

DES CAILLOUX DANS LES CHOSSES SÛRES

DIDIER NORDON

**Des cailloux
dans les choses sûres**



Didier Nordon épingle les scientifiques et les politiques qui extraient de la science plus qu'elle ne dit. Nul doute que chacun reconnaîtra dans ces piques... le défaut de son condisciple.

144 pages - 70 F
Code 1897

**POUR LA
SCIENCE**
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 98

Plantes trompeuses

Certaines plantes abusent les insectes pollinisateurs avec des fleurs sans nectar. On modélise l'apprentissage de l'insecte.

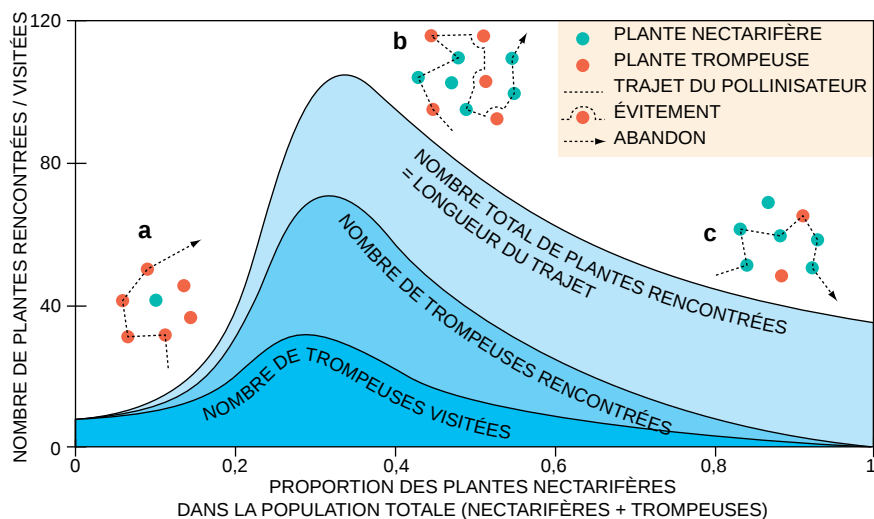
La relation entre insectes et plantes à fleurs semble un modèle de réciprocité. Les insectes qui viennent chercher leur nourriture dans les fleurs transportent, en passant de fleur en fleur, le pollen de la plante et assurent sa reproduction. Celle-ci récompense chaque visite par du nectar ou du pollen et signale la présence de cette récompense par une corolle et des parfums. Toutefois, le signal est parfois fallacieux : la plante produit une corolle attirante et des parfums comme les autres plantes, mais sans rien donner. Il y a une pollinisation « par tromperie ».

Certaines plantes trompeuses profitent du voisinage d'une plante honnête en fournissant le même signal à l'insecte. Le pollinisateur confond alors les deux plantes et continue à visiter la malhonnête, simplement parce qu'il ne la distingue pas de l'honnête. Dans d'autres cas, la plante trompeuse se contente d'être attractive, sans ressembler à une plante honnête. Le pollinisateur peut alors apprendre à l'éviter, mais il ne se rend compte de la supercherie qu'après avoir visité quelques unes de ses fleurs. La trompeuse assure ainsi sa reproduction en profitant de la « naïveté » de ses

pollinisateurs et du temps qui leur est nécessaire pour la démasquer.

Afin de simuler sur ordinateur ce mécanisme de tromperie sans mimétisme, on a modélisé l'apprentissage des pollinisateurs. Initialement, ceux-ci n'ont pas d'expérience. Toutes leurs estimations des gains attendus de telle ou telle plante ne sont que des *a priori* : l'insecte suppose qu'une plante fournit d'autant plus de nectar qu'elle fait de grandes fleurs, ce qui est généralement le cas. Au fil des visites, le pollinisateur va associer à chaque plante la récompense qu'elle fournit réellement, et décidera de visiter une plante s'il en attend autant ou plus que la moyenne des gains obtenus de chaque plante déjà visitée.

Le taux de pollinisation théorique des plantes trompeuses dépend dès lors de leur fréquence par rapport aux plantes nectarifères (leur densité). En effet, plus une plante trompeuse est fréquente, plus souvent le pollinisateur la rencontrera et donc plus facilement il apprendra à l'éviter. En outre, les pollinisateurs abandonneraient rapidement une population composée majoritairement de plantes trompeuses, car ils n'y trouveraient pas assez à manger. La plante trompeuse devrait donc être avantagée à faible fréquence. Toutefois, si l'on considère les visites de pollinisateurs comme une ressource limitée, alors la plante trompeuse entre en compétition avec les plantes nectarifères qui poussent à proximité : être trop rare devient désavantageux. Ces deux mécanismes déterminent une dépendance non linéaire de la den-



1. La proportion des plantes nectarifères et des plantes trompeuses (sans nectar) dans une population détermine le comportement de l'insecte pollinisateur. Quand les trompeuses sont majoritaires (a), l'insecte, faute de point de comparaison, n'apprend pas à les éviter : il visite celles qu'il rencontre. Toutefois, il se décourage vite en raison du faible gain : le trajet moyen (n o m b r e t o t a l d e p l a n t e s r e n c o n t r é e s) d e p l a n t e s t r o m p e u s e s e s t c o u r t .



2. L'orchidée *D a c t y l o r h i z a p r a e t e r m i s s a* est une plante trompeuse : ses fleurs n'offrent pas de nectar. Elles sont néanmoins visitées par un bourdon naïf.

sité, de sorte que le nombre de plantes trompeuses visitées est maximal à des densités intermédiaires (voir la figure 1).

