

# Des dynamos dans l'espace

*En équipant de longs câbles les satellites et les sondes spatiales, les astrophysiciens espèrent produire à bon compte de l'énergie électrique, un moyen de propulsion ainsi qu'une forme de gravité artificielle.*

Enrico Lorenzini • Juan Sanmartín

Alfred T. Kamajian

Tout engin spatial doit emporter ses ressources énergétiques, c'est-à-dire son propergol, ses panneaux solaires, voire son réacteur nucléaire. La seule solution alternative – le ravitaillement en vol – est d'un coût prohibitif. Pendant ses dix années de vie, la Station spatiale internationale consommera, par exemple, 77 tonnes de propergol simplement pour se maintenir sur son orbite. Or le transport d'un kilogramme de propergol à l'altitude de la station coûte plus de 14 000 euros... On imagine les besoins engendrés par l'exploration de Jupiter ou d'une autre planète externe : l'éloignement du Soleil réduirait l'efficacité des panneaux solaires et le carburant devrait être transporté sur des centaines de millions de kilomètres. Ces contraintes expliquent l'intérêt renouvelé pour les câbles électrodynamiques spatiaux : cette technique produit de l'électricité, engendre une forme de gravité artificielle et fournit un nouveau mode de propulsion, limitant l'emploi des sources d'énergie chimiques.

Dans cette technique, un câble conducteur est relié à deux masses en orbite autour de la Terre. Ce conducteur se déplace dans le champ magnétique terrestre : comme dans tout conducteur se déplaçant dans un champ magnétique, une différence de potentiel électrique est induite entre les extrémités du câble. Contrairement aux moteurs chimiques ou électriques où une quantité de mouvement est échangée entre l'engin spatial et les ergols expulsés, un câble spatial échange de la quantité de mouvement avec la planète par l'intermédiaire de son champ magnétique (voir l'encadré page 73).

Les câbles électrodynamiques fascinent depuis longtemps les passionnés de l'espace. Ainsi, l'écrivain Arthur Clarke a imaginé des ascenseurs spatiaux fondés sur l'emploi de câbles. Dès les années 1960, au cours de deux missions *Gemini*, des filins de 30 mètres de longueur ont été testés, car on voulait créer une gravité artificielle pour les astronautes. Divers essais se sont ensuite succédés. Il existe diverses difficultés techniques : les câbles résistent mal aux contraintes mécaniques ou électriques rencontrées dans



**1. Ce câble électrodynamique spatial** relie, sur cette vue d'artiste, les deux parties d'une sonde d'exploration de Jupiter et de ses lunes. Pendant que le dispositif est en orbite dans l'ionosphère jovienne non loin de Callisto (*à gauche*), le puissant champ magnétique de Jupiter (*au fond*) engendre un courant électrique dans le câble long de plusieurs kilomètres. En modulant ce courant, les contrôleurs de la mission pourraient modifier l'altitude de la sonde et sa trajectoire.

