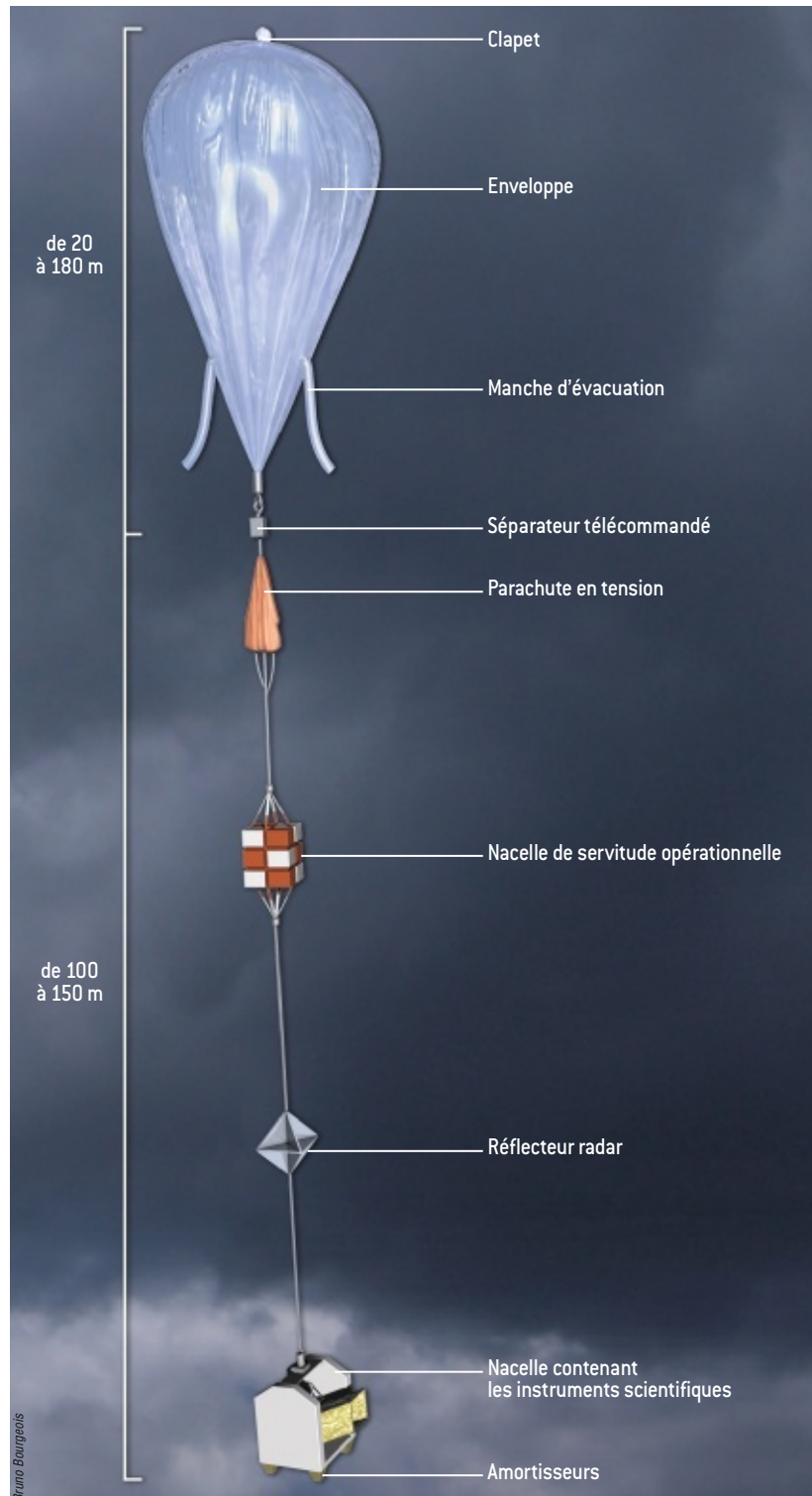
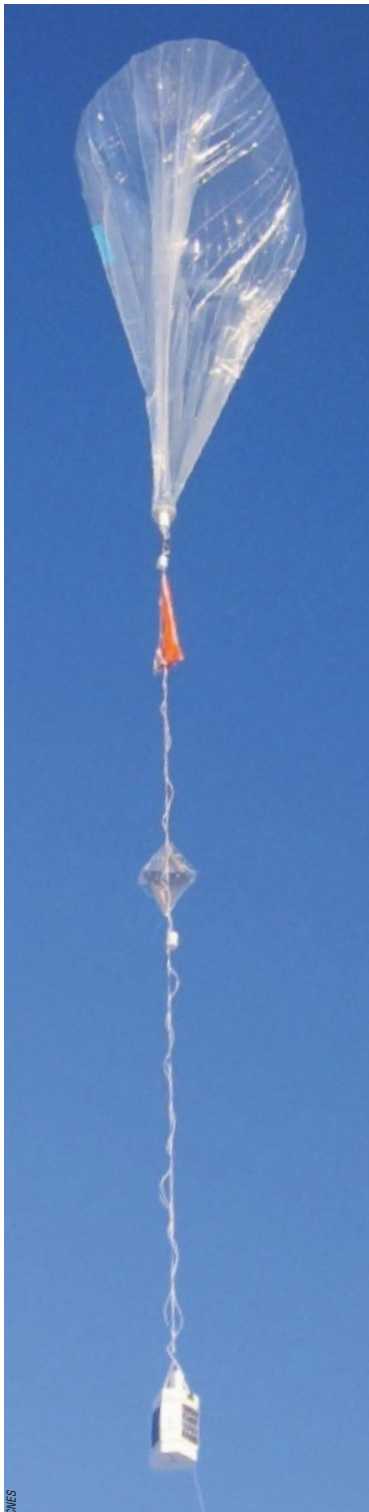
D'un point de vue technique, pour emporter l'instrument scientifique dans les airs, l'enveloppe du ballon doit contenir un gaz moins dense que l'air, tel l'hydrogène ou l'hélium (suivant le principe d'Archimède). Certains types de ballons, telles les montgolfières à infrarouges utilisées pour des missions 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



