

Une puce de biodétection

Pour déceler une attaque bactériobiologique en quelques secondes.

Pour parer à une attaque bactériologique, il faut faire vite. Arrêter un début d'épidémie et minimiser ses effets néfastes imposent l'identification de l'agent pathogène et la détermination du traitement approprié. Un dispositif qui tient dans la main, contenant un «laboratoire sur puce», sera peut-être capable de cet exploit. Cet instrument utilise des découvertes récentes en biologie, en chimie et des savoir-faire en miniaturisation. Il est conçu pour donner l'alerte à la moindre présence dans l'air d'agents pathogènes, tel celui de la variole.

Bien que les systèmes de biodétection soient nombreux, il n'en existait pas qui soit capable d'identifier un agent biologique particulier en moins de deux minutes, à partir d'un échantillon de quelques cellules seulement. Pourtant, d'après Mark Hollis, de l'Institut de technologie du Massachusetts, quelques particules d'agent pathogène (voire une seule), par exemple de la grippe, suffisent souvent à infecter une personne. Avec la collaboration de son collègue biologiste Jianzhu Chen, il espère réaliser un prototype de biodétecteur sensible et rapide d'ici 18 mois.

Le dispositif utilise des globules blancs de souris, nommés lymphocytes *B*, qui participent aux défenses immunitaires, et

produisent des anticorps dirigés contre les agents pathogènes. Les lymphocytes *B* déclenchent ainsi une cascade de réactions chimiques qui, dans l'organisme, visent à éliminer les agents pathogènes. Le nouveau biodétecteur tire parti de ces mécanismes, qui résultent de 600 à 800 millions d'années d'ingénierie génétique due à l'évolution.

Les lymphocytes *B* du biodétecteur sont génétiquement modifiés pour réagir à des agents pathogènes qui pourraient être utilisés lors d'une attaque bactériologique. Pour savoir si les lymphocytes *B* sont effectivement activés, les biologistes y ont également introduit un gène de méduse, qui code une protéine lumineuse ; cette dernière émet de la lumière dès qu'elle est activée par les ions calcium, produits lors de la cascade de réactions chimiques déclenchée par un agent pathogène dans les lymphocytes *B*. L'ensemble de ce processus prend moins d'une seconde, un temps record par rapport aux autres systèmes de biodétection.

D'autres méthodes de biodétection sont soit aussi rapides, soit aussi sensibles que les lymphocytes *B*, mais pas les deux à la fois. On peut utiliser la méthode d'amplification des gènes (PCR), mais il faut 12 minutes et une vingtaine de micro-organismes. Les techniques fondées sur la fixation d'anticorps sont rapides, mais peu sensibles : l'identification d'un agent pathogène nécessite plusieurs milliers de particules infectieuses. En revanche, avec les lymphocytes *B*, une seule particule infectieuse suffit, puisqu'elle active un lymphocyte.

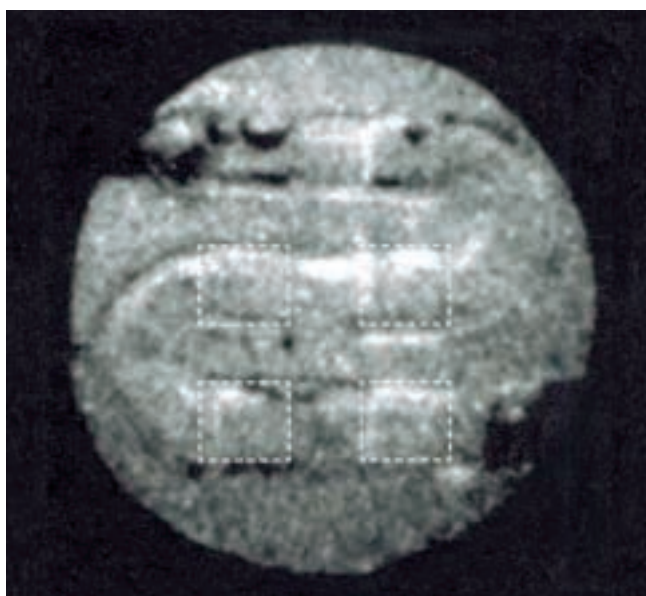
Aujourd'hui, le biodétecteur est une puce de plastique de 25 millimètres carrés, traversée par un sillon sinueux.