En outre, si l'espèce trompeuse est variable morphologiquement, chaque variant est sélectionné selon sa fréquence au sein de la population totale de trompeuses : un variant rare, moins souvent rencontré par les pollinisateurs, est moins facilement évité et donc avantage, de sorte qu'il ne disparaîtra pas. Cette sélection dépendante de la fréquence suffit à expliquer le maintien d'un polymorphisme de couleur chez de nombreuses orchidées trompeuses (chez *Dactylorhiza sambucina*, par exemple, dont les fleurs peuvent être rouges ou jaunes au sein d'une même population). L'existence de variants morphologiques ralentit en outre l'apprentissage des pollinisateurs par rapport à la situation où toutes les trompeuses sont identiques. Par conséquent, le taux moyen de pollinisation dans une population de trompeuses augmente avec le nombre de variants morphologiques.

Ces résultats guident le choix de méthodes de conservation des plantes trompeuses menacées, telles que l'orchidée *Dactylorhiza praetermissa*, protégée en Ile-de-France (voir la figure 2). Connaissant le nombre de trompeuses visitées et fécondées par pollinisateur pour une densité donnée, ainsi que des paramètres tels que la densité en pollinisateurs, on déduit le succès reproducteur des trompeuses (le taux d'accroissement de leur population). Par une gestion adéquate des populations de plantes nectarifères, on pourrait alors modifier l'abondance relative des plantes trompeuses vivant à proximité afin d'augmenter leur succès reproducteur. En outre, en veillant à maintenir ou à recréer le polymorphisme des formes florales (qui risque d'être perdu lorsqu'une population devient trop petite), on augmenterait aussi les chances de survie de petites populations de trompeuses.

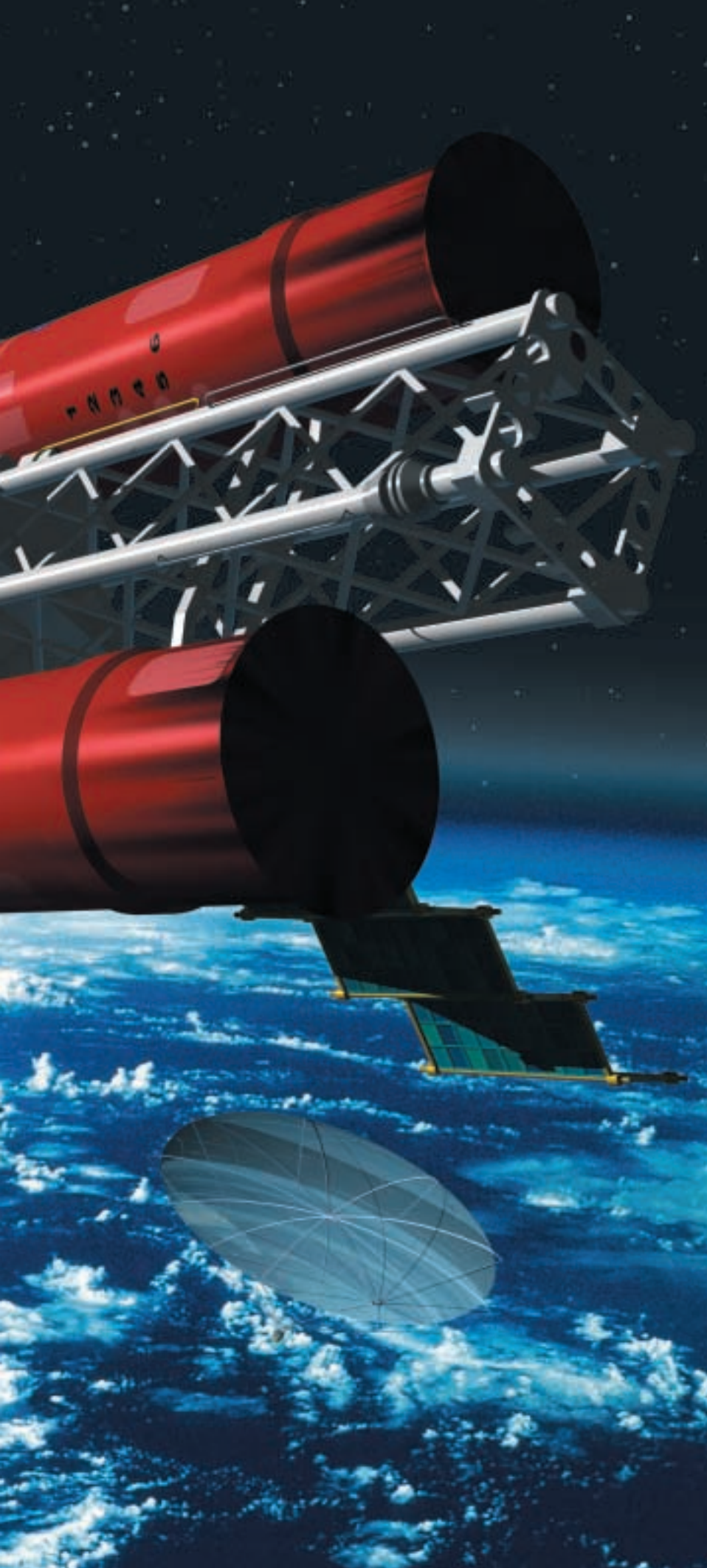
Jean-Baptiste FERDY, Conservatoire botanique du Bassin parisien/MNHN

Le transport spatial du futur

TIM BEARDSLEY

Pour permettre l'exploration de l'espace lointain, les ingénieurs devront concevoir des moyens peu onéreux et efficaces. Les idées abondent.