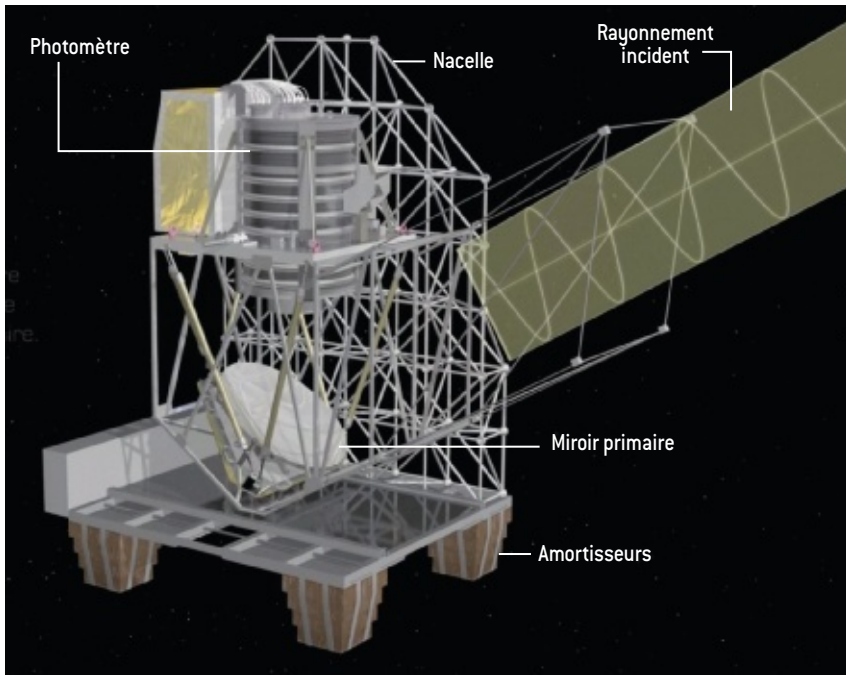
2. PROFIL DE L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE indiquant l'évolution de la pression et de la température. La pression diminue régulièrement depuis le sol. La température diminue avec l'altitude dans la troposphère, puis augmente dans la stratosphère, où l'air est réchauffé par l'absorption des rayons ultraviolets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

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

entre 10 et 20 kilomètres d'altitude –, puis gagnera la stratosphère.

