

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°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 $0,0014^{\circ}$). 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.

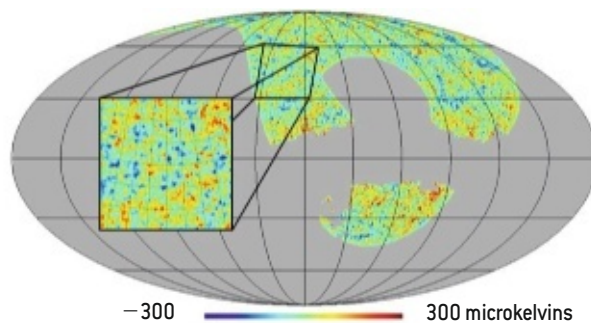
Le premier vol de la mission est programmé pour durer une seule nuit. La prise de données commencera au coucher du soleil et se terminera au lever, car le senseur stellaire ne fonctionne pas le jour. Pourquoi ne pas prolonger le vol sur plusieurs nuits et ainsi collecter davantage de données ?

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 représenterait 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 $2,7$ 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 $0,1$ 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'aérstats 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. ■