L'année 1996 marque une étape dans l'histoire du transport spatial : pour la première fois, les bénéfices du secteur spatial (environ 500 milliards de francs) ont été supérieurs aux dépenses engagées dans ce domaine par les gouvernements. Cette croissance se poursuit. En 1997, quelque 150 satellites ont mis en orbite des «charges utiles». Selon les résultats des études de marché, les lancements commerciaux se multiplieront encore : entre 1998 et 2007, 1 200 satellites de télécommunications seront lancés. Les sommes en jeu lors de cette ruée vers l'espace sont supérieures à celles de la ruée vers l'or du siècle dernier.

Les passionnés d'espace attendent avec impatience le jour où chacun pourra séjourner dans une station spatiale, sur la Lune ou sur Mars. L'Association des transports spatiaux, un regroupement d'industriels, a récemment créé une division consacrée à la promotion du tourisme spatial, qu'elle considère comme un moyen viable de stimulation du développement économique au-delà de la Terre.

Sur ce chemin vers les étoiles, la principale pierre d'achoppement reste l'extrême difficulté du voyage dans l'espace. Même les mises en orbite sont coûteuses et risquées. Avec les techniques actuelles de propulsion spatiale, les sondes n'atteignent que très lentement des destinations lointaines du Système solaire : les engins spatiaux mettent des années à tourner autour des planètes afin d'accélérer grâce à leur gravité. Avec les moyens actuels, le voyage vers d'autres systèmes planétaires prendrait plusieurs siècles.

Toutefois, les ingénieurs ne manquent pas d'idées pour mettre au point de nouveaux systèmes de propulsion qui étendraient la présence

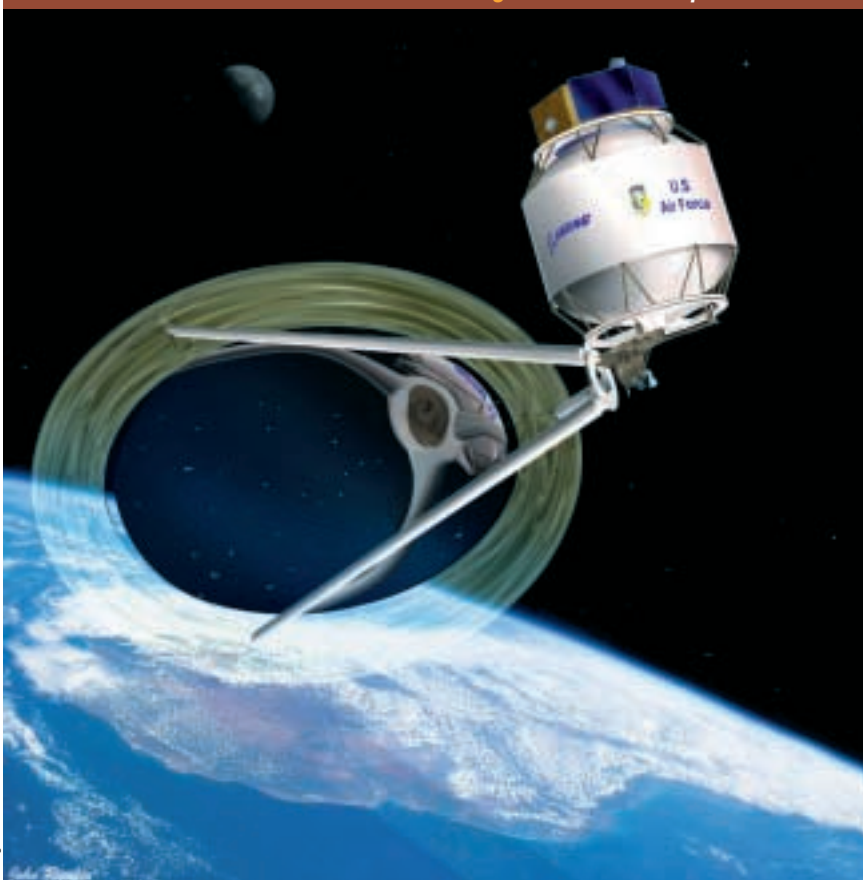
1. LES VAISSEAUX SPATIAUX DU FUTUR seront probablement très différents des modèles actuels. Une station à énergie solaire (en haut, à gauche), envoie des faisceaux de micro-ondes vers un vaisseau solaire (en bas, à gauche) propulsé par des forces magnétohydrodynamiques. Une navette spatiale (en arrière-plan, en bas) a libéré un satellite qu'un câble en rotation a capté (au premier plan). Un vaisseau propulsé par une fusée à un étage déploie un autre satellite (en bas, au centre), tandis qu'un vaisseau à voile solaire s'apprête à partir vers une destination lointaine (en bas, à droite).