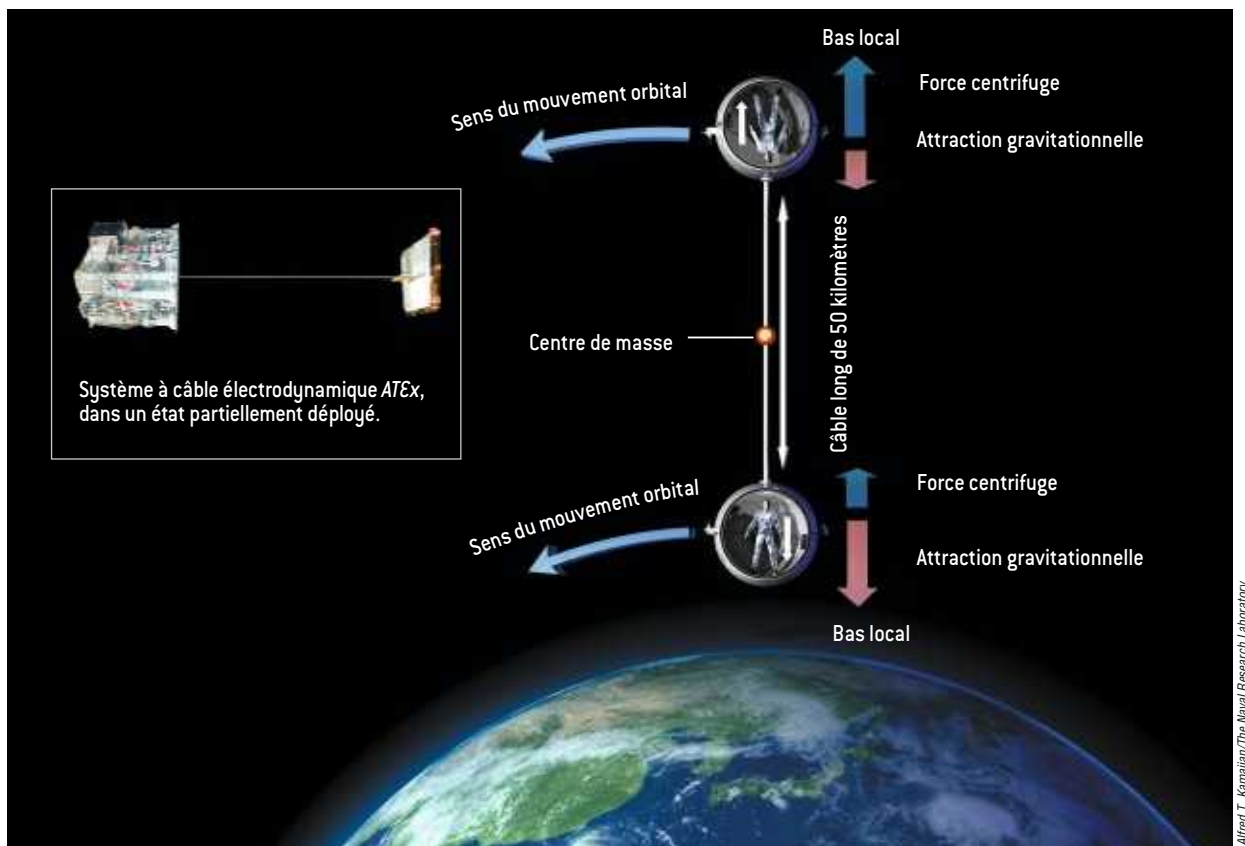
l'espace. En outre, les vibrations qu'ils subissent sont difficiles à amortir. Malgré ces difficultés, nombre de spécialistes sont persuadés que les câbles électrodynamiques pourraient être utilisés tant sur les orbites basses que pour les missions interplanétaires : ils remplaceraient les piles à combustible embarquées ou serviraient à nettoyer les orbites basses des milliers d'objets qui les encombre.

Un câble spatial repose sur un des principes de la mécanique orbitale : un objet en orbite autour d'une planète subit deux forces antagonistes, une force centrifuge produite par le mouvement orbital, et une force centripète, due à l'attraction gravitationnelle. Lorsque l'orbite est stable, ces deux forces se compensent exactement au centre de gravité du satellite, de sorte qu'un passager s'y trouve en impesanteur.

Qu'en est-il lorsque le satellite est constitué de deux parties, reliées par un câble et se déplaçant sur des orbites d'altitudes légèrement différentes ? Dans ce cas, le centre de gravité du système se trouve entre les deux parties du satellite. Un observateur se trouvant à bord de la partie

située sur l'orbite haute subit une force centrifuge supérieure à celle qui règne au centre de gravité et une attraction gravitationnelle inférieure : il ressent une gravité artificielle dirigée vers l'extérieur. À l'inverse, à bord de la partie parcourant l'orbite basse, il est tiré vers l'intérieur. Le déséquilibre entre la force centrifuge et la gravité en un endroit du satellite est nommé gradient de gravité. Les deux forces ont pour effet de tendre le câble reliant les deux parties du satellite. Un tel satellite n'est ainsi en équilibre que si son câble est parallèle à la verticale locale, c'est-à-dire aligné selon la direction radiale. Sinon, les forces subies par chacune de ses deux parties produisent un couple qui le ramène sur la verticale. Cette forme de stabilisation automatique a déjà été exploitée pour orienter correctement le satellite géodésique GEOS-3 : une fois dans l'espace, l'engin a déployé une perche de quelques mètres vers la Terre.

Quel gradient de gravité obtient-on sur les orbites basses, celles où séjournent les astronautes ? Sur une telle orbite, située entre 200 et 2000 kilomètres d'altitude, un câble de



Alfred T. Kamajian/The Naval Research Laboratory

**2. Tout objet** placé sur une orbite stable subit une force centrifuge, exactement compensée par la force gravitationnelle dirigée vers le centre de la planète. Dans un système constitué de deux sphères reliées par un câble, les forces centrifuge et gravitationnelle s'équilibrent au centre de masse de l'ensemble. À l'intérieur de la sphère supérieure, en revanche, la force centrifuge est légèrement supérieure

à la force gravitationnelle, et inversement dans la sphère inférieure. En conséquence, tout passager a un « poids » dirigé vers l'extérieur dans la sphère supérieure, et vers l'intérieur dans la sphère inférieure. Pour un câble de 50 kilomètres de longueur, cette forme de gravité artificielle équivaut à seulement un pour cent de la gravité à la surface de la Terre.

