

régions polaires, dans un jour ou une nuit très longs : en pratique, les ballons restent alors en l'air pendant deux à trois semaines.

Lorsqu'une expérience embarquée à bord d'un ballon est achevée, une commande transmise par radio sépare le ballon de sa charge utile, qui redescend en parachute pour être récupérée et, souvent, réutilisée. Le ballon est jeté quand il retombe ensuite.

Une durée de vol prolongée

Pour les vols de longue durée dans l'atmosphère terrestre, et pour les ballons interplanétaires, les chercheurs ont besoin de performances bien supérieures. Avec son projet ULDB, lancé en 1997, le Bureau des sciences spatiales de la NASA a voulu créer un ballon qui volera jusqu'à 100 jours au-dessus de 99 pour cent de l'atmosphère de la Terre. L'ULDB est un ballon pressurisé, ou ballon «fermé», qui n'évacue pas de gaz dans l'atmosphère comme les ballons classiques. Habituellement fabriqués en matériaux résistants, tel le polyester, les ballons pressurisés sont gonflés comme les ballons ouverts, puis ils sont scellés. Une fois qu'un ballon a atteint l'altitude désirée, la chaleur du Soleil fait augmenter la pression interne ; puis, la nuit, le gaz se refroidit et, de cette façon, le ballon reste plein et se maintient à une altitude constante, sans que l'on ait à le délester. Le ballon reste en l'air tant qu'il est imperméable aux molécules d'hélium ou d'hydrogène. On peut donc utiliser les ballons pressurisés pour des vols plus longs qu'avec les systèmes ouverts.

Au cours des vols de longue durée, les ballons volent dans des conditions variées : au-dessus des océans, des déserts ou des calottes polaires... Les matériaux dont ils sont constitués doivent être à la fois résistants et adaptables. Par exemple, ils doivent résister aux ruptures, aux déchirures et aux perforations, à la dégradation par les rayons ultraviolets. De petits ballons sphériques pressurisés dont l'enveloppe était un film de polyester ont volé jusqu'à plusieurs centaines de jours à basse altitude. Dans les années 1970, des ingénieurs ont cherché à construire des ballons plus gros, afin d'embarquer des charges utiles à très haute altitude, mais la faible résistance aux déchirures des films de polyester a limité les performances des ballons pressurisés.

Les responsables du projet ULDB ont calculé qu'un matériau composite réunissant les propriétés de plusieurs matériaux permettrait des vols de quelques mois. De nombreux matériaux ont été testés : des films, des tissus et des non-tissés (comme dans le papier, des fibres sont réunies par élimination d'un solvant), des tissus multicouches. Les matériaux étudiés étaient le polyester, le polyéthylène, le nylon, le polypropylène, le polyuréthane et des composites de ces divers matériaux. Le composite finalement retenu comprend trois couches : un tissu de polyester de haute ténacité fabriqué au Japon, un film de polyester et un film de polyéthylène. Le film de polyester bloque l'hélium ; le tissu en polyester confère au composite sa résistance ; le polyéthylène est imperméable au gaz, résiste aux perforations et accroît la soli-

dité de l'ensemble. Le tissu et le film en polyester résistent assez bien aux rayonnements ultraviolets. Les trois constituants sont assemblés par un liant léger qui compense les défauts de tissage et les défauts des trois couches. Le résultat final est un matériau d'une densité de 55 grammes par mètre carré, qui présente une résistance à la rupture de 2 600 newtons par mètre.

Toutefois les ingénieurs ont décidé qu'un nouveau matériau ne suffirait pas à allonger beaucoup les vols, dans des conditions difficiles et changeantes. Une nouvelle conception s'imposait. Se fondant sur des études effectuées au CNES, aux États-Unis et au Japon, les ingénieurs du projet ULDB ont préféré une forme de potiron à la classique forme sphérique de la plupart des ballons pressurisés. Les ballons sphériques sont soumis à des contraintes le long des



Jana Brenning



Avec l'amable autorisation de Raven Industries, Inc.