Véhicule de transfert orbital solaire

Date de lancement prévue : 2002

Estimation du coût : 180 millions de francs

Source d'énergie : solaire thermique



2. CE VÉHICULE DE TRANSFERT ORBITAL SOLAIRE sera construit par la Société *Boeing*. Il utilise un grand réflecteur qui focalise les rayons du Soleil sur un bloc de graphite. Chauffé à 2 100 degrés, ce dernier vaporise de l'hydrogène liquide stocké à bord, ce qui engendre une poussée. Le véhicule transfère en quelques semaines des charges utiles des orbites terrestres basses vers des orbites plus hautes. Ce véhicule solaire léger peut mettre des satellites en orbite à l'aide de fusées plus petites que les lanceurs classiques.

humaine au-delà de la Terre. Certains proposent des améliorations des fusées ou des techniques de propulsion existantes, d'autres cherchent à exploiter l'énergie nucléaire ou la poussée de puissants faisceaux laser. On a même envisagé des « ascenseurs », qui hisseraient des charges en orbite.

« Allez en orbite basse, et vous serez à mi-chemin de n'importe quelle destination du Système solaire », a écrit l'auteur de science-fiction américain Robert Heinlein. Les spécialistes admettent effectivement que l'exploration spatiale ne se développera pleinement que si l'on réduit les coûts d'accès aux orbites basses : la plupart des projets visant à mettre l'espace lointain à la portée de l'humanité sont fondés sur l'assemblage en orbite de volumineux engins spatiaux ou d'autres équipements.

Dès aujourd'hui, les États et les sociétés privées ont besoin de systèmes de lancement plus performants. La plupart des charges utiles commerciales sont destinées soit à l'orbite géostationnaire, déjà bien encombrée, à 36 000 kilomètres au-dessus de l'équateur, soit à l'orbite terrestre basse, à quelques centaines de kilomètres d'altitude. L'orbite terrestre basse devient une zone d'intense activité spatiale, car les satellites qui y évoluent peuvent transmettre directement des signaux à des ordinateurs ou même à des récepteurs portables situés sur Terre.

Le nombre de satellites scientifiques augmentera également de manière importante : dans les dix prochaines années, plus de 50 observatoires et sondes d'exploration seront lancés. Les agences spatiales cherchent à faire des lanceurs plus rapides,

plus performants et moins chers (les missions scientifiques coûtent aujourd'hui trois fois moins cher qu'au début des années 1990). En outre, au cours des 15 années d'existence de la Station spatiale internationale, 43 lancements d'assemblage et des dizaines de lancements pour l'acheminement des équipages, du carburant et autre fret seront nécessaires. Une multitude de satellites d'observation de la Terre partiront également dans l'espace dans les prochaines années : satellites espions, satellites météorologiques ou encore plates-formes de surveillance de l'évolution du Globe. La demande pressante de lancements a déjà incité la Société américaine *Boeing*, la Société norvégienne *Kvaerner* et la Société russe *RSC-Energia* à créer une filiale nommée *Sealaunch*, qui a transformé une plate-forme pétrolière en une base de lancement mobile semi-submersible. Cette plate-forme de 34 000 tonnes se déplacera jusqu'à des sites de lancement favorisant l'accès aux orbites choisies.

Après la ruée vers l'or

De nombreux scientifiques aimeraient disposer de plus d'engins spatiaux pour surveiller la Terre et explorer l'espace. Les plus visionnaires prévoient une industrie spatiale prospère, fondée sur l'exploitation des minéraux des astéroïdes ou des planètes, et sur l'extraction de gaz de leur atmosphère ; on produirait ainsi l'énergie et les denrées nécessaires à la vie dans l'espace. À l'Université d'Arizona, K. Sridhar a ainsi mis au point une pile électrochimique afin de fabriquer de l'oxygène à partir de l'atmosphère martienne. La Société *SpaceDev* a déjà mentionné son intention d'extraire des minéraux d'astéroïdes, ce qui lui a valu une plainte de la Commission des affaires boursières américaine pour son exaltation imprudente. Quelques rêveurs cherchent même à envoyer des sondes au-delà du Système solaire, dans l'immensité de l'espace interstellaire.

L'intérêt pour l'espace est d'autant plus remarquable que le coût en est extrêmement élevé. Avec les fusées classiques, pour la plupart mises au point par les États, chaque kilogramme placé en orbite terrestre basse revient à 120 000 francs. La navette spatiale, exploitée par les Sociétés *Boeing* et *Lockheed Martin*, devait être

un moyen bon marché d'aller dans l'espace, mais elle est finalement aussi coûteuse que les lanceurs classiques. De plus, depuis la catastrophe de la navette *Challenger*, en 1986, la navette a été réservée aux études et à la recherche. Si l'on équipait une navette pour conduire 50 passagers dans l'espace, ceux-ci devraient payer chacun 50 millions de francs pour que l'exploitant rentre dans ses frais.

Aujourd'hui, le voyage spatial coûte cher, parce que les étages propulseurs emportent à la fois le comburant et le carburant pour leur court trajet ; sauf pour la navette spatiale, ces étages sont abandonnés et se consomment dans l'atmosphère après quelques ardentes minutes de gloire. Pendant longtemps, les ingénieurs ont espéré réduire les coûts de lancement en construisant des engins réutilisables, qui ne nécessiteraient qu'un réapprovisionnement en carburant et quelques vérifications de routine entre les vols, comme les avions de ligne. Les agences spatiales du monde entier et quelques sociétés

apparues ces dernières années se consacrent à la réduction des coûts de lancement. La plupart cherchent à adapter les techniques existantes afin de proposer des lancements moins coûteux de petites charges utiles en orbite terrestre basse.