La température diminue dans la troposphère, puis augmente dans la stratosphère, qui absorbe le rayonnement ultraviolet du Soleil et se réchauffe. Lorsque la pression diminue, l'hélium se détend, ce qui le refroidit. Dans certaines zones, l'enveloppe de polyéthylène peut atteindre une température de $-95\text{ }^{\circ}\text{C}$; elle devient alors rigide, cassante et l'ensemble du ballon risque de retomber en chute libre. Le refroidissement est d'autant plus important que l'aérostat s'élève rapidement. Pour ne pas risquer de perdre le ballon le pilote surveille la température et contrôle la vitesse d'ascension en actionnant le clapet, placé au sommet de l'enveloppe, d'où s'échappe du gaz. Inversement, une baisse de la température de l'hélium par rapport à l'air extérieur peut réduire la poussée verticale et stopper le ballon. Le pilote relance alors l'ascension de l'aérostat en larguant du lest, placé dans un bac sur la chaîne de vol.

À l'approche du plafond, le ballon se stabilise après une phase d'oscillations autour de la position d'équilibre. Commence alors l'enregistrement des données.

PILOT étudiera le rayonnement polarisé émis par la poussière interstellaire dans notre Galaxie. Pour reconstruire la structure du champ magnétique galactique à partir de ces mesures, il importe d'obtenir une bonne résolution angulaire. Il faut donc une grande stabilité de l'instrument et un système de positionnement précis.

Stabiliser le télescope

Comment y parvenir alors que le ballon est parfois poussé par des vents de plus de 300 kilomètres par heure? La nacelle, qui accueille l'instrument scientifique, assure ce rôle. Le télescope est fixé sur une plateforme qui est reliée à la nacelle par un système d'axes, de pivots et vérins qui limitent les vibrations et assurent un positionnement avec une résolution inférieure à cinq secondes d'arc (environ $0,0014\text{ degré}$). Un capteur, le « senseur stellaire », ayant la même ligne de visée que l'instrument, compare la position des étoiles visibles dans le ciel avec une carte préenregistrée. Il calcule alors l'orientation de l'instrument et en ajuste la direction.

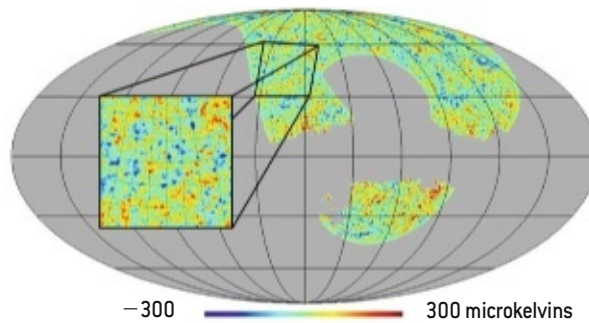
Le premier vol de la mission est programmé pour durer une seule nuit. La prise de données commencera au coucher du soleil et se terminera au lever, car le senseur stellaire ne fonctionne pas le jour. Pourquoi ne pas prolonger le vol sur plusieurs nuits et ainsi collecter davantage de données?

C'est une question de stratégie sur la durée globale du vol: après la première nuit, le Soleil réchauffe l'hélium qui augmente alors de volume; pour ne pas contraindre l'enveloppe par la surpression induite, les ballons ouverts disposent à leur base de manches d'évacuation d'où peut s'échapper le surplus de gaz. La nuit suivante, l'enveloppe contient donc moins de gaz; la poussée d'Archimède étant moins importante, le ballon ne reste pas à l'altitude souhaitée et se stabilise plus bas. Par conséquent, le rayonnement galactique doit traverser une plus grande épaisseur d'atmosphère pour atteindre le détecteur, de sorte qu'il est davantage absorbé que la nuit précédente: les mesures ne seraient pas comparables.