Des pastilles de un à deux millimètres carrés, qui contiennent chacune 10 000 lymphocytes *B* spécifiques d'un agent pathogène particulier, bordent le sillon. Un régime strict et une température de l'ordre de 20 °C empêchent les lymphocytes de se multiplier : même s'ils ont faim et froid, ils continuent leur surveillance.

L'échantillon à analyser et les éléments nutritifs destinés aux cellules circulent dans le sillon, où un capteur de lumière extrêmement sensible détecte la moindre émission lumineuse venant d'un lymphocyte *B*. Les essais ont montré que cinq à dix particules suffisent à l'identification d'un agent pathogène. La détection d'agents biologiques mortels, même en très petit nombre, semble résolue.

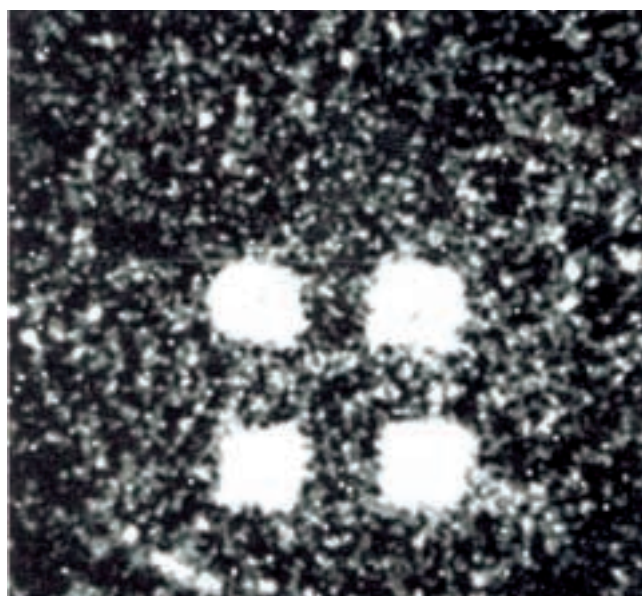
Le biodétecteur est robuste : les gaz d'échappement, la poussière et les autres contaminants de son environnement, beaucoup moins hospitalier que l'intérieur des organismes auxquels les lymphocytes *B* sont habitués, ne déclenchent pas d'activation ni, par conséquent, d'émission de lumière intempestive. Le sang contient des particules nombreuses et variées : les lymphocytes ne réagissent qu'au virus qu'ils ont appris à reconnaître. Selon M. Hollis, les techniques de biodétection fondées sur les lymphocytes *B*, destinées à des usages militaires, pourraient aussi servir aux médecins, pour détecter et identifier instantanément les virus.

Les lymphocytes se «rechargeront»-t-ils, après avoir émis de la lumière ? L'équipe américaine étudie la question et, au cas où la réponse serait négative, est en train de mettre au point un boîtier opto-électronique qui détecterait les photons émis par une puce à usage unique très bon marché.



M.I.T. Lincoln Laboratory

Un prototype de puce contre les attaques bactériologiques (à gauche) détecte rapidement les bactéries mortelles. L'air qui porte les micro-organismes pathogènes s'engouffre dans les méandres du sillon



central, où il rencontre les lymphocytes *B* (dans les carrés en pointillés). Les lymphocytes *B* génétiquement modifiés émettent de la lumière quand ils détectent un agent infectieux (à droite).

Des ballons dans l'espace

STEVE SMITH • JAMES CUTTS

À l'aide de ballons, météorologistes et planétologues étudient les couches supérieures de l'atmosphère, sur la Terre et sur d'autres planètes.