50 kilomètres produirait une gravité artificielle d'environ 0,01 g, où g désigne l'accélération de la pesanteur à la surface de la Terre. Une telle gravité est insuffisante pour redonner aux astronautes l'aisance qu'ils ont sur Terre, mais elle augmenterait notablement leur confort. Ainsi, ils pourraient se doucher, recommencer à boire dans un verre, récupérant la notion de haut et de bas. Cette forme de gravité artificielle semble d'autant plus intéressante que l'alternative consiste à faire tourner une partie du satellite autour de l'autre, ce qui est plus compliqué. Les câbles non conducteurs permettant de produire cette gravité artificielle sont faits de fibres de polyamides (Kevlar) ou de polyéthylène (Spectra), matériaux légers et résistants aux tensions somme toute assez faibles – quelques kilogrammes – qu'ils ont à subir.

Les câbles conducteurs, eux, produisent de l'électricité par effet dynamo : lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ magnétique, les particules chargées qu'il contient subissent une force perpendiculaire à la fois à la direction du mouvement et au champ magnétique. Si, par exemple, un câble métallique se déplace d'Ouest en Est à travers le champ magnétique terrestre qui pointe vers le Nord, ses électrons de conduction « descendent » le long du câble (voir l'encadré ci-contre). Les câbles électrodynamiques spatiaux échangent des électrons avec l'ionosphère, une région peu dense de l'atmosphère où le rayonnement solaire de haute énergie arrache des électrons aux atomes, créant un plasma,

une « soupe » d'ions et d'électrons. Le câble collecte des électrons libres à l'une de ses extrémités (l'anode, chargée positivement et qui attire les électrons) et les éjecte à l'extrémité opposée (la cathode, chargée négativement et qui émet des électrons). Le plasma ionosphérique ferme le circuit, de sorte qu'un courant électrique circule dans le câble, et peut fournir de l'énergie à bord. Sur une orbite basse, un câble de 20 kilomètres équipé d'une anode de forme convenable pourrait engendrer une puissance de 40 kilowatts, suffisante pour alimenter une station de recherche habitée.

Cette possibilité fut démontrée dès les années 1970, lorsque Mario Grossi, du Centre Harvard-Smithsonian d'astrophysique, et Giuseppe Colombo, de l'Université de Padoue, firent les premières recherches sur la production d'électricité par câble électrodynamique. Depuis, 16 missions ont emporté des câbles (conducteurs ou non conducteurs) dans l'espace (voir l'encadré page 75).

Dans les premiers systèmes, une gaine de téflon isolait la partie conductrice du câble de l'ionosphère, et l'anode consistait généralement en une grande sphère conductrice qui recueillait les électrons. Toutefois, ces anodes étaient de médiocres collecteurs d'électrons. Dans les années 1990, par exemple, la NASA et l'Agence spatiale italienne lancèrent conjointement deux versions de satellites câblés. Dotés de câbles de 20 kilomètres, ces systèmes récupéraient les électrons à l'aide d'une sphère de métal de la taille d'un ballon.



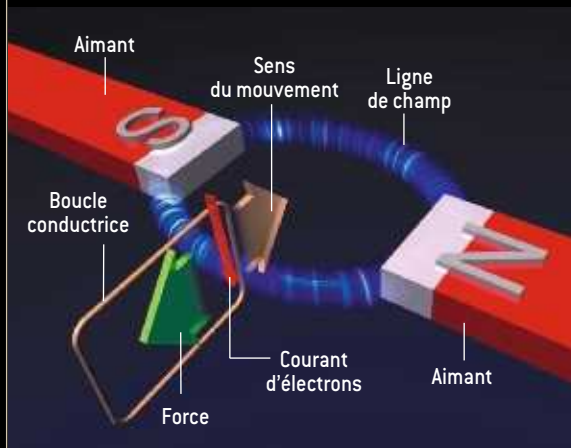
# Comment fonctionne un câble électrodynamique

Les systèmes à câbles électrodynamiques pourraient accomplir les mêmes tâches que les engins spatiaux classiques, en embarquant beaucoup moins de carburant. Ils reposent sur deux principes

de l'électromagnétisme : un courant électrique est produit quand un conducteur se déplace dans un champ magnétique, d'une part, et un champ exerce une force sur un courant, d'autre part.