Pour compenser la perte de gaz, on pourrait larguer du lest, mais cela représente une masse notable (six pour cent

ARCHEOPS : UN OBSERVATEUR DU FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE

Le rayonnement du fond diffus cosmologique est une source précieuse d'informations sur l'âge de l'Univers, sa composition et l'origine des grandes structures que sont les galaxies et les amas de galaxies. Cette première lumière émise lorsque les atomes se sont formés, quelque 380 000 ans après le Big Bang, est aujourd'hui dans le domaine des micro-ondes (entre le domaine radio et l'infrarouge) en raison de l'expansion de l'Univers. Elle constitue l'essentiel de l'énergie sous forme de rayonnement dans l'espace, mais il est très difficile de la cartographier en détail. En effet, l'eau de l'atmosphère terrestre absorbe les rayonnements de cette gamme. Il faut donc observer depuis une région où l'air est très sec (en Antarctique par exemple), en ballon stratosphérique ou via un satellite. Embarquer les instruments dans un ballon stratosphérique a été la solution adoptée par les expériences BOOMERANG, MAXIMA et *Archeops* dans les années 2000. Leurs observations du rayonnement fossile



Carte du rayonnement fossile réalisée à partir de 12 heures d'observation par l'expérience *Archeops*. On observe les fluctuations par rapport à la température moyenne de $2,7\text{ kelvins}$.

ont ouvert l'ère de la cosmologie de précision.

Le projet du satellite *Planck*, entrepris par l'Agence spatiale européenne en 1993, prit du retard en raison de l'échec de la mise en orbite de *Cluster* – mission qui devait étudier la magnétosphère terrestre. Les éléments de son instrument haute fréquence (HFI) étaient prêts: les détecteurs américains – bolomètres convertissant le rayonnement en cha-

leur – pour mesurer d'infimes variations de température, le système optique anglais et le dispositif cryogénique français pour refroidir les détecteurs à $0,1\text{ kelvin}$. Ils ont été utilisés pour le projet *Archeops*. Pour cartographier le rayonnement fossile sur une large partie du ciel avec une bonne résolution angulaire, il faut un vol de longue durée permettant d'observer le ciel longtemps, à une altitude stratosphérique pour être au-dessus de

l'atmosphère, de nuit pour ne pas être perturbé par l'émission thermique du Soleil et avec une nacelle en rotation pour que le télescope décrive de grands cercles dans le ciel.

Le troisième vol, le 7 février 2002, a permis d'obtenir une carte de 33 pour cent du ciel en 12 heures d'observations scientifiques. En plus d'avoir confirmé la fiabilité de l'instrument, *Archeops* a fourni des observations précieuses sur la Galaxie et a positionné précisément le premier pic du spectre de puissance angulaire des anisotropies du rayonnement fossile. Ainsi, *Archeops* a montré que la géométrie de l'espace-temps de notre Univers est bien plate, quelques semaines avant les premiers résultats du satellite WMAP qui a fourni une carte complète du fond diffus cosmologique.

Le satellite *Planck* a été lancé en 2009 et l'instrument HFI, très proche de celui de *Archeops*, tient toutes ses promesses.

Cécile Renault
LPSC, Grenoble

CREAM, un ballon pour étudier le rayonnement cosmique

Le rayonnement cosmique, découvert en 1912 par Victor Hess et constitué de particules qui bombardent la Terre, reste l'objet de nombreuses recherches. Comme il interagit avec l'atmosphère, il faut, pour l'étudier, placer les détecteurs à très haute altitude le plus longtemps possible soit dans l'espace, soit au-dessus de l'atmosphère à l'aide d'un ballon.

L'Antarctique est un site privilégié pour réaliser ce type de mission, et ce pour plusieurs raisons. Pendant l'été austral, le vortex polaire, un cyclone de grande taille qui reste localisé au-dessus de l'Antarctique, se met en place pendant toute la saison. Ce courant dominant dans la

haute atmosphère permet de « contrôler » la trajectoire du ballon en orbite autour du pôle. En outre, l'ensoleillement constant en été permet d'alimenter les panneaux solaires du ballon et de maintenir le ballon à une altitude constante sur une longue durée, car les écarts de température sont faibles (42 jours pour le vol CREAM – *Cosmic Ray Energetics and Mass* – de 2005).

CREAM est un instrument visant à étudier la composition du rayonnement cosmique entre 10^{12} et 10^{15} électronvolts. On a ainsi mesuré la charge et l'énergie des particules. Pour estimer cette seconde caractéristique, CREAM comporte

un calorimètre formé d'un ensemble de plaques de tungstène. Les particules qui le traversent y interagissent et se désintègrent en une gerbe de plusieurs particules. Des fibres scintillantes, disposées entre les plaques de tungstène, permettent de détecter l'énergie déposée par une gerbe et, par conséquent, celle de la particule initiale. Pour mesurer la charge des particules, on utilise deux techniques complémentaires et indépendantes : la mesure de l'ionisation dans des plans de silicium et la production de lumière Cherenkov (onde lumineuse produite par une particule qui se déplace, dans un milieu donné, plus rapidement que la

lumière), détectée par un plan de photomultiplicateurs dans le détecteur nommé *CherCam*.