C'est dans les vieux pots qu'on fait les meilleures soupes : les scientifiques et les ingénieurs de plusieurs agences spatiales perfectionnent le premier des véhicules volants : le ballon. Ils en modifient la taille, la forme et les capacités de vol, afin d'obtenir des performances bien supérieures à celles des modèles même récents. Bien que les ballons volent depuis plus de 200 ans et que les scientifiques les utilisent depuis longtemps pour des missions de recherche variées, la durée limitée pendant laquelle un ballon reste en l'air a toujours été handicapante. Grâce aux techniques informatiques, aux nouveaux matériaux et à des méthodes modernes de fabrication, les ballons exploreront bientôt la haute atmosphère et contribueront à l'exploration d'autres planètes.

Les spécialistes des ballons cherchent aujourd'hui à construire des ballons qui demeureront dans les couches supérieures de l'atmosphère terrestre pendant 100 jours. En décembre 2001, un énorme ballon en forme de potiron, mis au point au Centre spatial Goddard, à Maryland, décollera d'Australie ou de Nouvelle-Zélande ; on espère qu'il gagnera les limites externes de l'atmosphère terrestre, soit quatre fois plus haut que l'altitude de croisière des avions à réaction, où il restera pendant plusieurs mois. Grâce à une liaison par satellite, il transmettra les données provenant de ses instruments aux scientifiques restés à terre ; notamment l'enregistreur TIGER (*Trans-Iron Galactic Element Recorder*, soit «enregistreur d'éléments galactiques plus lourds que le fer») déterminera les quantités des divers

éléments chimiques présents dans les rayons cosmiques.

Ce ballon nommé ULDB (*Ultra Long Duration Balloon*, soit «ballon de très longue durée») intéresse de nombreux scientifiques, qui voient dans les ballons un moyen économique d'étudier l'atmosphère supérieure et l'espace extra-atmosphérique : un vol de ballon ne coûte qu'une petite fraction du prix des fusées, et les instruments scientifiques peuvent être récupérés, révisés et réutilisés. Les ballons scientifiques ont atteint des altitudes de 52 kilomètres et emporté des charges pesant jusqu'à 3 600 kilogrammes. Capable d'atteindre les limites de la stratosphère, où les turbulences atmosphériques sont très faibles, l'ULDB pourra un jour emporter un télescope, qui sera alors aussi bien placé que le Télescope spatial *Hubble*, mais beaucoup plus volumineux.

Transportés par des fusées, des ballons pourraient également explorer l'atmosphère d'autres planètes ou de leurs satellites : les planétologues qui espèrent utiliser des ballons pour leurs recherches s'intéressent à des domaines comme la chimie et la dynamique atmosphériques, la cartographie paléomagnétique, la reconnaissance géologique et l'imagerie à ultra-haute résolution.

Flotter au-dessus de la Terre

Archimède découvrit en 240 avant notre ère le principe physique qui permet aux ballons de voler, mais 2 000 ans s'écoulèrent avant que ce principe ne soit mis en œuvre pour gagner les airs, vers la fin des années 1700. Les ballons

scientifiques se multiplièrent à la fin des années 1800, lorsque la nouvelle technique fut utilisée pour des mesures de la température et de l'humidité, lors des premières études de l'atmosphère. Des ballons furent également utilisés à des fins militaires : ils permettaient une surveillance des mouvements de troupes. À la fin des années 1940 et au début des années 1950, l'utilisation de polyéthylène permit à des ballons modernes d'atteindre la stratosphère, à des altitudes de 15 à 50 kilomètres, de transporter des charges supérieures et de rester plus longtemps en l'air. Notamment les combinaisons spatiales furent testées au cours de missions en ballon ; la NASA étudia également ainsi les réactions de l'organisme humain dans un environnement quasi spatial. En 1960, une fusée de la NASA lança le premier ballon expérimental de télécommunications, *Echo I*. Puis, 25 ans après, une équipe qui rassemblait des Russes, des Français du Centre national d'études spatiales (CNES) et des Américains construisit deux ballons qui volèrent dans les nuages de Vénus, à 54 kilomètres au-dessus de sa surface.

