



12. LE TRICOT CI-DESSUS EST INSPIRÉ d'un diagramme figurant dans le manuel de topologie algébrique d'Allen Hatcher. La structure est celle d'une tige dont la section est un Y aux bras de même longueur, la tige étant recourbée pour joindre l'une de ses deux extrémités à l'autre, après une torsion d'un tiers de tour. La surface

ainsi obtenue ne comporte qu'un seul bord continu. L'ouvrage est ici renforcé avec du fil de fer pour mieux montrer sa structure. Le tricot de droite est mathématiquement identique, mais il est dépourvu d'armature métallique et est dimensionné pour être porté comme un capuchon.

(en pratique, je le fais souvent inconsciemment). Les objectifs choisis imposent des contraintes sur le tricotage. Cela me donne un cadre pour concevoir le tricotage de l'objet dans sa structure globale.

Je dois ensuite considérer la structure fine de cet objet. Y a-t-il des aspects particuliers des mathématiques que l'on peut mettre en valeur avec de la couleur ou un motif? Des textures particulières sont-elles nécessaires? Pendant la résolution du problème de discrétisation qui s'ensuit, je produis habituellement un modèle que je peux suivre – j'ai mauvaise mémoire et sans cela je perdrais tout mon travail.

Se coiffer d'une bande de Möbius généralisée

Une création mathématique récente peut illustrer cela. Un jour, un dessin figurant dans le livre *Algebraic Topology* de Allen Hatcher (en accès libre sur Internet) attira mon regard; il me semblait que si la surface représentée était tricotée, le résultat serait formidable. Sa structure est celle d'une tige dont la section est un Y ayant ses trois bras de même longueur, la tige étant recourbée sur elle-même de façon à ce que ses deux extrémités se rejoignent, mais après une torsion de la tige d'un tiers de tour. On obtient ainsi une sorte de bande circulaire qui n'a qu'un seul bord continu (le doigt peut continûment parcourir le bord dans sa totalité et revenir au point de départ).

Bien que cette surface ne constitue pas une variété (il n'est pas possible d'associer un système de coordonnées univoque aux points de l'axe central de la tige), elle res-

semble à une bande de Möbius – c'en est une généralisation. J'ai donc pensé que je pouvais utiliser une construction similaire à celle d'une bande de Möbius – à condition de trouver une façon de tricoter vers l'extérieur, à partir du cercle central (l'axe circulaire de la tige en Y).

Je souhaitais que l'objet tricoté soit fait à partir d'une pelote unique de fil, l'objet mathématique n'ayant qu'un seul bord. Je devais ainsi trouver une façon d'utiliser un seul fil pour produire trois ensembles entrelacés de mailles libres (un tricot ordinaire n'a que deux ensembles de mailles, supérieur et inférieur, par fil). Après avoir résolu ce problème – et cela m'a pris du temps –, je décidai d'utiliser une texture qui aurait le même aspect à partir de tous les points de vue, de sorte que le cercle central serait moins visible. Pour ma première tentative, j'ai décidé de faire simple et je n'ai pas ajouté davantage de conditions (voir la figure 12).

Après avoir terminé ma première réalisation, je l'ai examinée et me suis rendu compte qu'elle ressemblait à un capuchon. J'ai redimensionné la version suivante afin de produire un véritable vêtement. Un objet mathématique que l'on peut porter est un résultat pratique rare, et bienvenu!

Bien que j'aie travaillé sur différents projets de tricot mathématique, je n'en ai pas encore fini avec mes modèles de bouteille de Klein – et cela fait environ 20 ans que j'ai commencé. On m'a demandé d'adapter ma construction pour en faire un chapeau qui puisse être porté. C'est l'un des nombreux défis de tricot mathématique que je compte bien relever. ■

■ SUR LE WEB

The Home of Mathematical Knitting [site Web de l'auteur] : www.toroidalsnark.net/mathknt.html

■ BIBLIOGRAPHIE

S.-M. Belcastro et C. Yackel (éds.), *Crafting by Concepts: Fiber Arts and Mathematics*, AK Peters, 2011.

S.-M. Belcastro, *Every topological surface can be knit: A proof*, *Journal of Mathematics and the Arts*, vol. 3(2), pp. 67-83, 2009.

