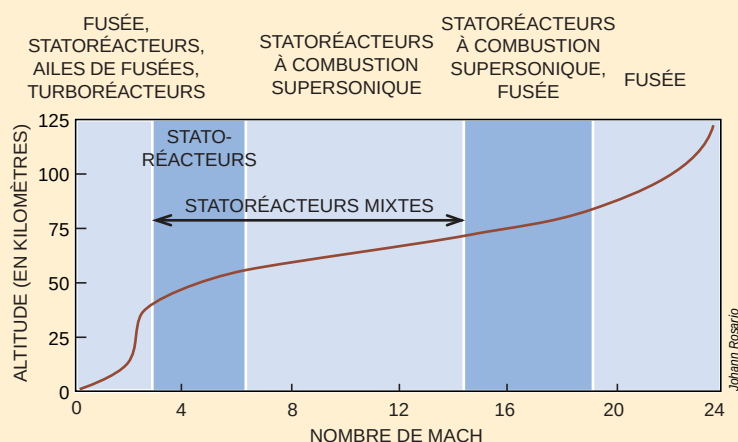




MÉTHODE DE PROPULSION



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.

Des câbles électrodynamiques vont également être essayés. Vers le milieu de l'an 2000, une mission de la NASA démontrera qu'un câble conducteur permet d'abaisser l'orbite de l'étage supérieur d'un lanceur *Delta 2*. À la Société *Tethers Unlimited*, nous mettons au point une version commerciale de cette idée : un petit caisson serait attaché à un satellite ou à l'étage supérieur avant le lancement ; à l'achèvement de la mission ou en cas de dysfonctionnement, le câble conducteur serait déployé et, freiné par le champ magnétique de la Terre, il ferait rapidement perdre de l'altitude au véhicule jusqu'à ce qu'il brûle dans l'atmosphère supérieure. Nous testerons un tel système de « désorbitage », vers la fin de l'an 2000, sur un étage supérieur de fusée construit par la Société russe *Lavochkin Association*.

La NASA envisage également d'utiliser des câbles électrodynamiques pour une propulsion ascendante. Dans ce système, des panneaux solaires fourniraient un flux d'électricité à travers le câble pour la propulser dans le champ magnétique terrestre. La force résultante monterait des charges utiles autour de la Terre. On maintiendrait ainsi la Station spatiale internationale en orbite, ce qui éviterait les ravitaillements en carburant.

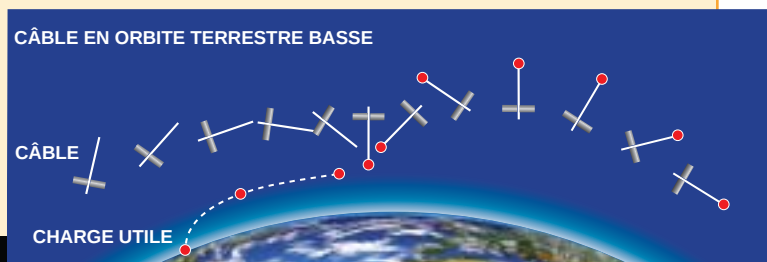
Jusqu'où les câbles emporteront-ils l'humanité ? Nous avons analysé un système de câbles tournant, de plusieurs centaines de kilomètres de long, en orbite, qui enverraient des charges utiles vers la Lune, et même plus loin. Tel Tarzan qui se balance de liane en liane, on accrocherait d'abord une charge utile, à l'aide d'un véhicule de lancement réutilisable, sur un câble en orbite terrestre basse, qui transférerait la charge à un

autre câble sur une orbite terrestre elliptique plus éloignée ; le deuxième câble lancerait alors l'objet vers la Lune, où il serait capturé par un câble en orbite lunaire.