L'expérience CREAM a mis en évidence une abondance d'éléments de très haute énergie (au-dessus de 200 gigaélectronvolts par nucléon) plus importante que celle prévue par les modèles fondés sur des mécanismes standards de formation de ces rayons cosmiques et leur propagation. Ce résultat a été confirmé par d'autres expériences et a conduit à la mise au point de nouvelles expériences pour comprendre les mécanismes qui accélèrent ces particules.

Laurent Derome
LPSC, Grenoble

Des ballons pour explorer les planètes ?

En 1985, deux ballons pressurisés, apportés par les sondes spatiales Vega, ont voyagé dans l'atmosphère de Vénus pendant deux jours à 50 kilomètres de la surface. Tous les corps dotés d'une atmosphère (Mars, Titan, etc.) pourraient être explorés, sur de vastes régions, par des ballons, qui présentent l'avantage d'une grande mobilité par rapport à un véhicule au sol. Cependant, les conditions sont beaucoup plus hostiles que sur Terre avec, par exemple, des nuages d'acide sulfurique sur Vénus et des températures qui peuvent descendre à -170°C sur Titan.

de la masse totale du ballon) à prévoir au départ pour un cycle de 24 heures. Il y a donc un compromis à faire entre la durée du vol et la masse à emporter.

Une façon de s'affranchir du cycle jour-nuit est d'effectuer des vols lors des nuits polaires qui durent plusieurs mois. Le ballon peut voler plusieurs semaines à une altitude constante. L'autonomie du ballon est alors limitée par les réserves d'énergie des batteries qui alimentent les instruments ou encore la perte, par diffusion, du gaz de l'enveloppe.

Une solution consisterait à utiliser des ballons dits pressurisés dont l'enveloppe est fermée. Ils volent pendant plusieurs mois, mais finissent malgré tout par perdre de l'hélium en raison de la porosité, même minime, de l'enveloppe. En outre, il est aujourd'hui inenvisageable de concevoir des ballons fermés aussi grands que les ballons ouverts. Les ballons pressurisés du CNES, dont le diamètre est compris entre 8 et 12 mètres, atteignent au maximum 20 kilomètres d'altitude pour une charge utile d'environ 50 kilogrammes (ce qui est insuffisant pour les appareils d'observation utilisés en astrophysique).

Enfin, les montgolfières dites infrarouges, développées par le CNES dans les années 1970, sont aussi capables de réaliser des vols de longue durée. Elles ont une enveloppe ouverte contenant un peu d'hélium pour décoller, qui est ensuite remplacé par de l'air. Elles fonctionnent à deux altitudes : 20 kilomètres la nuit et 30 le jour. La partie supérieure du ballon est

recouverte d'une couche d'aluminium, qui permet au rayonnement solaire de réchauffer l'air dans le ballon le jour. La nuit, la Terre émet un rayonnement infrarouge qui limite son refroidissement et maintient le ballon à son altitude de vol basse. Là encore, la charge ne peut actuellement pas excéder 60 kilogrammes.

Retour sur Terre

L'équipe de pilotage désignera le site d'atterrissage le plus favorable en fonction de la trajectoire du ballon, des données météorologiques, de la configuration du sol et des conditions drastiques de sauvegarde. Les éléments de la chaîne de vol seront récupérés, et notamment la nacelle emportant l'instrument. Les équipes scientifiques commenceront alors à dépouiller les données.

Les ballons sont des véhicules efficaces pour effectuer des observations en astrophysique et en cosmologie : la conception ne prend que quelques années, la bonne maîtrise des opérations de lâcher et leur fiabilité pour des coûts réduits en sont quelques atouts. Le développement d'aérostats capables de voler plusieurs jours, voire quelques semaines, ou de transporter des instruments de plus en plus lourds, est un enjeu majeur pour les futures missions. L'amélioration des performances des ballons stratosphériques ouverts, mais aussi des ballons pressurisés et des montgolfières infrarouges, est à l'étude pour mieux répondre aux contraintes des expériences volant dans la stratosphère. ■