S.-M. Belcastro et C. Yackel (éds.), *Making Mathematics with Needlework: Ten Papers and Ten Projects*, AK Peters, 2007.

M. O. Reid, *The knitting of surfaces*, *Eureka - The Journal of the Archimedeans*, vol. 34, pp. 21-26, 1971.

Des VOLS SPATIAUX pour tous

Alan Stern

L'espace de demain ne sera pas réservé uniquement aux touristes fortunés. Pour les chercheurs, l'industrie spatiale commerciale naissante ouvre des possibilités nouvelles, moins chères et variées.

L'un des problèmes les plus frustrants de la recherche spatiale est le mode d'accès à l'espace, qui n'a pas changé depuis 50 ans. Aller dans l'espace reste à la fois cher et rare. Nous sommes encore loin du stade où les scientifiques iront régulièrement en orbite pour utiliser eux-mêmes leurs instruments de mesures. D'ailleurs, certaines régions de la haute atmosphère ne sont aujourd'hui accessibles que par des systèmes automatisés.

Tout cela devrait bientôt changer. L'avènement de vols spatiaux commerciaux réguliers à but lucratif (récemment illustré par les lancements réussis du vaisseau cargo spatial *Dragon*, construit et exploité par *SpaceX*, vers la Station spatiale internationale, l'ISS) transformera probablement la recherche spatiale. Les scientifiques bénéficieront de coûts de lancement réduits, d'un accès plus fréquent à l'espace et de la possibilité de réaliser eux-mêmes leurs expériences en orbite. Ces avancées rendront certainement service aux grandes missions de recherche de la NASA et des agences spatiales japonaise

L'ESSENTIEL

- **Le coût et la rareté des vols vers l'espace ont été des obstacles au développement de la recherche spatiale.**
- **Des sociétés privées annoncent une ère de vols spatiaux moins chers et plus fréquents.**
- **Bien que la plupart de ces entreprises aient pour objectif premier d'envoyer des touristes dans l'espace, les chercheurs pourront y trouver une place pour eux et leurs expériences.**
- **Ces sociétés espèrent, à terme, atteindre la Lune ou Mars...**

et européenne. Et elles rendront l'espace plus abordable pour de nombreux pays, institutions académiques et entreprises.

J'ai commencé à m'intéresser au potentiel des vols spatiaux commerciaux lorsque j'étais administrateur adjoint de la NASA, en charge de toutes les études scientifiques spatiales et terrestres. Depuis, j'ai été conseiller pour des sociétés spatiales commerciales, directeur scientifique de deux équipes participant au *Google Lunar X PRIZE* (qui récompensera d'une bourse de plus de 30 millions de dollars la première mission robotisée qui se posera sur la Lune et renverra une vidéo vers la Terre) et me suis occupé d'achats de vols habités commerciaux pour la recherche à travers mon institution. Autrement dit, j'ai vu grandir de mes propres yeux la promesse des vols spatiaux commerciaux.

Dans les années à venir, toute une panoplie de systèmes spatiaux commerciaux entrera en service et offrira un éventail de possibilités très intéressantes pour les chercheurs. C'est une nouvelle étape pour les sciences spatiales, qui ont débuté au



lendemain de la Seconde Guerre mondiale avec la conversion en plates-formes de recherche des fusées V2 capturées à l'armée allemande. Depuis, les scientifiques ont toujours fait preuve d'inventivité pour faire avancer leurs travaux et envoyer leurs détecteurs dans l'espace. Les projets actuellement en développement s'inscrivent dans cette démarche des pionniers de l'espace. Si certains échouent, d'autres seront couronnés de succès. Dans le contexte actuel de restrictions budgétaires, de dépassements de coûts et de stagnation prolongée de l'accès à l'espace, ces succès ne seront jamais assez rapides à venir.

On peut raisonnablement parier qu'en matière d'exploration spatiale, les décennies 2010 et 2020 représenteront une période charnière aussi déterminante que les années 1950 et 1960. Nous assistons déjà à une révolution en marche. Entre les vols suborbitaux, qu'on qualifie souvent de voyages « touristiques » (mais qui proposent aussi des places pour les scientifiques), et les séjours en orbite sur la Station spatiale internationale ou au-delà, les années à venir vont transformer notre relation avec le monde encore mystérieux régnant juste au-dessus de la Terre.