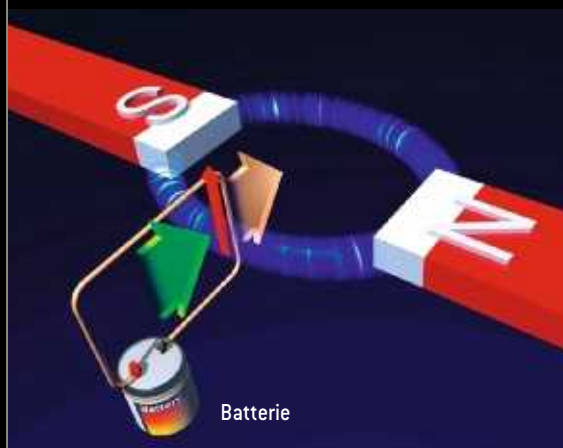
## Le courant induit

Au sein d'un conducteur qui se déplace dans un champ magnétique, les particules chargées subissent une force perpendiculaire à la fois au champ et à la direction du mouvement. À l'inverse, un conducteur traversé par un courant subit une force magnétique qui s'oppose à son mouvement.



## Courant induit de l'extérieur

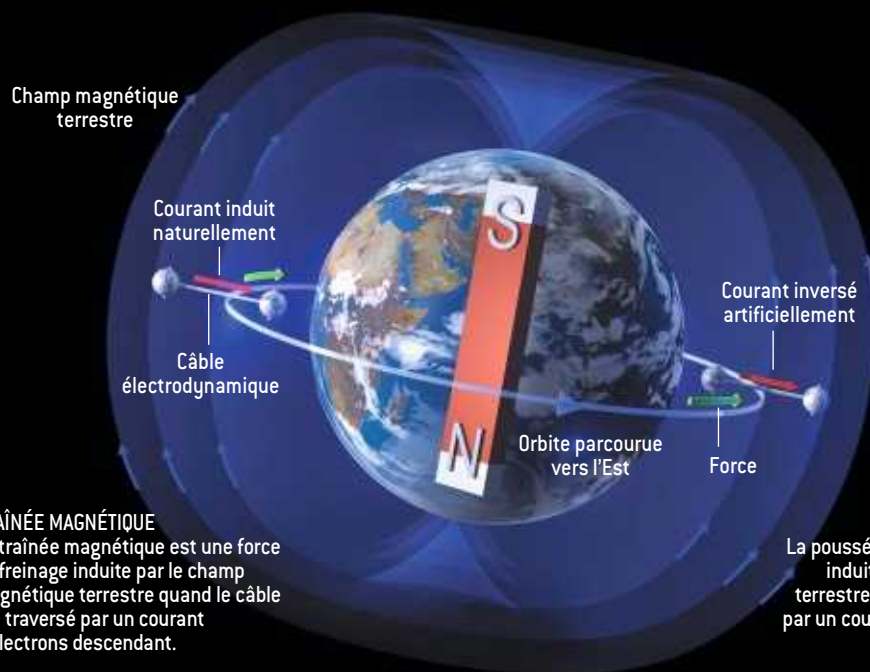
Une batterie introduite dans le circuit peut inverser le sens du courant (ci-dessous, on a indiqué le sens des électrons, opposé au sens conventionnel du courant), ce qui inverse la force magnétique subie par un élément conducteur. Les câbles électrodynamiques alignèrent ainsi une poussée.



## Modifier l'orbite en contrôlant le courant

Sur les orbites basses, alors que le câble électromagnétique traverse les lignes du champ terrestre, un courant est induit en direction de la Terre (*ci-dessous à gauche*). De ce fait, le câble subit à son tour une force qui s'oppose à son mouvement. Cette traînée réduit l'énergie du système et abaisse son orbite.

À l'opposé, si l'on inverse artificiellement le sens du courant circulant dans le câble (par exemple à l'aide d'un panneau solaire), le satellite lié au câble subit une poussée dans le sens de son orbite (*à droite*). Son énergie augmente, et il en résulte une augmentation de l'altitude de l'orbite.



### TRAÎNÉE MAGNÉTIQUE

La traînée magnétique est une force de freinage induite par le champ magnétique terrestre quand le câble est traversé par un courant d'électrons descendant.

### POUSSÉE MAGNÉTIQUE

La poussée magnétique est une force induite par le champ magnétique terrestre quand le câble est traversé par un courant d'électrons ascendant.

**ACTUELLEMENT**

**Le Monde DES RELIGIONS**  
SEPTEMBRE-OCTOBRE 2004 N° 7

**en que je crois**  
par Jean Boissonnat

**en fiche**  
Le christianisme social

**débat**  
La Turquie, l'islam et l'Europe

**histoire**  
Qui étaient les jansénistes ?

Religions et gastronomie  
**Les saveurs du sacré**

**A l'occasion  
du Festival  
International  
de Géographie  
de Saint-Dié,  
un tour du monde  
des religions  
et de leur traditions  
culinaires.**

**EN VENTE CHEZ VOTRE  
MARCHAND DE JOURNAUX**

Si l'expérience démontra le bien-fondé du principe, un phénomène d'écrantage électrostatique réduisait notablement l'efficacité du système. Chargée positivement, l'anode sphérique attirait une nuée de charges négatives, lesquelles, faisant écran, empêchaient d'autres électrons de l'atteindre.

Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé des câbles dénudés, c'est-à-dire qui n'étaient plus isolés et, par conséquent, capables de recueillir des électrons sur plusieurs kilomètres de longueur plutôt que juste à l'extrémité. Un tel système tire profit de la géométrie du câble : les électrons ne s'accumulent plus à l'anode où leur accumulation risque d'empêcher l'arrivée de nouveaux électrons. De tels câbles n'ont pas besoin d'être cylindriques : un long ruban engendrerait le même courant tout en étant plus léger.

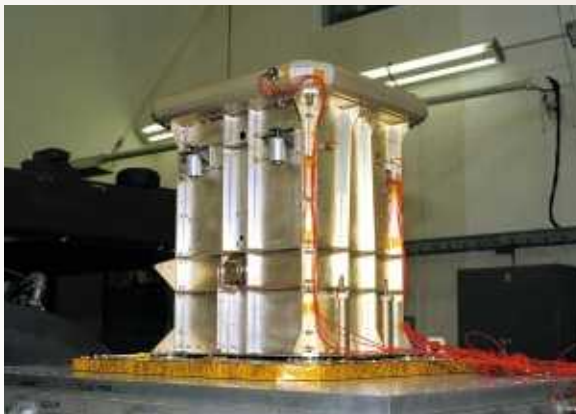
## De l'énergie gratuite ?

Les câbles électrodynamiques ont un autre avantage : on peut les ralentir ou les accélérer grâce à la force que tout champ magnétique exerce sur un courant électrique. Cette force est orientée suivant la règle des « trois doigts » (de la main droite), symbolisant les sens respectifs du courant, du champ magnétique et de la force qui agit sur le système : un câble parcouru par des électrons « descendants » et qui parcourt une orbite basse allant d'Ouest en Est subit une force qui s'oppose à son mouvement. Cela a pour conséquence d'abaisser progressivement l'orbite.

Cette caractéristique est intéressante pour ceux qui prévoient de débarrasser l'espace des nombreux débris qui s'y sont accumulés. Encombrées de milliers d'objets – dont 1 500 ont une masse supérieure à 100 kilogrammes –, les orbites basses sont devenues les poubelles de l'espace. Le frottement avec l'atmosphère finit par les ralentir, de sorte qu'ils perdent progressivement de l'altitude jusqu'à atteindre les couches denses de l'atmosphère, où ils se consument. Si les objets qui sont en orbite à 200 kilomètres d'altitude ne mettent que quelques jours pour redescendre, les objets abandonnés à 1 000 kilomètres d'altitude mettent quelque 2 000 ans à atteindre les couches denses. On a donc imaginé équiper les satellites de câbles spatiaux qui seront déployés en fin de vie, ou d'employer des robots pour capturer les débris et les relier à un câble spatial (voir l'encadré page 76), afin de hâter leur chute sur Terre.

À l'inverse, on pourrait rehausser l'orbite d'un satellite muni d'un câble en y inversant le sens de circulation du courant à l'aide d'une source d'électricité, un panneau solaire par exemple. Les câbles électrodynamiques pourraient servir de système de propulsion, déplaçant des masses d'une orbite basse vers une orbite plus élevée, ou tout simplement pour stabiliser l'orbite d'un satellite. Nous avons déjà évoqué le coût du simple maintien en orbite de la Station spatiale internationale. Si elle était équipée d'un câble électrodynamique consommant quelque dix pour cent de sa puissance électrique, 17 tonnes de carburant (au lieu de 77) suffiraient à la maintenir sur son orbite. Avec une puissance électrique de bord supérieure, on aurait même pu éviter tout carburant. De plus, la mise en marche d'une propulsion à câble électrodynamique engendre des forces latérales fort utiles