Toutefois, la construction de fusées, même classiques, reste difficile. Le premier lanceur *Delta 3* de la Société *Boeing*, la première grande fusée construite par le secteur privé, a explosé peu de temps après son décollage de Cap Canaveral, en août 1998. Une fusée *Titan 4A*, construite conjointement par l'armée américaine et par la Société *Lockheed Martin*, avait explosé au même endroit deux semaines plus tôt, et le premier tir de la fusée européenne *Ariane 5*, en 1996, a été un échec cuisant en raison d'une erreur de conception dans le logiciel de vol. Aux États-Unis, au cours de la dernière décennie, des désaccords sur les financements ont conduit le gouvernement à abandonner plusieurs projets de mise au point de nouvelles fusées non réutilisables.

Les aventuriers

Les entrepreneurs sont toutefois tenaces. L'un d'eux, la Société *Kistler Aerospace*, construit les deux premiers lanceurs d'une série de cinq qui seront équipés de moteurs russes. Le premier étage de ces lanceurs reviendra vers son site de lancement ; le second tournera autour de la Terre avant de revenir. Les deux étages descendront en parachute et atterriront sur des coussins gonflables. La Société *Kistler* a rassemblé 2,6 milliards de francs, et elle cherche un financement supplémentaire de cet ordre. Malgré la crise financière mondiale, les dirigeants de cette société estiment que les premiers vols devraient commencer cette année. Une autre société, *Beal Aerospace Technologies*, construit un lanceur à trois étages qui devrait voler au cours du troisième trimestre de l'an 2000 ; une version réutilisable serait mise au point par la suite.

D'autres sociétés cherchent à réduire les coûts de lancement en utilisant l'oxygène de l'atmosphère :

Fusée à rotation Roton	Date de lancement prévue : 2000	Estimation du coût : 600 millions de francs	Source de propulsion : moteur rotatif à force centrifuge
Le Roton libère sa charge utile en orbite basse Les pales du rotor en rotation libre se déploient pour la descente L'engin commence son retournement et déploie son rotor La fusée entre dans l'atmosphère par la base Le Roton s'élève dans l'atmosphère grâce à son moteur rotatif Les pales sont mues par de petites fusées, et la stabilisation est effectuée par des propulseurs latéraux			

3. LE **ROTON** de la Société *Rotary Rocket* décolle verticalement, propulsé par un moteur de fusée rotatif. Après la libération de la charge utile, le véhicule retourne sur Terre en dépliant des pales

d'hélicoptère. Il rentre dans l'atmosphère par la base. Les pales sont d'abord en rotation passive, puis elles sont entraînées par de petites fusées montées à leurs extrémités lors de l'atterrissage vertical.

la masse de combustible emporté serait ainsi réduite. À cette fin, on envisage des véhicules qui décolleraient et atterriraient horizontalement. La Société *Pioneer Rocketplane* étudie ainsi un véhicule léger à deux places, propulsé par un moteur fusée et par des réacteurs classiques. Cet engin, avec une charge utile et un second étage dans sa petite soute à cargaison, similaire à celle de la navette, décollerait d'une piste à l'aide de ses réacteurs et monterait à 6 100 mètres. Là, un avion de ravitaillement lui fournirait 64 tonnes d'oxygène liquide. Après séparation des deux avions, l'oxygène servirait à la mise à feu du petit moteur fusée qui propulserait l'engin à Mach 15 (15 fois la vitesse du son, soit 18 500 kilomètres par heure) à 113 kilomètres d'altitude, où il larguerait sa charge utile et son second étage. La plus grosse difficulté est la mise au point d'un mécanisme sûr pour le transfert de l'oxygène liquide.

Inversement, un avion spatial à décollage horizontal est étudié par la Société *Kelly Space and Technology*. Cet *Astroliner* transporterait jusqu'à 32 tonnes de charge utile. C'est une petite navette qui serait remorquée jusqu'à 6 100 mètres d'altitude. Là, on testerait ses moteurs fusées et on déciderait si l'on doit les allumer, afin de propulser l'engin à 122 kilomètres d'altitude. En cas de mauvais fonctionnement des moteurs, l'*Astroliner* reviendrait vers le site de lancement. Les deux premiers véhicules devraient coûter près de trois milliards de francs.

D'autres sociétés explorent des techniques plus originales. L'un des projets les plus fascinants émane de la Société *Rotary Rocket*, qui construit une fusée habitée à décollage et atterrissage verticaux. La caractéristique originale du projet, nommé *Roton*, est son moteur : le comburant et le carburant alimenteront 96 chambres de combustion à l'intérieur d'un disque horizontal de sept mètres de diamètre qui tournera à 720 tours par minute avant le lancement. La force centrifuge, créant la pression nécessaire à la combustion, éviterait les turbopompes, massives et coûteuses. Le *Roton* redescendrait à l'aide de pales d'hélicoptères repliables, mises en rotation par de petites fusées montées à leur extrémité, comme un soleil pyrotechnique (voir la figure 3). La Société *Rotary Rocket* estime ainsi réduire le prix de la mise en orbite terrestre basse

Les moteurs aérobies

Charles McClinton

Depuis des années, les ingénieurs rêvent de construire un avion qui atteindrait des vitesses hypersoniques, supérieures à Mach 5 (cinq fois la vitesse du son). Propulsé par un réacteur qui consommerait l'oxygène de l'air, un avion hypersonique pourrait même se mettre en orbite. Les progrès de l'aéronautique et les besoins de l'aérospatiale ont récemment conduit les ingénieurs à étudier de tels systèmes.