Les vaisseaux spatiaux ont plusieurs inconvénients : ils n'embarquent qu'une charge limitée (seule la Navette spatiale peut transporter une charge équivalente à celle des grands ballons), et l'on doit longuement préparer leurs capteurs, avant des vols qui durent des années. Les ballons, eux, donnent l'occasion de réagir rapidement aux événements : ainsi, en 1987, des capteurs embarqués à bord de ballons ont observé la supernova 1987A (une explosion d'étoile comme il ne s'en produit que tous les 400 ans environ) dans les

trois mois qui suivirent sa découverte. De nombreux instruments embarqués à bord de vaisseaux spatiaux modernes sont testés lors de missions en ballon.

Les ballons scientifiques actuels appartiennent en général à l'une des deux catégories suivantes : les ballons ouverts et les ballons pressurisés. La plupart des ballons de la NASA sont du premier type. Un ballon ouvert quitte le sol lorsqu'il est rempli d'une quantité d'hélium suffisante pour compenser son poids total, charge utile com-

prise. Pour qu'un ballon s'élève dans les airs, l'hélium doit créer une «force ascensionnelle libre», c'est-à-dire une force ascensionnelle supérieure au poids du ballon et de sa charge utile (cette force est déterminée par le principe d'Archimède : un objet immergé dans un fluide est soumis à une force égale au poids du volume de fluide déplacé). À mesure que le ballon s'élève, la densité atmosphérique diminue, et le volume de gaz à l'intérieur du ballon se dilate jusqu'à remplir entière-

ment son enveloppe. La pression est alors égale à l'intérieur et à l'extérieur de l'enveloppe du ballon, mais le ballon flotte parce que son poids est inférieur à celui du volume d'air déplacé. Lorsque l'altitude désirée de 36 à 40 kilomètres est atteinte, en général en deux ou trois heures, l'excédent de gaz s'échappe par des manches d'évacuation, à la base du ballon, pour le stabiliser et éviter la rupture de la mince enveloppe en polyéthylène. Le ballon évacuant une certaine quantité de son



1. UN BALLON stationnant pendant une centaine de jours dans les couches supérieures de la stratosphère permettra d'observer l'Univers à moindres frais.