Un avenir suborbital

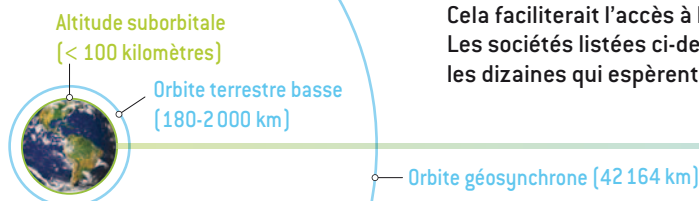
L'une des activités les plus productives (et, hélas, peut-être parmi les moins connues) de la NASA dans le domaine des vols spatiaux a été son programme suborbital, en place depuis des décennies. Dans ce cadre sont lancées chaque mois une ou deux missions courtes à bord de fusées non habitées « jetables », grâce auxquelles les chercheurs ont la possibilité de placer leurs instruments dans l'espace pendant quelques minutes jusqu'à 100 kilomètres d'altitude.

Malgré la brièveté de ces vols, ces missions suborbitales ont produit des résultats scientifiques clefs dans les domaines de la physique solaire, de l'étude des supernovae, de la science de la haute atmosphère, de l'astrophysique et de la recherche de comètes. En outre, ces vols sont très utiles pour tester les nouvelles techniques aérospatiales et des détecteurs avant leur intégration

1. LA FUSÉE *FALCON 9* de SpaceX lance le vaisseau *Dragon* pour sa mission orbitale inaugurale en 2010. SpaceX est devenu depuis le symbole de nouveaux projets à destination de l'espace.

SPACEX

QUI NOURRIRA LA RÉVOLUTION DE LA RECHERCHE SPATIALE ?



Aller dans l'espace est une opération complexe. La recherche spatiale a longtemps été entravée par le coût élevé des vols et leur rareté. Mais toute une flottille appartenant à des entreprises privées est en train de voir le jour. Cela faciliterait l'accès à l'espace pour les chercheurs du monde entier. Les sociétés listées ci-dessous ne sont que les plus visibles parmi les dizaines qui espèrent promouvoir la présence humaine dans l'espace.

	VOL SUBORBITAL	VOL ORBITAL	VOL VERS LA LUNE	VOL DE LONGUE DURÉE
PRINCIPALES SOCIÉTÉS	<i>Armada Aerospace, Blue Origin, Virgin Galactic, XCOR Aerospace</i>	<i>SpaceX</i>	<i>Astrobotic Technology, Moon Express</i>	<i>Bigelow Aerospace, Excalibur Almaz</i>
AVANTAGES PAR RAPPORT AUX VOLS CLASSIQUES	Les lanceurs réutilisables permettent d'augmenter le nombre de vols et ainsi de réduire le coût par vol. Les chercheurs pourront aussi accompagner leurs expériences dans l'espace.	<i>SpaceX</i> a conçu ses fusées <i>Falcon</i> et ses capsules <i>Dragon</i> en partant de zéro, en privilégiant la simplicité et la fiabilité. Les vols sur <i>Falcon 9</i> coûtent la moitié d'un projet similaire dans le cadre traditionnel.	De petits alunisseurs robotisés seront les premiers vaisseaux à se poser sur la Lune depuis 1976. Des projets sont en cours pour sonder la région du pôle Sud lunaire à la recherche de glace d'eau.	Les stations gonflables de <i>Bigelow</i> sont légères et ainsi plus faciles à envoyer dans l'espace que la Station spatiale internationale (ISS). Leur volume n'est pas limité par les capacités de la fusée.
SITUATION ACTUELLE DES PROJETS	Les premiers vols d'essai sont en cours. Les premiers passagers devraient effectuer leur vol à partir de 2014.	La fusée <i>Falcon 9</i> a déjà livré un vaisseau <i>Dragon</i> pour ravitailler la Station spatiale internationale, le premier de 12 vols de ce type prévus.	Le <i>Google Lunar X PRIZE</i> récompensera la première équipe qui posera un robot sur la Lune et renverra une vidéo sur la Terre. <i>Moon Express</i> , l'une des équipes, prévoit sa mission d'ici 2015.	<i>Bigelow</i> a commencé à tester des stations prototypes en orbite terrestre basse en 2006. La NASA a annoncé qu'un module <i>Bigelow</i> sera attaché à l'ISS en 2015.