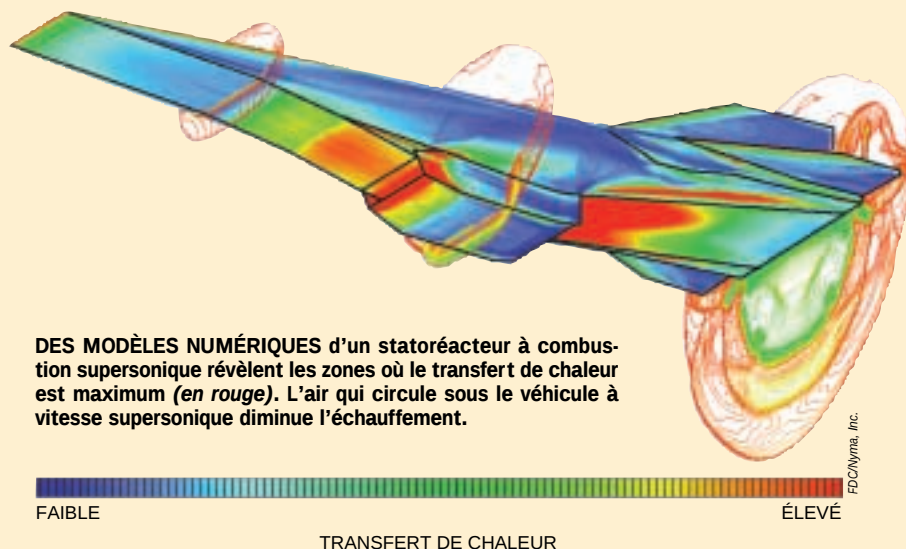
Les moteurs «aérobies» présentent plusieurs avantages par rapport aux fusées : utilisant l'oxygène de l'atmosphère, ils ne consomment pas de comburant, ce qui les allège et réduit le coût de leur fonctionnement. En outre, les véhicules à moteurs aérobies exploitent plus les forces de portance que la poussée, de sorte qu'ils sont plus maniables et plus sûrs : en cas de panne de moteur, le véhicule revient vers la Terre en vol plané. Les missions sont également plus flexibles.

Toutefois, les moteurs aérobies sont moins perfectionnés que les fusées étudiées depuis 40 ans. Certes, les ingénieurs maîtrisent bien les turboréacteurs, qui fonctionnent par compression de l'air atmosphérique et par combinaison de ce dernier avec un carburant, suivi de la combustion du mélange et de la détente des produits de combustion. Cependant, les turboréacteurs actuels ne propulsent les avions qu'à des vitesses inférieures à Mach 4 ; au-delà, la turbine et les pales qui compriment l'air sont endommagées par la surchauffe.

Heureusement, à ces vitesses supersoniques, la turbine devient superflue si le moteur est équipé d'une prise d'air qui comprime et ralentit l'air en mouvement. Ces statoréacteurs ne pouvant fonctionner qu'à grandes vitesses, on les a associés à des turboréacteurs, comme sur l'avion expérimental français *Griffon II*, qui a atteint la vitesse de 2 330 kilomètres par heure lors d'un vol en 1959. Des statoréacteurs ont également été associés à des fusées dans des missiles.

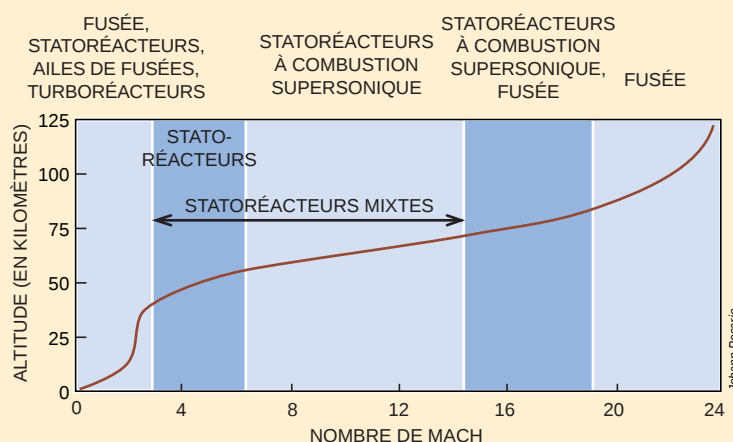
À des vitesses supérieures à Mach 6, la chambre de combustion atteint une température telle que les produits de combustion (l'eau) se décomposent. Pour atteindre des vitesses supérieures, les statoréacteurs à combustion supersonique doivent réduire la pression de l'air à l'entrée ; l'écoulement de l'air dans le réacteur restant supersonique, sa température n'augmente pas autant que dans les statoréacteurs classiques. Le carburant est injecté dans l'air supersonique auquel il se mélange et où il doit brûler en une milliseconde. La vitesse maximale des statoréacteurs à combustion supersonique (nommés *scramjet*) reste à déterminer, mais elle semble être supérieure à la vitesse de satellisation (Mach 20 à 25). Toutefois, à ces vitesses considérables, les avantages des statoréacteurs à combustion supersonique par rapport aux fusées sont minimes, voire discutables, en raison des fortes contraintes structurales que leur conception engendre.