National Aeronautics and Space Administration

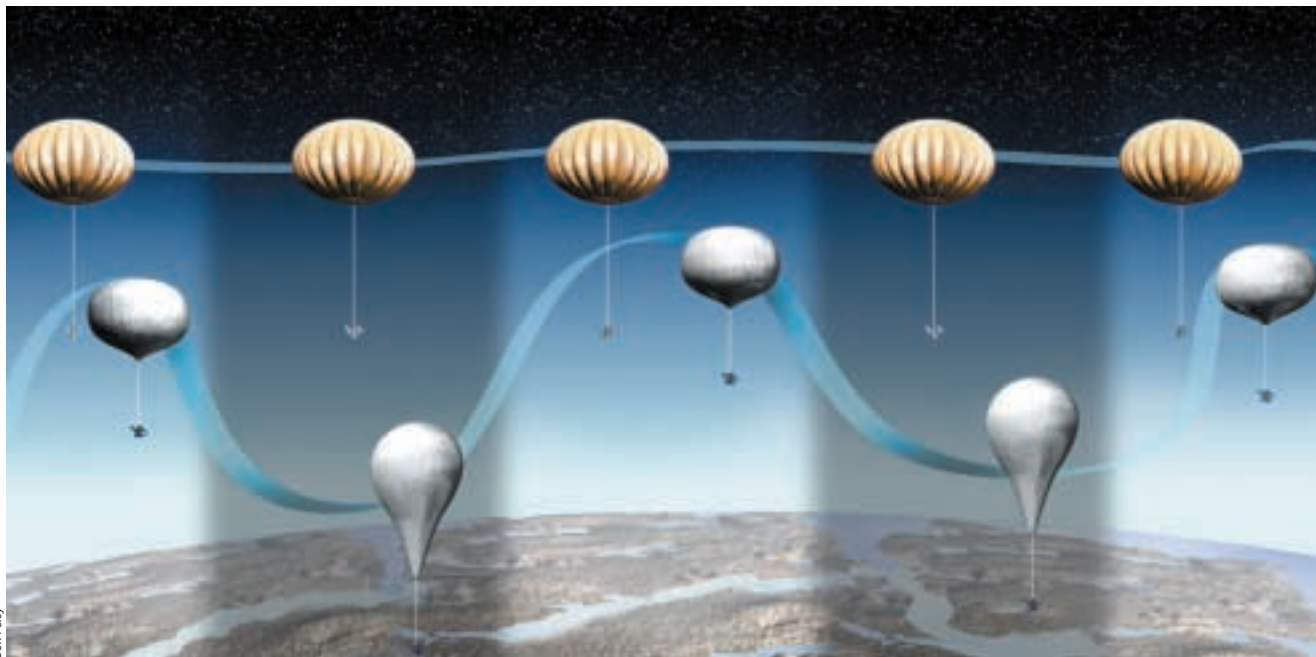
gaz dans l'atmosphère, il est dit «ouvert» sur l'atmosphère.

Pendant la journée, une partie du gaz chauffé par le Soleil est évacuée ; mais, lorsque vient la nuit, le gaz se refroidit, se contracte, et le ballon commence à descendre. Pour le maintenir

en altitude, on jette du lest (dont la quantité totale est comprise entre sept et dix pour cent de la masse totale du système). Le jour suivant, le même processus de réchauffement et de refroidissement se répète, de sorte que le nombre de jours qu'un ballon ouvert

peut tenir en l'air est limité par la quantité de lest qu'il emporte.

Les vols de ballons scientifiques ne durent en principe qu'un ou deux jours, il faut souvent de nombreux vols pour réaliser des expériences. Aussi préfère-t-on faire voler les ballons dans les



Don Foley

2. LES BALLONS PRESSURISÉS (*en orange*) ont une enveloppe résistante, qui conserve son volume malgré la dilatation des gaz, quand ceux-ci sont chauffés. Le ballon se maintient ainsi à la même altitude. Les ballons classiques, «ouverts», se dilatent durant le jour, quand ils

sont chauffés par le réchauffement solaire, et se contractent la nuit, de sorte qu'ils changent constamment d'altitude. Comme on compense ces variations en délestant les ballons ouverts, leur durée de vie est limitée par la quantité de lest qu'ils peuvent emporter.



Don Foley

3. LE DÉPLOIEMENT d'un ballon sur une planète éloignée nécessite sa libération à partir d'un véhicule spatial. Le ballon doit être emballé dans une capsule qui résiste à l'entrée dans l'atmosphère. Il s'ouvre et se gonfle durant la descente en parachute vers la surface

de la planète, puis remonte à son altitude de croisière. Les ballons du futur libéreront des sondes qui prélèveront des échantillons à la surface des planètes. Puis ces sondes seront remontées, et les échantillons seront renvoyés sur la Terre.