NOM	DATE	ORBITE	ORGANISME	COMMENTAIRES
Gemini 11	1967	Orbite basse, 30 m	NASA	Rotation stable
Gemini 12	1967	Orbite basse, 30 m	NASA	Verticale locale, oscillation stable
H-9M-69	1980	Suborbital, < 500 m	NASA	Déploiement partiel
S-520-2	1981	Suborbital, < 500 m	NASA	Déploiement partiel
Charge-1	1983	Suborbital, 500 m	NASA/ISAS (Japon)	Déploiement complet
Charge-2	1984	Suborbital, 500 m	NASA/ISAS (Japon)	Déploiement complet
Cedipus-A	1989	Suborbital, 958 m	NRC (Canada)/NASA	Rotation stable, alignement magnétique
Charge-2B	1992	Suborbital, 500 m	NASA/ISAS (Japon)	Déploiement complet
<b>TSS-1</b>	<b>1992</b>	<b>Orbite basse, &lt; 500 m</b>	<b>NASA/ASI (Italie)</b>	<b>Déploiement partiel, récupération</b>
SEDS-1	1993	Orbite basse, 20 km	NASA	Déploiement vers le bas, oscillation et coupure
<b>PMG</b>	<b>1993</b>	<b>Orbite basse, 500 m</b>	<b>NASA</b>	<b>Déploiement vers le haut</b>
SEDS-2	1994	Orbite basse, 20 km	NASA	Déploiement complet, verticale locale stable
Cedipus-C	1995	Suborbital, 1 km	NRC (Canada)/NASA	Rotation stable, alignement magnétique
<b>TSS-1R</b>	<b>1996</b>	<b>Orbite basse, 19,6 km</b>	<b>NASA/ASI (Italie)</b>	<b>Déploiement quasi complet, endommagé</b>
TIPS	1996	Orbite basse, 4 km	NRO/NRL	Plus long séjour en orbite (> 7 ans)
ATEX	1999	Orbite basse, 6 km	NASA	Déploiement partiel



ATEX

Des câbles ont souvent été déployés dans l'espace avec un succès variable. Le plus souvent, c'est le déploiement complet du câble qui s'est avéré difficile. Ces essais ont démontré le potentiel



TIPS

des câbles spatiaux et inspiré de nombreuses améliorations de conception. Les missions qui ont emporté des câbles électrodynamiques sont indiquées en couleur.

The Naval Research Laboratory

pour modifier l'inclinaison d'un engin spatial en orbite. Or cette manœuvre est très coûteuse en énergie quand on ne dispose que de moteurs chimiques.

Bien sûr, tous ces avantages ont un prix. Ainsi, l'énergie électrique acquise par le satellite grâce à un câble électrodynamique est gagnée aux dépens de son altitude, atteinte grâce à l'énergie dépensée par les moteurs-fusées. À première vue, la transformation d'un type d'énergie en un autre par l'intermédiaire d'un câble électrodynamique semble être une opération nulle, et même négative puisque le satellite perd de l'altitude et doit ensuite être réacheminé vers une orbite supérieure. Au contraire, une pile à combustible produit directement de l'électricité à partir du carburant embarqué. Quel est donc l'intérêt des câbles électrodynamiques ?

En fait, les câbles électrodynamiques sont potentiellement plus efficaces, même si cela paraît paradoxal. Un système combiné câble-fusée produit plus de puissance électrique qu'une pile à combustible, car il profite de l'énergie du mouvement orbital. La puissance électrique produite par un câble électrodynamique est le travail effectué

par la traînée magnétique par unité de temps, c'est-à-dire le produit de l'intensité de cette force magnétique par la vitesse du satellite (par rapport à l'ionosphère). En orbite basse, cette vitesse est d'environ 7,5 kilomètres par seconde. Par comparaison, la puissance d'un moteur chimique d'une fusée est la moitié de la poussée multipliée par la vitesse d'éjection des gaz – qui, pour un mélange d'hydrogène et d'oxygène liquides, atteint 5 kilomètres par seconde. En pratique, un système combiné câble-fusée produirait une énergie électrique trois fois supérieure (puisque  $7,5/(5/2) = 3$ ) à l'énergie fournie par un propulseur chimique seul, si l'on suppose que la poussée de ce dernier est égale à la traînée magnétique.

Fondée sur la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène, une pile à combustible n'offrirait pas le même avantage. Un couple fusée-câble est pour cette raison susceptible de consommer bien moins de carburant qu'un couple fusée-pile à combustible de même puissance. L'inconvénient est qu'un câble pèse davantage qu'une pile à combustible, ce qui implique que son utilisation n'engendre des économies de carburant qu'au bout de plusieurs jours.



## L'élimination des déchets orbitaux

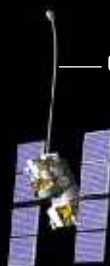
Les orbites basses de la Terre, situées entre 200 et 2 000 kilomètres d'altitude, sont encombrées de dizaines de milliers de débris spatiaux. Ces derniers comprennent des satellites hors d'usage, des moteurs de fusée usagés et divers débris d'explosions. Selon leur

altitude, ils tourneront autour de la Terre pendant des décennies, voire des siècles avant de retomber vers la Terre et de se consumer dans l'atmosphère. Le déploiement de câbles sur les engins spatiaux lancés à l'avenir permettrait d'accélérer leur chute pour un prix modique.