NASA

à des missions coûtant plusieurs milliards de dollars, et ils ont servi à former un nombre considérable d'expérimentateurs spatiaux, notamment des astronautes, des spécialistes de l'atmosphère et des chefs de mission planétaire.

Bien que la communauté scientifique réclame depuis plus de 20 ans une augmentation importante de la fréquence des vols, le rythme de lancement du programme suborbital de la NASA est resté désespérément faible. Les raisons en sont nombreuses, mais sont surtout liées à leur coût. Le prix d'une de ces missions tourne autour de 2,5 millions de dollars, ce qui exclut des fréquences de lancement beaucoup plus élevées dans le cadre du budget de ce programme.

L'entrée en scène de nouveaux véhicules suborbitaux réutilisables, construits par des entreprises telles que *XCOR Aerospace*, *Virgin Galactic*, *Armada Aerospace*, *Masten*

Space Systems et *Blue Origin*, devrait améliorer à la fois le rythme et la productivité de la recherche suborbitale.

Multiplier le nombre de vols

Comment est-ce possible ? Tout d'abord, en faisant voler des lanceurs réutilisables et non jetables, ces compagnies peuvent réduire les coûts de façon substantielle et augmenter leur fréquence. À elles deux, ces avancées complémentaires auront le même effet sur la recherche spatiale que la révolution des ordinateurs personnels sur l'informatique : créer une révolution de l'accès.

La NASA effectue à l'heure actuelle entre 20 et 25 lancements suborbitaux par an. Le fournisseur de vol suborbital *Virgin Galactic* prévoit que son premier véhicule volera à terme une fois par jour. Et chaque vol sera capable d'emporter six lots de

matériel ou six chercheurs (ou un mélange des deux). Cette société pourrait à elle seule autoriser environ 2 000 expériences par an.

Mais *Virgin Galactic* n'est pas seule sur ce nouveau marché. *XCOR Aerospace*, un sérieux concurrent, envisage de procéder à quatre lancements par jour avec chacun de ses véhicules réutilisables, dont plusieurs ont déjà été loués à des pays tels que la Corée du Sud et l'État de Curaçao, une île antillaise. Imaginez la rapidité des progrès que les chercheurs peuvent espérer avec des vols aussi fréquents ! Les physiologistes, par exemple, pourraient récupérer tous les ans des centaines de jeux de données pour mesurer les effets de l'impesanteur sur les astronautes, contre une poignée d'études de ce type aujourd'hui.

Bien sûr, l'augmentation de la fréquence des vols ne suffit pas à elle seule à faire une révolution. L'autre atout clef de ces systèmes réutilisables est leur coût infé-

rieur. *Virgin Galactic* envisage de facturer 200 000 dollars la place de 100 kilogrammes (charge utile ou chercheur), soit environ dix fois moins cher qu'avec un lancement de fusée classique. Le prix annoncé par XCOR et par *Armadillo Aerospace* est même plus proche de 100 000 dollars.

La révolution des fusées réutilisables permettra aussi d'avancer dans de nouveaux domaines scientifiques. Par exemple, les chercheurs auront accès à la région atmosphérique de haute altitude, comprise entre 30 et 200 kilomètres. Ils la nomment l'«ignosphère», car elle est trop haute pour être atteinte par des avions ou des ballons, mais trop basse pour que les satellites y évoluent sans retomber sur Terre. Les chercheurs pourront alors étudier de nombreux phénomènes atmosphériques, par exemple les mystérieuses rafales électriques de haute altitude que sont les farfadets (ou sylphes rouges) et les jets bleus.

Seules les fusées automatisées de la NASA accédaient à cette région mal connue. Or, les nouveaux véhicules offrent la possibilité d'embarquer les chercheurs avec leurs détecteurs. La recherche suborbitale pourrait avoir enfin droit elle aussi à ce dont tous les autres domaines de recherche jouissent depuis longtemps : un environnement de laboratoire où les scientifiques peuvent mener leurs propres expériences, sur place, sans devoir s'en remettre à des robots.