Des moteurs aérobies hypersoniques fonctionnent avec des carburants variés, tels l'hydrogène et les hydrocarbures. L'hydrogène liquide qu'utilise la navette spatiale américaine ou le lanceur européen *Ariane 5* est avantageux, car il refroidit le moteur et le véhicule





MÉTHODE DE PROPULSION



LES STATORÉACTEURS À COMBUSTION SUPERSONIQUE (ci-dessus) captent de grandes quantités d'air, au-dessous de l'avion, pour faire brûler un carburant tel que l'hydrogène liquide. Des statoréacteurs à double mode de fonctionnement pourraient être associés à des fusées (graphique) dans un véhicule qui «volerait» vers l'espace.

avant le lancement. Les hydrocarbures, moins efficaces, limitent la vitesse à environ Mach 8.

Dans un véhicule propulsé par un statoréacteur à combustion supersonique, la distinction entre moteur et véhicule est floue : l'air est principalement dévié – et comprimé – par la partie inférieure du véhicule. En général, cette déviation crée une discontinuité de la pression, nommée onde de choc, qui apparaît près du nez de l'aéronef et se propage dans l'atmosphère. La majeure partie de l'air comprimé entre le bas du véhicule et l'onde de choc est dirigée vers le moteur. L'air s'échauffe quand il est ralenti et quand le carburant se consume dans la chambre de combustion. Le produit de la réaction se détend dans une tuyère interne et externe, ce qui engendre la poussée. Les pressions élevées sur la partie inférieure du véhicule créent également une portance.

Pour élargir le domaine de fonctionnement des statoréacteurs à combustion supersonique, les ingénieurs ont conçu des véhicules mixtes, qui volent soit en mode statoréacteur simple, soit en mode combustion supersonique.

Comme les statoréacteurs classiques ou à combustion supersonique ne fonctionnent efficacement que s'ils se déplacent à plus de Mach 2 ou 3, une propulsion additionnelle (turboréacteur ou fusée) est nécessaire à faible vitesse. Les «moteurs fusées à cycles combinés», qui seraient utilisables pour un véhicule spatial, sont fondés sur une architecture combinée : une fusée intégrée dans la chambre de combustion du statoréacteur crée la poussée du décollage jusqu'aux vitesses subsoniques, puis des statoréacteurs

accélèrent jusqu'à la vitesse du son ; le fonctionnement en mode statoréacteur passe en propulsion à combustion supersonique jusqu'à au moins Mach 10 ou 12, puis la fusée reprend le relais pour augmenter la poussée. Au-delà de Mach 18, c'est la fusée seule qui propulse le véhicule en orbite et le manœuvre dans l'espace.

Beaucoup reste à faire avant que les statoréacteurs à combustion supersonique soient au point. Grâce à des méthodes numériques élaborées, on a établi les plans d'un véhicule de lancement avec un statoréacteur à combustion supersonique intégré dans sa structure. Les ingénieurs doivent encore trouver des matériaux légers et résistant à la chaleur pour revêtir les systèmes qui assureront un mélange de carburant et une combustion rapides et efficaces.

Dans les années 1970, le Centre de recherche Langley de la NASA a démontré la faisabilité des statoréacteurs à combustion supersonique sur des modèles de véhicules hypersoniques en soufflerie. Puis des équipes anglaises et françaises, notamment, ont testé ces systèmes au sol. Aujourd'hui, les ingénieurs testent, au sol toujours, des prototypes dans des conditions qui reproduisent celles qu'un avion rencontrerait à Mach 15. Au cours d'essais en vol, les Russes ont fait fonctionner de statoréacteurs en double mode jusqu'à une vitesse de Mach 6,4.

Charles MCCLINTON est directeur technique du programme Hyper-X au Centre de recherche Langley de la NASA.

à un dixième du prix actuel. Le premier vol orbital est prévu en l'an 2000. Les chambres de combustion sont en phase de test, et les premiers vols atmosphériques devraient avoir lieu cette année.

La Société californienne *Space Access* étudie un véhicule totalement différent, mais tout aussi novateur : un lourd avion spatial devrait décoller et atterrir horizontalement, propulsé par un moteur nommé statoréacteur à éjecteur. Ce nouveau moteur, déjà testé au sol, propulsera le véhicule de l'arrêt jusqu'à Mach 6 (7 300 kilomètres par heure), une performance bien au-delà de toutes les possibilités actuelles. Ce moteur serait une dizaine de fois plus performant que n'importe quel moteur existant.

À Mach 6, on allumera deux fusées à hydrogène liquide. À Mach 9 (11 000 kilomètres par heure), son nez s'ouvrira comme la mâchoire d'un crocodile, libérant les deuxième et troisième étages, ainsi que la charge utile (voir la figure 4). Tous les étages, équipés d'ailes, retourneront vers la Terre, où ils atterriront horizontalement sur la piste de lancement. L'avion de *Space Access* emportera des charges utiles d'environ 14 tonnes, comme la navette spatiale. Le service commercial pourrait débuter en 2003.

Le plus gros lanceur en projet est le X-33 de la Société *Skunk Works*. C'est un engin d'essai, deux fois plus petit que le futur «moteur aérodynamique linéaire», dont il teste le principe. En théorie, le X-33 pourrait propulser un véhicule entièrement réutilisable, à décollage vertical ; un seul étage de moteurs s'adaptera automatiquement aux variations de pression atmosphérique. Malgré la difficulté de sa réalisation, le moteur X-33 ne pourra assurer la mise en orbite de charges. En outre, des difficultés de construction ont retardé de six mois son premier vol, qui devrait avoir lieu à la fin de 1999. Selon les ingénieurs de la NASA, on devra poursuivre les études un an ou deux avant de décider la construction d'un véhicule grandeur nature fondé sur le principe du X-33. Notamment, on ne dispose d'aucun autoclave assez grand pour durcir le réservoir d'hydrogène liquide, en matériaux composites, et l'on doit perfectionner les tuiles métalliques qui protégeront le véhicule de la chaleur engendrée par la rentrée dans l'atmosphère.