1

Un satellite en orbite à 1 000 kilomètres d'altitude mettrait environ 2 000 ans avant de redescendre vers les couches denses de l'atmosphère.



Câble déployé

2

À la fin de la mission, le déploiement d'un câble fait subir au satellite une force qui abaisse son orbite, le rapprochant plus vite des couches denses de l'atmosphère.



3

La force finit par réduire suffisamment l'altitude pour que le satellite tombe rapidement et se consume en pénétrant dans les couches basses de l'atmosphère.

Alfred T. Kamalian

## Des câbles, par Jupiter !

Le gain de carburant représenté par un câble électrodynamique pourrait aussi se révéler précieux dans l'exploration des planètes extérieures du Système solaire, à commencer par Jupiter et ses lunes. En exploitant les propriétés physiques des planètes géantes, un système à câble réduirait les quantités de carburant à transporter. Comme la Terre, la planète Jupiter est entourée d'une ionosphère magnétisée en rotation. Toutefois, contrairement à la Terre, cette ionosphère persiste au-delà de l'orbite stationnaire – l'altitude à laquelle un objet donné gravite en restant toujours à l'aplomb du même point de la surface de la planète. Une orbite stationnaire se trouve à 35 800 kilomètres d'altitude dans le cas de la Terre ; pour Jupiter, l'orbite stationnaire est à environ 88 500 kilomètres au-dessus de la couche supérieure de nuages. Placé sur une orbite stationnaire jovienne, un engin spatial tournerait autour de la planète à la même vitesse que l'ionosphère. Ainsi, si l'engin descendait au-dessous de l'orbite stationnaire, là où la vitesse du plasma magnétisé est inférieure à celle de l'engin, le câble produirait spontanément une force de freinage et de l'énergie électrique utilisable.

Inversement, au-dessus de l'orbite stationnaire, où le plasma magnétisé se déplace plus vite que l'engin spatial, le câble engendrerait une poussée en même temps que de l'énergie électrique. Une fois de plus, ces effets semblent obtenus sans compensation, mais tel n'est pas le cas : l'énergie acquise par le câble est puisée dans l'énergie cinétique de rotation de la planète. Cette énergie de rotation est cependant si élevée que la quantité prélevée par l'engin spatial est négligeable.

Comment pourrait-on exploiter ces effets autour de Jupiter ? Selon un des principes de la dynamique orbitale, la poussée d'un engin sera d'autant plus efficace qu'elle est appliquée soit au point de l'orbite le plus proche de Jupiter (le périastre), soit au point le plus éloigné (l'apoastre). La force engendrée spontanément par le câble sera une force de freinage si elle est appliquée en un point qui se trouve à l'intérieur de l'orbite stationnaire et ce sera une poussée dans le cas contraire. Supposons qu'une sonde spatiale équipée d'un câble électrodynamique s'approche de Jupiter à une vitesse relative d'environ six kilomètres par seconde. Si aucune force de freinage n'est appliquée, l'engin frôlera Jupiter et le dépassera. En revanche, si un câble de quelques dizaines de kilomètres

est mis en fonctionnement au moment où la sonde passe à l'intérieur de l'orbite stationnaire, il la freinera juste assez pour la placer sur une orbite elliptique de grande excentricité autour de Jupiter. Cette manœuvre nécessite de réduire la vitesse de quelques centaines de mètres par seconde seulement, et un câble de quelques dizaines de kilomètres suffirait.

Or sur une telle orbite, le périastre se trouve au-dessous de l'orbite stationnaire tandis que l'apoastre est au-dessus. Les contrôleurs de mission pourraient activer le câble à chaque passage au périastre. Ce faisant, ils freineraient la sonde et récupéreraient de l'énergie électrique. Cela réduirait graduellement l'altitude de l'engin et arrondirait son orbite, facilitant l'observation des alentours de la planète. Pour visiter chacune des quatre principales lunes de Jupiter, en passant de la plus extérieure (Callisto) à la plus intérieure (Io), la sonde n'aurait besoin que de forces électrodynamiques modestes. La période orbitale de Callisto étant d'environ 15 jours, la séquence tout entière de visites serait accomplie en moins d'un an.

Pour le retour, les contrôleurs de la mission inverseraient le mécanisme, en activant le câble à l'apoastre puisque celui-ci est situé au-dessus de l'orbite stationnaire. L'application répétée d'une poussée à l'apoastre élargirait l'orbite jusqu'à ce que le périastre s'élève également au-dessus de l'orbite stationnaire. Alors, une poussée serait engendrée au périastre, ce qui élèverait de plus en plus l'apoastre. Une dernière poussée libérerait la sonde de l'attraction de Jupiter et la placerait sur une trajectoire de retour vers la Terre. Toute l'énergie nécessaire à ces manœuvres et une bonne part de l'énergie électrique utilisée par les instruments seraient prélevées dans l'énergie de rotation de Jupiter, ce qui devrait réduire notablement les quantités de carburant et d'énergie à embarquer et, par conséquent, le coût de la mission.