Bien que tout cela semble relever de la science-fiction, les chercheurs de certains laboratoires réservent déjà des places sur les vols pour eux-mêmes et pour leurs expériences. D'ici 2015, la technologie suborbitale de prochaine génération pourrait connaître le même essor que la technologie des fusées-sondes dans les années 1950 : aujourd'hui encore rare, demain presque banale.

Est-ce que cela constituerait en soi un changement radical ? Oui, mais la révolution va plus loin, et ces vols suborbitaux ne sont qu'une première étape ; d'autres types d'offre spatiale commerciale présentant un intérêt pour la communauté de la recherche spatiale sont en train d'émerger.

Aux États-Unis, les lanceurs qui ont historiquement été utilisés pour la plupart des missions scientifiques orbitales de la NASA (les fusées *Pegasus*, *Atlas* et *Delta*) ont tous vu leur coût plus que doubler depuis la fin des années 1990, à cause du statut de quasi-monopole des constructeurs qui peuvent arbitrairement fixer leurs prix. Lancer une petite mission scientifique à bord d'une

fusée *Pegasus* coûtait environ 15 millions de dollars ; cela revient aujourd'hui à plus de 40 millions de dollars. Et le prix des fusées haut de gamme capables d'emporter les plus grosses charges utiles (les « lanceurs lourds » comme *Atlas V*) est passé de 150 à 350 millions de dollars.

Avec des budgets pour la science spatiale pris en étau entre les réductions du financement et les dépassements de coût, les directeurs de programmes spatiaux de la NASA pourraient voir une aubaine dans les nouveaux lanceurs commerciaux.

Prenons par exemple la famille de lanceurs *Falcon* créée par *SpaceX* : l'entreprise a dépensé moins d'argent pour concevoir, dessiner, développer, tester et rendre opérationnelle sa ligne de lanceurs *Falcon* qu'il n'en a fallu au gouvernement pour construire la simple tour de lancement de la fusée *Ares*, aujourd'hui abandonnée. *SpaceX* propose actuellement le *Falcon 9* pour environ 65 millions de dollars (environ la moitié de ce que coûte le lanceur moyen concurrent *Delta II*) et, en 2014, *SpaceX* projette de mettre en service un *Falcon* beaucoup plus gros, le *Falcon Heavy* ou FH. Le FH pourra embarquer environ deux fois la charge des plus grosses fusées *Atlas* et *Delta*, mais pour 100 millions de dollars seulement, moins du tiers du prix de ses concurrentes.

Des solutions moins coûteuses

Historiquement, la NASA a lancé trois à cinq missions de science en orbite par an. En envoyant ne serait-ce que la moitié de ces missions sur un *Falcon Heavy*, on économiserait deux à trois milliards de dollars sur cinq ans. Ces économies sont suffisantes pour monter plusieurs missions de l'envergure de *Discovery* vers d'autres planètes ou jusqu'à une dizaine de missions SMEX (*Small Explorer*, explorateur de petite taille) pour l'astronomie et la physique solaire. Ce serait même assez pour financer un nouveau rover martien ambitieux du type de *Curiosity*.

Les entreprises spatiales commerciales expérimentent une autre option encore pour réduire les coûts : la possibilité de greffer des charges utiles scientifiques sur des vols commerciaux. Par exemple, chacun des 72 vaisseaux de la constellation de satellites de communications *Iridium* de seconde génération offre (contre rémunération) de la place pour des instruments

■ L'AUTEUR



Alan STERN a dirigé les programmes de sciences spatiale et terrestre de la NASA. Il travaille à présent à l'Institut de recherche du Sud-Ouest (Southwest Research Institute) à Boulder dans le Colorado, aux États-Unis.



Orbite lunaire (384 000 km)

Un vol suborbital à 200 000 dollars

La société *Virgin Galactic* utilise un avion porteur, le *WhiteKnightTwo*, qui transporte l'avion-fusée *SpaceShipTwo* jusqu'à 15 kilomètres d'altitude. L'avion-fusée, qui embarque six passagers et le pilote, se décroche et entame une ascension verticale pour atteindre environ 110 kilomètres d'altitude. Quand sa vitesse devient nulle, débute une chute libre, peu freinée grâce à la ténuité de l'atmosphère. Les passagers sont alors en impesanteur pendant cinq minutes. Lorsque la densité de l'air devient importante, l'avion termine sa descente à la façon d'un planeur. La durée totale du vol est de deux heures.