Les câbles spatiaux

Robert Forward et Robert Hoyt

Lorsque l'humanité colonisera la Lune et d'autres planètes, utilisera-t-elle des fusées ou une technique aussi rudimentaire que la corde ?

La question est sérieusement à l'étude, car les ingénieurs ont montré que des systèmes de cordes, ou, plus exactement, de câbles, peuvent propulser des objets dans l'espace de deux façons. D'une part, un câble épais, reliant deux satellites, peut permettre à l'un de propulser l'autre sur une orbite différente, un peu à la manière d'une fronde. On peut adapter ce concept au transport de charges utiles vers la Lune ou au-delà. D'autre part, un câble conducteur qui balayerait l'espace et, notamment, le champ magnétique terrestre, serait le siège de forces propulsives s'il était parcouru par un courant, conformément à la loi d'Ampère. L'avantage principal des câbles serait leur faible coût d'exploitation. Au lieu de consommer d'énormes quantités de propergols, ils fonctionneraient en récupérant une partie de la quantité de mouvement d'un corps déjà en orbite ou en utilisant l'énergie électrique fournie par des panneaux solaires.

À ce jour, 17 missions spatiales ont utilisé des câbles. La plupart d'entre elles ont été des succès, mais le public a surtout entendu parler de deux échecs. En 1992, un satellite construit par l'Agence spatiale italienne devait être lâché loin de la Terre, à partir de la navette spatiale *Atlantis*, à l'extrémité d'un long câble constitué de fils de cuivre isolés, mais le mécanisme de déroulage s'est bloqué et l'expérience a été interrompue.

Quatre ans plus tard, au cours d'une mission de la NASA, 20 kilomètres de câble ont été déroulés ; le déplacement de la navette à travers le champ magnétique de la Terre a engendré une tension de 3 500 volts dans le câble, et un courant de un ampère s'est propagé à travers le câble, entre la navette et le satellite. L'expérience a montré que ces câbles électrodynamiques peuvent transformer l'énergie orbitale de la navette en énergie électrique, et réciproquement. Malheureusement, un défaut d'isolation a créé un arc électrique entre le câble et la canne de déploiement, qui brûla et cassa le câble. Malgré l'échec de la partie électrodynamique du projet, cet échec illustra de manière spectaculaire le transfert de quantité de mouvement. Lors de la création de l'arc, le satellite italien se trouvait à 20 kilomètres au-dessus de la navette, et il était tiré à une vitesse supérieure à la vitesse orbitale de cette altitude élevée. Ainsi, lorsque le câble s'est rompu, la quantité de mouvement excédentaire a fait monter le satellite à sept fois la longueur du câble, soit à 140 kilomètres au-dessus de la navette.

D'autres tests ont mieux réussi. En 1993, des ingénieurs ont déroulé vers la Terre un câble attaché à un grand satellite avec une charge utile à son extrémité. La charge utile, reliée au satellite par ce câble de 20 kilomètres de long, tournait alors moins vite que la vitesse orbitale nécessaire au maintien en orbite d'un objet se trouvant à cette altitude (pour une orbite circulaire, la vitesse du satellite diminue quand l'altitude augmente). La coupure du câble à un moment approprié a déclenché la descente de la charge utile vers un point prédéterminé de la surface terrestre. Une telle capsule de rentrée atmosphérique pourrait être utilisée par la Station spatiale internationale pour le retour rapide des charges utiles vers la Terre, notamment pour le matériel scientifique qui ne peut attendre la prochaine arrivée de la navette.

En 1994, au cours d'une mission similaire, on a attaché une charge utile au bout d'un câble de 20 kilomètres de long pour étudier combien de temps le câble, d'une épaisseur équivalente à celle d'une corde de cerf-volant, résisterait aux impacts de micrométéorites et de débris spatiaux. Comme une particule rapide de la taille d'un grain de sable pouvait facilement couper ce câble, les ingénieurs avaient estimé que sa durée de vie serait de douze jours. Après quatre jours seulement, il était déjà coupé.

Comment tresser les fils de façon qu'ils ne soient pas tous coupés par une même particule et que, si l'un d'eux lâche, les autres conservent la liaison ? Des ingénieurs ont utilisé des fibres de polymères très résistantes, le *Spectra*, pour fabriquer une tresse creuse de 2,5 millimètres de diamètre, entourée de fils lâches. Un tel câble de quatre kilomètres de long, tendu entre deux satellites lancés en juin 1996, est resté en orbite sans avoir été coupé pendant presque trois ans.

Une autre architecture de câble a également été testée : une mince bande de plastique de trois centimètres de large, garnie de brins de fibres solides sur toute sa longueur. Le câble de six kilomètres devrait résister pendant plusieurs années dans l'espace, mais la bande l'alourdit. Nous cherchons aujourd'hui à alléger ce câble plat, en concevant des câbles multifilaires à motif ajouré, comme un filet ; la masse sera inférieure, et la durée de vie dans l'espace devrait atteindre plusieurs décennies.