Au cours des 30 dernières années, la technique des câbles spatiaux a mûri. De nombreux défis restent encore à relever avant que des câbles électrodynamiques ne soient mis en service autour de la Terre, de Jupiter ou d'une autre planète. En particulier, il faudra trouver des moyens efficaces de déployer ces câbles et de contrôler leurs vibrations. Il faudra aussi protéger leurs composants contre les décharges électriques qu'ils subissent dans l'ionosphère et limiter la lente dégradation des matériaux dans l'espace. Autant de difficultés qui, au regard du chemin déjà parcouru, ne semblent pas insurmontables.

**Enrico LORENZINI** travaille au Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian de Cambridge, dans le Massachusetts.

**Juan SANMARTÍN** est professeur de physique à l'Université polytechnique de Madrid, en Espagne.

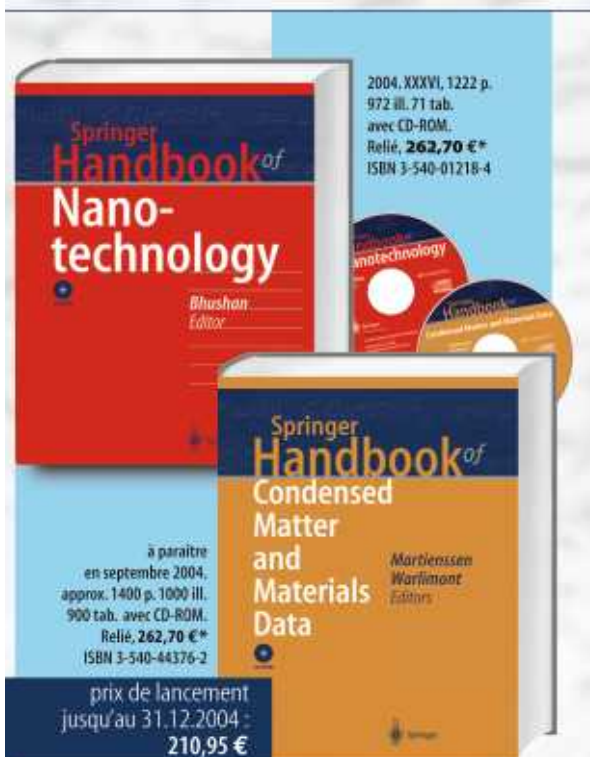
L. JOHNSON et al., *Overview of future NASA tether applications*, in *Advances in Space Research*, vol. 24, n° 4, pp. 1055-1063, 1999.

M. L. COSMO et E. C. LORENZINI, *Tethers in space handbook*, troisième édition, *Smithsonian Astrophysical Observatory*, 1997.

J. R. SANMARTÍN, *Macroscopic motion and gravitation in thermodynamics*, in *European Journal of Physics*, vol. 16, n° 1, pp. 8-13, janvier 1995.

## SPRINGER HANDBOOKS

**La nouvelle collection de référence  
en physique et ingénierie**



### Volumes en préparation :

F. Träger (Ed.):  
**Lasers and Optics**  
(2005. ISBN 0-387-95579-8)

H. Czichos, T. Saito,  
L. Smith (Eds.):  
**Materials Measurement  
Methods**  
(2005. ISBN 3-540-20785-6)

G.W.F. Drake (Ed.):  
**Atomic, Molecular  
and Optical Physics**  
(2005. ISBN 0-387-20802-X)

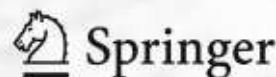
H. Pham (Ed.):  
**Engineering Statistics**  
(2005. ISBN 1-85233-806-7)

### Chaque Springer Handbook

- ▶ couvre son sujet de manière extrêmement complète : des concepts de base aux techniques et méthodes de recherche les plus récentes
- ▶ est écrit par des équipes internationales d'auteurs faisant autorité dans leur domaine
- ▶ est d'une utilisation facile et claire
- ▶ est accompagné d'un CD-ROM aux fonctions de recherche très performantes

**Pour plus d'informations : [springeronline.com](http://springeronline.com)**

Springer  
1, rue Paul-Cézanne - 75008 Paris  
Tél. : 00800 777 46 437 (n° vert)  
Fax : 01 53 93 37 29  
SAG-bookorder@springer-sbm.com



\* Prix TTC en France. Pour les autres pays, la TVA locale est applicable. Les prix indiqués et autres détails sont susceptibles d'être modifiés sans avis préalable.