Virgin Galactic/Mesha Varma

scientifiques. La mission hôte couvre les coûts du lancement du ou des satellites, et les laboratoires ne contribuent que pour une fraction du montant.

Cependant, ce concept de « charge utile hébergée » reste un marché restreint. Il n'est pertinent que quand les instruments scientifiques peuvent tenir à bord de satellites de communications et fonctionner sur les orbites spécialisées de ces derniers. Cela n'est clairement pas destiné à de gros télescopes par exemple, ni à d'autres types de missions qui nécessitent leur propre satellite dédié. Cette solution permet néanmoins de lancer des charges utiles modestes pour quelques dizaines de millions de dollars, quand il en faut aujourd'hui plusieurs centaines pour lancer et exploiter une mission satellitaire.

Ces charges utiles hébergées pourraient bientôt emporter des instruments scientifiques bien au-delà de l'orbite ter-

restre. Plus d'une dizaine d'équipes dans le monde se sont inscrites au concours *Google Lunar X PRIZE*.

Des groupes tels que *Moon Express* et *Astrobotic* signent déjà des contrats pour transporter des charges utiles scientifiques jusqu'à la Lune. Ces entreprises et d'autres considèrent que le *Lunar X PRIZE* n'est

CES INNOVATIONS REPRÉSENTENT les premières nouvelles options que nous avons pour aller dans l'espace depuis les années 1950 et 1960.

qu'une première mission de démonstration. L'objectif à long terme est de trouver un revenu régulier en s'adressant aux chercheurs et aux pays qui n'ont pas les centaines de millions de dollars ni l'expérience technique pour aller eux-mêmes sur la Lune, mais qui ont de quoi acheter un compartiment de charge utile sur un alunisseur privé ayant fait ses preuves.

Un billet à dix millions de dollars reste 100 fois moins cher que les missions gouvernementales à un milliard de dollars.

De nombreux spécialistes de la Lune ou des planètes ont bon espoir qu'à de tels prix, le nombre de pays susceptibles d'envoyer des expériences sur la Lune va augmenter, créant une seconde renaissance pour l'étude de notre satellite.

Au-delà de la Lune, *SpaceX* regarde déjà vers Mars et envisage la possibilité de réutiliser les vaisseaux cargo *Dragon*, initialement conçus pour ravitailler la Station spatiale internationale, et de les adapter pour emporter de grosses charges vers Mars. Cela coûterait des centaines de millions de dollars de moins que les récents modules atterrisseurs martiens. Si les responsables de *SpaceX* arrivent à convaincre la NASA ou les agences spatiales d'autres pays, ils réussiront peut-être à développer une nouvelle solution

L'histoire se répète-t-elle ?

La profusion de projets commerciaux privés que l'on observe aujourd'hui, tant vers des destinations orbitales que suborbitales (altitude inférieure à 100 kilomètres), avec des passagers ou des expériences automatiques, a déjà connu une poussée de fièvre similaire au début des années 1990.

À l'époque, une nouvelle classe de charges utiles prenait son essor : les constellations de satellites de télécommunication en orbite basse. La miniaturisation de l'électronique a favorisé la conception de satellites de communication beaucoup plus petits que les grosses plates-formes placées en orbite géostationnaire.

Une constellation en orbite basse est constituée d'un grand nombre de satellites, situés entre 600 et 1500 kilomètres d'altitude, sur des orbites dont le plan orbital présente un angle d'au moins 60 degrés par rapport au plan de l'équateur. À tout endroit sur la Terre, même au voisinage des pôles, la visibilité simultanée de plusieurs satellites permet une bonne connexion qui n'est perturbée ni par la traversée de l'atmosphère ni par la distance.

Le projet le plus emblématique de l'époque fut sans doute *Teledesic*, proposé par Bill Gates. Le marché

visé était celui des services Internet haut débit. Le projet initial prévoyait 840 satellites identiques, sans compter les satellites de rechange, placés sur une orbite circulaire à 700 kilomètres d'altitude. Le projet fut ensuite revu à la baisse, avec « seulement » 288 satellites (d'une masse au lancement de 1400 kilogrammes chacun).