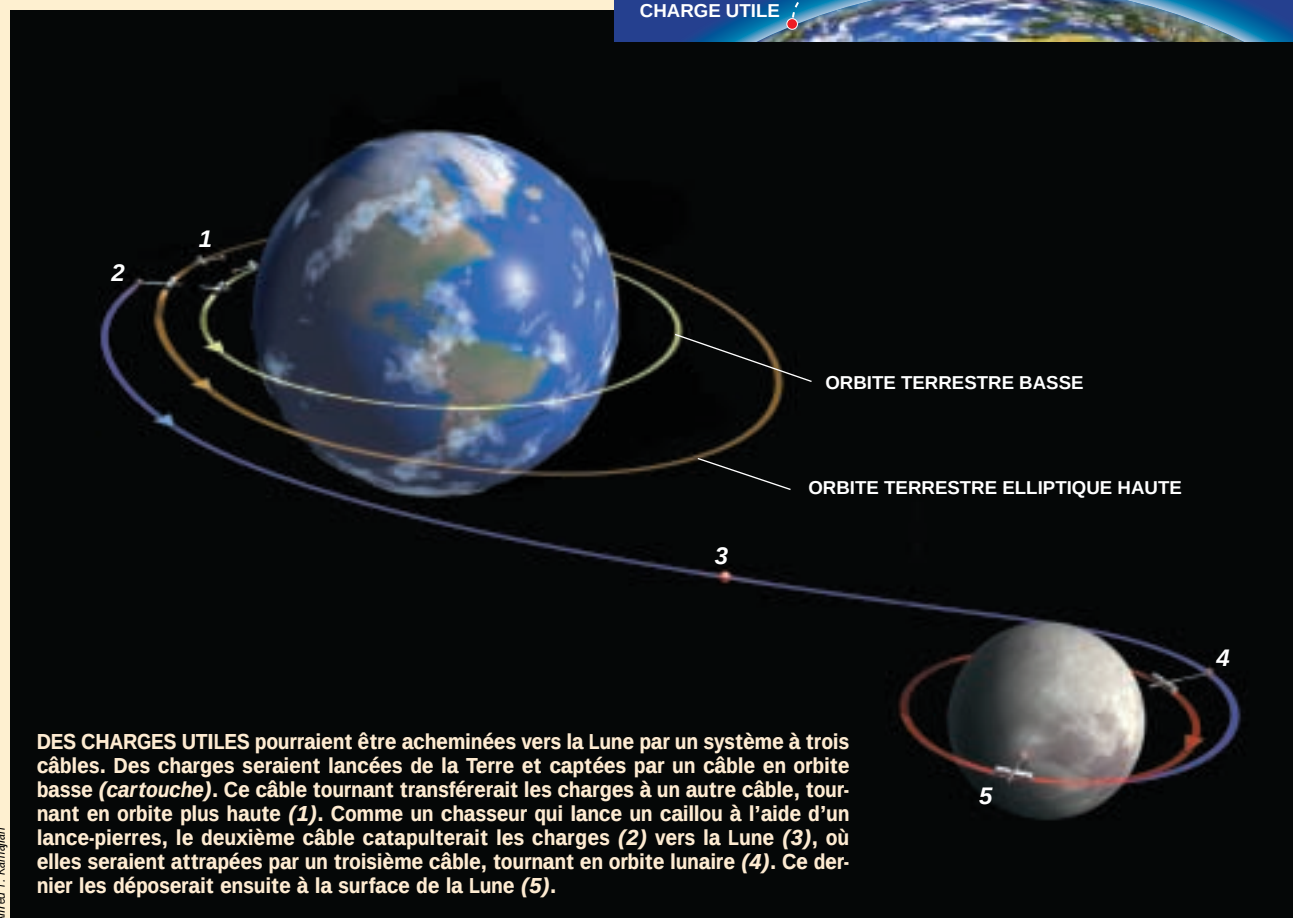
Le câble lunaire tournerait autour de la Lune à une vitesse telle que, une fois la charge utile capturée, il déposerait l'objet en douceur, à la surface de la Lune, une demi-rotation plus tard. Simultanément, le câble lunaire prendrait en charge un objet à retourner vers la Terre. Aucun carburant ne serait nécessaire si la masse à déposer et la masse à reprendre sont égales. Un tel mécanisme de transport formerait une navette, faisant du voyage lunaire un événement fréquent et banal.