4. L'ENVELOPPE DU BALLON ULDB, dont le lancement est prévu en décembre 2001, est composée de trois couches (en haut). Le tissu en polyester confère la résistance ; le film de polyester empêche les fuites d'hélium ; enfin le film de polyéthylène accroît encore l'imperméabilité au gaz et la solidité. La photographie inférieure montre l'assemblage final d'un petit prototype qui sera construit comme le ballon ULDB et qui volera cette année.

méridiens et de la circonférence ; c'est l'enveloppe qui supporte la charge. Un ballon en forme de potiron doit plutôt sa résistance aux nervures (alors renforcées) qui relient les différents «fuseaux» du ballon. Avec la forme de potiron, l'enveloppe peut être moins résistante : une résistance à la rupture de seulement 600 newtons par mètre suffit (c'est bien inférieur à la limite d'élasticité du composite). Ce gain est important, car la contrainte qui s'exerce le long de la circonférence est le produit de la pression par le rayon local des fuseaux du potiron ; la taille totale du ballon n'intervient pas dans la détermination de la contrainte qui s'exerce sur l'enveloppe.

Lorsque le ballon s'élèvera, l'enregistreur d'éléments lourds TIGER mesurera, dans les rayons cosmiques, l'abondance des éléments chimiques de numéro atomique compris entre 26 (pour le fer) et 40 (pour le zirconium), à des énergies supérieures à 300 millions d'électronvolts par nucléon (les nucléons sont les particules constitutives des noyaux d'atome : protons et neutrons). Ce ne sera pas la première fois que les ballons contribueront à l'étude des rayons cosmiques : les rayons cosmiques et le rayonnement gamma cosmique, ainsi que la stratosphère elle-même, ont été découverts par des instruments embarqués à bord de bal-

lons. Tous ces rayonnements intéressent beaucoup les physiciens et les astronomes, car ils révèlent la nature de la matière libérée par les supernovae ou apparue dans le milieu interstellaire.

La mission TIGER devrait ensuite se poursuivre à l'aide de télescopes optiques et infrarouges, qui rechercheront des planètes extrasolaires ou fourniront des images du Soleil ou d'autres étoiles ; à l'aide de télescopes détectant les rayons X durs, on explorera les rayonnements gamma, le rayonnement cosmique et le rayonnement électromagnétique. Enfin, on envisage même des expériences de chimie dans la stratosphère.

Le ballon pressurisé lobé et la montgolfière infrarouge

À la fin des années 1970, le Centre national d'études spatiales (CNES) a mis au point, dans le cadre du Projet Ballons Pressurisés Stratosphériques (BPS), un nouveau concept de ballon dit «lobé» ou encore «potiron», par référence à sa forme. Le projet BPS, mis en œuvre à la demande



des spécialistes de la stratosphère, avait pour objectif la réalisation de vols stratosphériques de longue durée (trois mois) avec des charges de 50 à 100 kilogrammes. Le concept de ballon «potiron» a été validé dans le cadre d'une campagne qui s'est déroulée à partir de Prétoria (Afrique du Sud) en 1978 : les cinq ballons, d'un diamètre moyen de huit mètres, ont volé pendant plus de 100 jours autour de la Terre à une altitude de 16 kilomètres, conformément aux objectifs. À l'occasion de cette campagne, une première mondiale a été réalisée avec des vols de ballons effectuant pour la première fois plusieurs tours du monde !

Inventé par nos collègues Michel Rougeron et Jacques Simon, le concept de ballon lobé a été breveté en France, en Europe et aux États-Unis.