De nombreux projets similaires ont été proposés à cette période, notamment le *MSTAR*, qui prévoyait 72 satellites de deux tonnes à 1000 kilomètres d'altitude, *Skybridge* (80 satellites à 1450 kilomètres d'altitude), *Ellipso*, *Ecco*, *Iridium*, *Globalstar*...

Pour les concepteurs et les opérateurs de lancement, un tel nouveau marché représentait le Graal. La perspective d'avoir à lancer plusieurs milliers de satellites de plus de une tonne en orbite basse, quand le marché total de l'époque représentait une quinzaine de satellites en orbite basse et une trentaine de satellites géostationnaires par an, permettait d'envisager des changements draconiens dans les lanceurs et les opérations associées.

On vit alors fleurir un grand nombre d'initiatives privées, proposant des lanceurs plus originaux les uns que les autres, le plus souvent avancés par

de grosses fortunes de l'Internet, à l'instar de ce qu'on note aujourd'hui.

Au début des années 1990, l'écroulement et les lois de la physique ont fait le tri ! De nombreux projets étaient totalement ou partiellement réutilisables : le *Roton*, par exemple, était équipé d'un immense rotor d'hélicoptère, pour le freiner lors de sa rentrée dans l'atmosphère, et d'un moteur rotatif de grand diamètre innovant ; le *Kistler K1* comportait un premier étage réutilisable, revenant se poser à la verticale sur sa base de lancement en Australie.

D'autres propositions étaient plus classiques : le *Conestoga* américain était composé d'un fagot de sept moteurs identiques ; une économie d'échelle devait réduire les coûts de production. Il explosa malheureusement lors de son premier vol ; le *Litt-LEO*, proposé par les Anglais de *BAE Systems*, était conçu de façon analogue, fagot de propulseurs solides et bon marché ; *Aérospatiale* (actuellement *Astrium*), associée à *Arianespace* et *SEP*, avait également étudié très sérieusement le *PLS*, Petit Lanceur spatial, dérivé d'étages à propulsion solide existants. La liste est longue...

Cet engouement pour l'espace culmina avec le concours *Ansari X-*

Prize, lancé en 1996. Cette compétition récompensait la première organisation non gouvernementale qui lancerait dans l'espace un véhicule habité et réutilisable. Doté d'une récompense de dix millions de dollars, le prix fut remporté en 2004 par *SpaceShipOne*. Au total, 26 candidats ont participé au concours, dont une soucoupe volante, un lanceur sous ballon, un qui flottait dans l'océan avant son décollage... Cette compétition a permis le développement de cinq ou six concepts actuels identifiés dans l'article.

Puis le soufflé est retombé. Est-ce en raison de la complexité de l'accès à l'espace, sous-évaluée par ces opérateurs privés, ou, plus vraisemblablement, à cause de l'effondrement du marché lié à l'émergence des technologies de communication de proximité, fibre optique, câbles haut débit... ? Quelques constellations ont survécu avec des ambitions commerciales revues à la baisse, et les lancements se font avec les lanceurs éprouvés et qualifiés à cette fin.

Souhaitons aux initiatives actuelles de connaître un destin plus florissant !

Christophe BONNAL
Académie internationale
d'astronautique

bon marché pour la recherche martienne, à un moment où les agences spatiales du monde entier peinent à financer la poursuite de l'exploration de Mars.

Environ 90 pour cent des 194 pays de la planète ne sont pas partenaires de la Station spatiale internationale et ont donc peu de perspectives d'accès à cette grande station unique en son genre. Pour des nations telles que la Chine, l'Inde et la Corée du Sud, des stations spatiales commerciales privées pourraient être la meilleure voie pour des séjours de longue durée dans l'espace en vue de recherches scientifiques et techniques, sans parler du prestige national.