De nombreux défis techniques restent à relever avant que ce système devienne une réalité, mais il est porteur d'un énorme potentiel. Un jour peut-être, des câbles tournant autour de nombreuses planètes et de leurs satellites, transporteront-ils les marchandises d'un commerce interplanétaire florissant.

Robert FORWARD et Robert HOYT sont les fondateurs de la Société *Tethers Unlimited*.



Johann Rosario



Alfred T. Kamajian

Le projet *VentureStar*, dont le X-33 est l'amorce, a été décidé par le Congrès américain, mais le premier *VentureStar* ne sera pas habité. Afin de prévoir les vols habités, la NASA a récemment demandé aux industriels d'étudier un véhicule expérimental de taille réduite, le X-34.

Pour les techniques de l'après X-33 et X-34, la NASA a récemment renforcé ses travaux sur les moteurs d'avions hypersoniques, relégués au second plan depuis l'annulation du programme d'avion aérospatial en novembre 1994. Des statoréacteurs à combustion supersonique (*scram-jet*), variantes des statoréacteurs classiques, mais qui fonctionnent à des vitesses supérieures à Mach 6 (7 300 kilomètres par heure), pourraient équiper un engin orbital à un seul étage. À partir de l'an 2000, plusieurs avions équipés de ces statoréacteurs, nommés X-43, voleront sans pilote jusqu'à Mach 10 (12 200 kilomètres par heure), puis s'échoueront dans l'océan Pacifique (voir l'encadré de la page 40).

Au-delà de la Terre

Dès qu'un vaisseau spatial quitte l'atmosphère et atteint une vitesse orbitale (environ Mach 25), les contraintes changent de nature. Notamment, le véhicule n'a plus à vaincre la gravité terrestre et la résistance de l'air. Plusieurs types de propulseurs sont à l'étude, notamment le moteur ionique qui équipe aujourd'hui la sonde *Deep Space 1* de la NASA. Les moteurs ioniques fonctionnent en accélérant les atomes chargés (ou ions) d'un gaz à l'aide d'un courant électrique de haute tension. En quittant le moteur, les ions produisent une poussée. Le gaz le plus utilisé est le xénon.

Sur la sonde *Deep Space 1*, l'énergie est fournie par des panneaux solaires, mais, en théorie, n'importe quel générateur électrique est envisageable. Les moteurs ioniques fournissent dix fois plus de poussée par kilogramme de «combustible» (ici du gaz) que les moteurs chimiques, de sorte que le moteur peut emporter moins de gaz. Ainsi, les moteurs ioniques, fonctionnant en continu pendant des années, permettraient à des engins spatiaux d'atteindre des vitesses considérables. Ils autoriseraient des missions d'exploration très longues, vers Uranus et vers Neptune,

Les vaisseaux photoniques

Leik Myrabo

Les vaisseaux spatiaux actuels emportent avec eux leur énergie. On réduirait considérablement le coût des voyages spatiaux en poussant les vaisseaux avec de la lumière laser ou avec des micro-ondes. Au cours des dernières années, des expériences financées par la NASA et par l'armée américaine ont démontré la faisabilité de vaisseaux spatiaux photoniques, poussés par un faisceau laser infrarouge pulsé, émis de la Terre. Les surfaces réfléchissantes du véhicule concentrent le faisceau en un anneau où il chauffe l'air jusqu'à une température d'environ 30 000 degrés (cinq fois la température de la surface solaire). La dilatation explosive de l'air ainsi chauffé engendre la poussée.