Cependant, dès 1977, des scientifiques du CNES ont proposé d'utiliser un principe techniquement plus simple, celui des montgolfières, pour réaliser des missions de longue durée dans la stratosphère : la portance est alors assurée par de l'air chaud et non plus par un gaz léger. Le concept de la Montgolfière Infra Rouge (MIR) utilise ainsi l'énergie du rayonnement solaire, le jour, et le rayonnement infrarouge émis par la Terre, la nuit, pour réchauffer l'air qui se trouve à l'intérieur du ballon. Pour optimiser l'énergie captée par le ballon et, donc, sa portance, la partie supérieure de l'enveloppe du ballon est en matériau aluminisé ; la partie inférieure du ballon, transparente, absorbe le maximum de rayonnement infrarouge la nuit. Du fait de la différence de températures entre le jour et la nuit, la MIR vole à 28 kilomètres d'altitude le jour et à 18 kilomètres la nuit. Elle emporte des charges de 50 à 100 kilogrammes. La durée de vol record réalisée par une MIR est de 69 jours et plus de deux tours du monde. Aujourd'hui, ce type de ballon est régulièrement utilisé par les scientifiques français et européens.

Jacques SIMON, Direction des Programmes et des Affaires Industrielles du CNES
Itziar SADOURNY, Coordination des Programmes Ballons au CNES

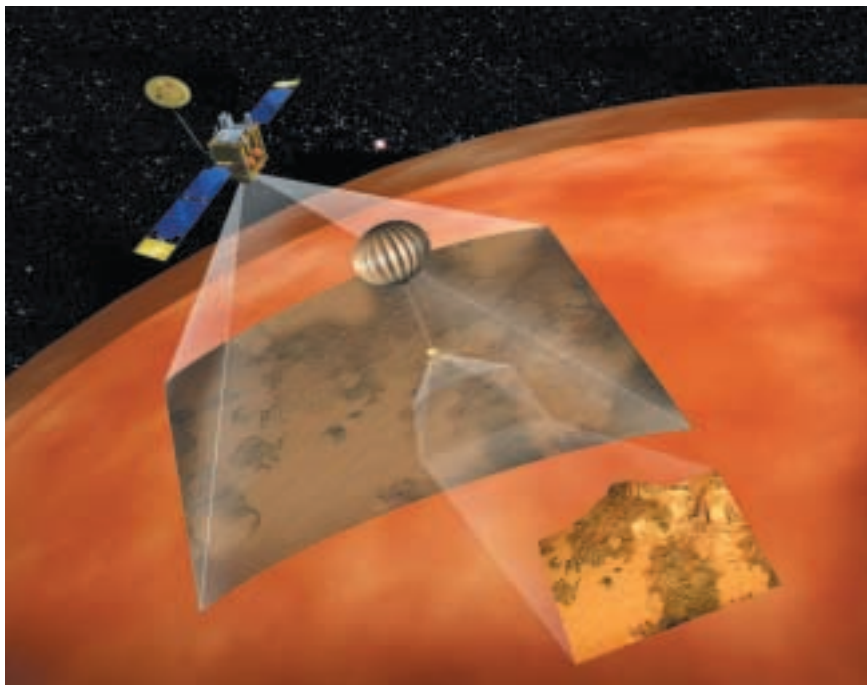
L'exploration en ballon d'autres planètes

Les équipes du projet ULDB prévoient de réutiliser le savoir-faire obtenu pour l'exploration ultérieure d'autres planètes. Six planètes ont une atmosphère qui supporterait des ballons : Mars, Vénus, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune ; Titan, l'une des neuf lunes de Saturne, pourrait également être exploré par ce moyen. Toutefois les difficultés sont particulières dans chaque cas. Les planétologues espèrent que des ballons pourront servir de plateformes peu coûteuses pour étudier la composition et la circulation de ces atmosphères, ainsi que pour observer la surface des planètes. Ils peuvent également servir de plateformes de lancement de drones d'exploration : certains prélèveraient des échantillons qui seraient ensuite rapportés sur la Terre, où ils seraient analysés.

L'atmosphère de Mars sera sans doute la première que l'on explorera ainsi. La densité atmosphérique au sol est voisine de celle de la stratosphère terrestre. Aussi, un ballon évoluant à quelques kilomètres seulement au-dessus de la surface de Mars doit être pressurisé.