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

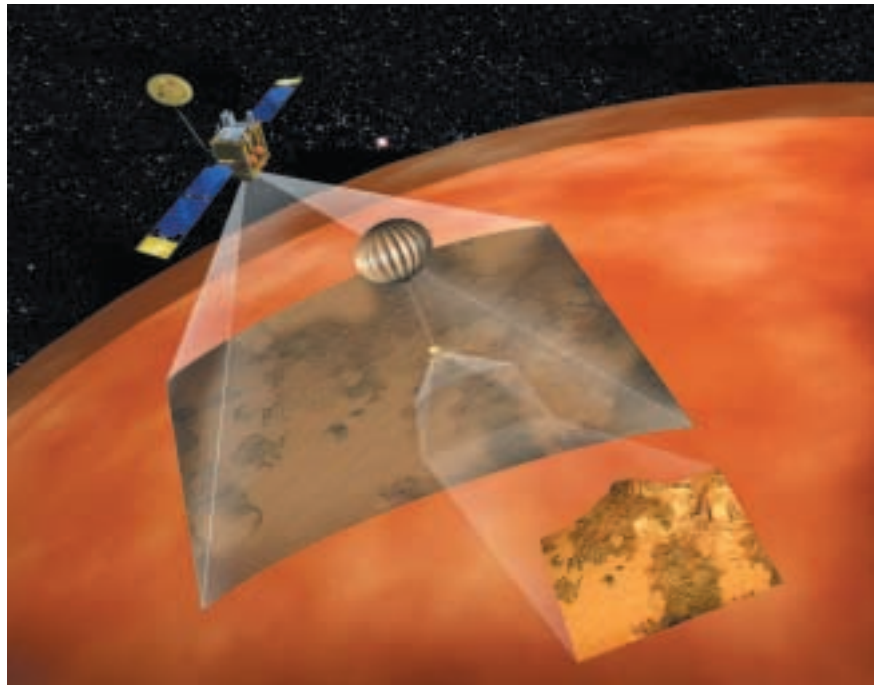
L'exploration en ballon d'autres planètes

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.

Les ballons planétaires

Les ballons ont été inventés et lancés en France en 1783 : aussi bien les ballons à air chaud, dus aux frères Montgolfier, que les ballons à gaz dus à Jacques Charles. Toute la physique des ballons était ainsi inventée dès le XVIII^e siècle. Toute la physique... sauf les matériaux plastiques, introduits par Jacques Piccard à l'Université de Minnesota dans les années 1950 et qui ont donné une nouvelle vie au «plus léger que l'air».

Dès sa création en 1962, le Centre national d'études spatiales, en France, a compris l'importance des ballons pour la recherche scientifique, aussi bien pour étudier l'atmosphère terrestre que pour porter des expériences au-dessus de cette atmosphère, et il s'est établi comme le spécialiste unique de leur emploi en Europe.

En 1967, nous avons proposé à l'Académie des sciences d'URSS de les utiliser dans le programme d'exploration planétaire, en commençant par Vénus. Après de nombreuses péripéties, l'idée s'est incarnée en 1985 par le vol réussi de deux ballons dans l'atmosphère de Vénus. Ces petits aérostats de 3,5 mètres de diamètre, fabriqués en URSS, ont été les premiers véhicules mobiles sur une planète autre que la Terre : en 46 heures, ils ont parcouru chacun 13 000 kilomètres dans les nuages d'acide sulfurique à 54 kilomètres d'altitude. La nacelle de sept kilogrammes qu'ils portaient, également de fabrication soviétique, contenait des instruments qui ont mesuré les principaux paramètres de l'atmosphère et d'en envoyer la valeur jusqu'à un réseau international de 20 stations réparties sur la surface de la Terre. Cet exploit extraordinaire n'a pas reçu l'applaudissement qu'il méritait : est-ce parce que la NASA n'y était pour rien ? Puis l'URSS s'est détournée de Vénus pour consacrer son programme

planétaire à Mars. Nous avons alors proposé d'inclure des vols de ballons dans le programme martien franco-soviétique, et cette proposition a été acceptée.

