

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.

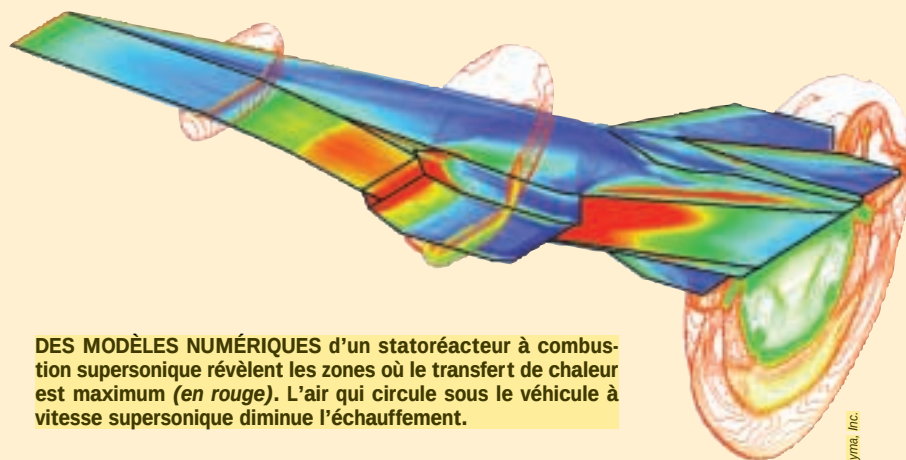
Les moteurs «aérobies» présentent plusieurs avantages par rapport aux fusées : utilisant l'oxygène de l'atmosphère, ils ne consomment pas de comburant, ce qui les allège et réduit le coût de leur fonctionnement. En outre, les véhicules à moteurs aérobies exploitent plus les forces de portance que la 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



DES MODÈLES NUMÉRIQUES d'un statoréacteur à combustion supersonique révèlent les zones où le transfert de chaleur est maximum (en rouge). L'air qui circule sous le véhicule à vitesse supersonique diminue l'échauffement.

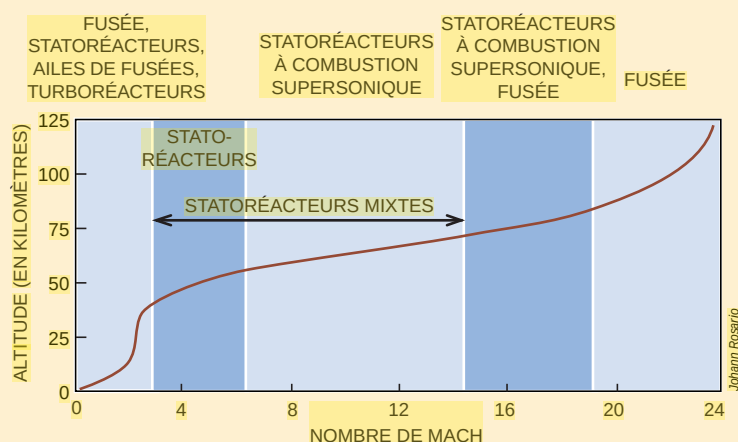
FAIBLE

TRANSFERT DE CHALEUR

ÉLEVÉ



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 résistants 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 des 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.