En utilisant un laser militaire à dioxyde de carbone de dix kilowatts, qui émettait 28 impulsions par seconde, Franklin Mead et moi-même avons propulsé une maquette d'une dizaine de centimètres de diamètre, stabilisée par rotation, à une hauteur de plus de 30 mètres en trois secondes. Nous avons le financement pour porter la puissance du laser à 100 kilowatts, ce qui permettra d'effectuer des vols jusqu'à 30 kilomètres d'altitude. Nos maquettes actuelles pèsent moins de 50 grammes, mais, d'ici à cinq ans, nous pensons accélérer un microsatellite de un kilogramme et l'injecter en orbite terrestre basse grâce à un laser classique de un mégawatt de puissance, et ceci pour quelques centaines de francs d'électricité.

Les maquettes que nous utilisons, en aluminium ordinaire, comprennent une coque, un capot en forme d'anneau et une partie arrière, formée d'une tuyère. Durant le vol atmosphérique, la section antérieure comprime l'air et le dirige vers l'entrée du moteur. Le capot annulaire reçoit le plus gros de la poussée. La partie arrière sert de miroir collecteur parabolique qui concentre la lumière laser infrarouge en un anneau, tout en fournissant une autre surface sur laquelle la sortie d'air chaud exerce sa pression. Le système est autostabilisé : si le vaisseau se déplace en dehors du faisceau, la poussée l'incline et le remet dans le droit chemin.

Nous envisageons que des vaisseaux spatiaux photoniques de un kilogramme accélèrent ainsi jusqu'à environ Mach 5 et atteignent une altitude de 30 kilomètres, puis passent en mode propulsion en consommant de l'hydrogène liquide embarqué, lorsque l'air se raréfiera. Un kilogramme d'hydrogène devrait suffire pour mener le vaisseau en orbite. Un engin de 1,4 mètre de diamètre devrait injecter en orbite des microsatellites de 100 kilogrammes, en naviguant sur un faisceau laser de 100 mégawatts. Comme le faisceau que nous utilisons est pulsé, on devrait atteindre cette puissance en combinant plusieurs lasers. Ceux-ci lanceraient des satellites de communications et les «désorbiteraient» lorsqu'ils seraient devenus obsolètes.

Des astronefs photoniques de structure différente pourraient se déplacer vers leur source d'énergie, au lieu de s'en éloigner. Ces systèmes transporteraient des marchandises autour du Globe à faible coût. À la place de lasers, on pourrait aussi utiliser des faisceaux de micro-ondes. La densité de puissance des micro-ondes est inférieure à celle des lasers, de sorte que les véhicules devront être plus grands, mais les sources de micro-ondes sont beaucoup moins chères et plus faciles à adapter aux puissances élevées.



UNE MAQUETTE DE VAISSEAU SPATIAL PHOTONIQUE a déjà volé à 30 mètres de haut au cours d'essais ; elle était propulsée par un laser de dix kilowatts. Des systèmes plus grands devraient pouvoir être mis en orbite.

J'ai également conçu des vaisseaux plus élaborés, afin de transporter des passagers. Ces vaisseaux seraient plus adaptés pour le transport de marchandises lourdes, car ils engendrent leur poussée de manière plus efficace.

Un miroir installé sur le vaisseau concentrerait une partie de l'énergie incidente en un point situé au-dessus du véhicule, à une distance égale à son diamètre. La chaleur intense y créerait «une pointe aérodynamique», laquelle dévierait l'air qui arriverait sur le véhicule. La traînée hydrodynamique et l'échauffement du véhicule seraient ainsi réduits.

Ce vaisseau utiliserait une partie de l'énergie supplémentaire qui engendrerait de puissants champs électriques autour de la monture, ce qui ioniserait l'air ambiant. Il utiliserait également des aimants supraconducteurs pour créer d'intenses champs magnétiques dans cette région. Lorsque l'air ionisé traverserait les champs électriques et magnétiques