Mars n'est cependant pas une planète où il soit facile de faire voler un ballon, parce que l'atmosphère est très peu dense, et aussi parce que sa température varie notablement, entre le jour et la nuit. Le jour elle est chaude, la pression dans le ballon est élevée et risque de le faire exploser. La nuit elle est froide, le ballon perd sa force ascensionnelle et tombe. D'où la solution élégante qui avait été proposée d'utiliser une *guide-rope*, c'est-à-dire l'équivalent d'une corde pendant sous la nacelle et qui, au cours de la nuit, repose en partie sur le sol, soulageant ainsi le ballon : c'est la solution classique pour stabiliser un ballon à basse altitude, inventée peu après... 1783.

Sur Mars nous espérons porter une charge utile de 28 kilogrammes sur une distance de 3 000 à 4 000 kilomètres pendant dix jours, obtenir ainsi de nombreuses images à très haute résolution, mesurer le champ magnétique, détecter la présence de glace souterraine et déterminer la constitution minéralogique du sol...

Dès 1993 il a paru nécessaire de s'éloigner du programme russe en perdition et d'essayer de convaincre la NASA que les ballons devraient tenir une grande place dans l'exploration martienne. Cette double démarche s'est révélée habile, puisque la Russie a effectivement abandonné son programme martien et que la NASA envisage aujourd'hui d'utiliser des ballons martiens, peut-être dès 2003. Moins ambitieux que les nôtres ils auraient peut-être une durée de vie plus courte et ne comporteraient pas de *guide-rope*. Ils n'en feront pas moins un bon travail.

Jacques BLAMONT, CNES Paris

Les planétologues voudraient également explorer Titan, le plus gros des satellites de Saturne, car il est le seul corps du Système solaire qui conserve peut-être des composés chimiques organiques prébiotiques. Des réactions photochimiques, dans son atmosphère, créent une brume orange de matières organiques qui a caché sa surface lorsque la sonde *Voyager* l'a survolé, dans les années 1980. On pense que Titan possède de vastes océans d'hydrocarbures, ainsi que des surfaces solides. Son atmosphère, principalement constituée d'azote, est quatre fois plus dense que celle de la Terre, mais beaucoup plus froide (elle est juste assez chaude pour rester gazeuse). Là encore, des ballons seraient des plateformes d'exploration idéales. Des aérostats envoyés sur Titan pourraient effectuer de nombreuses descentes vers la surface pour prendre des images de près, pour faire *in situ* des mesures, des composés prébiotiques qui ren-

seigneraient sur l'origine de la vie. Un jour, même, une mission en ballon pourrait contribuer à rapporter vers la Terre des échantillons prélevés à la surface de Titan.

Avant d'effectuer toutes les explorations spatiales envisagées, les ingénieurs spatiaux devront surmonter des difficultés variées. La recherche de nouveaux matériaux pour les ballons, essentielle dans la mise au point de l'ULDB, sera encore plus importante pour les missions de recherche planétaire. Réalisé dans un tissu plus résistant, un ballon allégé emporterait des charges utiles supérieures. Les enveloppes devront également résister à des environnements extrêmes, telle l'atmosphère de Vénus, chaude et chargée d'acide sulfurique. Les instruments scientifiques emportés par les ballons devront être encore miniaturisés. Enfin, on devra apprendre à commander les ballons en consommant moins d'énergie.

On devra également perfectionner le largage de ballons sur les planètes éloignées. Sur la Terre, les ballons s'élèvent à partir du sol, mais, dans l'espace, le processus est inversé. Les véhicules spatiaux libèrent des ballons emballés dans des capsules qui supportent l'entrée dans l'atmosphère. Les ballons s'ouvrent et se gonflent ensuite, pendant la descente vers la surface de la planète.

Quel que soit l'environnement où ils évoluent, les ballons sont des engins utiles et peu coûteux.

Steve Smith et James Cutts étudient les ballons au Centre spatial Goddard de la NASA.

Observatories Balloon, in *The Astronomy and Astrophysics Encyclopedia*, pp. 494-503, Éditions Van Nostrand, 1992.

Jacques BLAMONT, *Vénus dévoilée*, Éditions Odile Jacob, 1987.