La première (et la plus connue) de ces initiatives est la station spatiale privée de *Bigelow Aerospace*. Sans trop de publicité, la société a déjà construit deux prototypes de station spatiale qu'elle teste en orbite terrestre basse. En proposant des places pour un maximum de six chercheurs, la première station habitée de *Bigelow* doublera le nombre de chercheurs en orbite. Ce faisant, et en utilisant des taxis spatiaux privés tels que le CST-100 en préparation chez *Boeing* ou le *Dragon* de *SpaceX* (tous deux conçus pour transporter des astronautes sur la Station spatiale internationale), la station de *Bigelow* pourrait bien offrir aux chercheurs, aux agences nationales et aux entreprises privées un accès plus rapide à l'espace pour un coût au moins deux fois inférieur au prix estimé d'un lancement *Soyouz* et d'un séjour sur la Station spatiale internationale.

Des stations spatiales privées

Mais *Bigelow* n'est pas la seule entreprise sur le créneau. Une autre société, *Excalibur Almaz*, projette de construire une station similaire, mais plus petite, qui utilisera des modules de station spatiale de rechange et des véhicules de transport d'équipage datant de l'ère soviétique.

Les capsules spatiales *Dragon* de *SpaceX* pourraient aussi être utilisées comme stations spatiales durables. Actuellement, les véhicules *Dragon* sont sous contrat avec la NASA pour faire la navette avec du fret jusqu'à la Station spatiale internationale. Dans un avenir proche, elles pourraient aussi transporter des astronautes, mais le potentiel des capsules *Dragon* ne s'arrête pas là. *SpaceX* projette à la fois des missions « DragonLab » automatiques et habitées qui peuvent monter en orbite terrestre, s'y



2. LE VAISSEAU DRAGON de *SpaceX* ravitaille la Station spatiale internationale pour la première fois en mars 2013.

■ SUR LE WEB

Programme de la NASA de développement commercial pour équipages : www.nasa.gov/offices/c3po/home

Fédération des vols spatiaux commerciaux : www.commercialspaceflight.org

■ BIBLIOGRAPHIE

D. Freedman, *Vers la privatisation des vols spatiaux*, *Pour la Science*, n° 400, février 2011.

M. Belfiore, *Rocketeers : How a Visionary Band of Business Leaders, Engineers, and Pilots Is Boldly Privatizing Space*, Harper Perennial, 2008.

attarder quelques semaines ou quelques mois pour effectuer des recherches avec des charges utiles internes ou externes, et cela pour un coût inférieur à celui que factureront vraisemblablement les stations spatiales commerciales.

Ces innovations représentent les premières options fondamentalement nouvelles que nous avons pour aller dans l'espace depuis les années 1950 et 1960, époque où sont apparus la recherche suborbitale, les missions planétaires et les satellites en orbite terrestre. Mais nous en sommes encore à la première phase de cette révolution commerciale, et de nombreuses questions subsistent. Dans quelle mesure les entreprises émergentes vont-elles modifier la science spatiale et inspirer le grand public ? Parviendront-elles rapidement à convaincre davantage d'entrepreneurs de rejoindre la révolution spatiale commerciale ? La réponse dépend notamment de la capacité à innover dont les chercheurs et les agences spatiales feront preuve, et de la rapidité avec laquelle ils apprendront à s'adapter au monde de l'espace commercial et à l'exploiter.

Si l'aventure commerciale suborbitale et orbitale connaît le succès, elle pourrait ouvrir une nouvelle voie pour explorer les astéroïdes et les planètes du Système solaire. La science en tirerait des bénéfices comparables à ce qu'elle a connu quand des expéditions privées ont accédé aux régions polaires. Mais, contrairement aux pôles, dans l'espace, on peut aller toujours plus loin... ■

- L'amphithéâtre romain était à l'origine une *spectacula*, c'est-à-dire une installation conçue pour donner à voir des combats.
- D'abord en bois, il a dans un premier temps gardé la forme arrondie que lui avaient donnée les charpentiers.
- Puis l'arène elliptique, qui évite tout angle mort, est apparue. Elle s'est généralisée, sauf dans les cas où l'amphithéâtre devait aussi jouer le rôle de théâtre.
- L'amphithéâtre a alors atteint une perfection technique, qui explique que les arènes de Fréjus, d'Arles et de Nîmes soient toujours utilisées.

L'



1. LE COLISÉE À ROME, immense amphithéâtre dont l'arène est elliptique, pouvait accueillir jusqu'à 75 000 spectateurs. Ceux-ci observaient la scène sans angles morts, et sans risques de mouvements de foule dangereux.