Quel est l'intérêt d'un ballon par rapport aux autres moyens d'exploration : satellites en orbite, capsules d'atterrissage ou robots de type *Pathfinder*? Un robot au sol n'explore qu'une petite partie de la surface de la planète, alors qu'un ballon peut aller bien plus loin et faire des observations beaucoup plus étendues. Bien que les ballons ne puissent pas emporter des instruments d'une portée globale équivalente à celle des capteurs des satellites, ils peuvent fournir des images bien plus précises de la surface de la planète et détecter des propriétés importantes de surface, telles l'intensité du champ magnétique ou la présence d'eau superficielle.

À la fin des années 1980, la France et la Russie ont collaboré pour envoyer un ballon vers Mars : ce dernier aurait emporté un système d'acquisition d'images et il aurait récupéré des échantillons et effectué des mesures au sol à l'aide d'instruments descendus au bout d'un câble. Les difficultés financières de la Russie firent annuler le projet en 1995, mais, deux ans plus tard, la NASA entreprit des recherches sur des techniques nécessaires pour envoyer vers Mars un ballon



5. UNE CAMÉRA embarquée dans un ballon observerait la surface d'une planète (ici, celle de Mars) de 10 000 fois plus près qu'une caméra embarquée sur un vaisseau spatial. Bien plus de détails seraient alors visibles.

beaucoup plus petit, ou aérobot (un aérostat robotique), en reprenant les résultats du Centre national d'études spatiales (CNES). De ce projet est né un système aérien léger, qui est entré en phase d'essais stratosphériques au printemps dernier.

Vénus, dont l'atmosphère est plus chaude et plus épaisse que celle de la Terre, a déjà été explorée par ballon. En 1985, l'Union soviétique, la France et les États-Unis ont déployé deux ballons à 54 kilomètres au-dessus de la surface de la planète. En 48 heures de vol, ces ballons ont parcouru chacun la moitié de la circonférence de la planète. Les instruments embarqués ont révélé l'existence de vents violents à haute altitude dans l'atmosphère, et mesuré la température et la pression atmosphériques.

Les ballons s'imposent pour l'étude de Vénus, car son atmosphère épaisse ne laisse passer que les ondes radio ou infrarouges ; de surcroît, les températures de la surface et les densités atmosphériques sont excessives pour que des robots et des capsules d'atterrissage fonctionnent plus de quelques heures. On envisage ainsi d'envoyer un «aérobot multisonde» qui évoluerait dans les couches supérieures de l'atmosphère vénusienne et qui enverrait plusieurs petites sondes sur la surface ; celles-ci prendraient des images à haute résolution et

recueilleraient des données spectroscopiques. Ce système est réalisable même avec les techniques actuelles, mais les planétologues préféreraient une mission plus ambitieuse, où un aérobot «à fluide réversible» ferait des descentes courtes et répétées de l'atmosphère supérieure froide jusqu'à la surface de Vénus, où la température atteint 460 degrés. Après avoir prélevé des échantillons, l'aérobot retournerait dans l'atmosphère supérieure, afin de refroidir ses instruments et ses équipements électroniques. La NASA a déjà mis au point certaines parties d'un tel système, telle une nacelle miniature qui résisterait aux températures élevées de la surface de Vénus et aux nuages d'acide sulfurique.

Deux équipes, l'une à la NASA et une autre à l'Agence spatiale européenne, cherchent à organiser une mission qui rapporterait un échantillon de sol vénusien sur la Terre. Toutes deux ont conclu que des ballons résistant aux hautes températures sont la clé de la réussite d'un tel projet. Les ballons descendraient un grappin qui remonterait ensuite des échantillons de roches et de sol, puis ils gagneraient une altitude d'environ 60 kilomètres, où l'atmosphère de la planète est suffisamment mince pour qu'on lance des fusées vers d'autres véhicules spatiaux qui récupérerait les échantillons et les rapporteraient sur la Terre.