

Les autoroutes de l'espa

L'étude mathématique des trajectoires dans un champ de gravité créé par plusieurs corps célestes fournit le moyen de voyager dans l'espace sur de grandes distances, avec très peu de carburant.

Shane Ross

Le Système solaire, souvent comparé à une sorte de mécanisme d'horlogerie céleste, est l'archétype de la régularité et de la précision. À juste titre : hormis quelques rares exceptions, les planètes gravitent autour du Soleil sur des orbites presque circulaires, tout comme les satellites autour de leur planète, dans un ballet d'une régularité imperturbable.

On pourrait croire que le champ de gravitation engendré par l'ensemble des corps du Système solaire est lui aussi simple et régulier. Un corps lâché près du Soleil devrait tomber à pic vers cette masse colossale ; lâché au voisinage de notre planète, il devrait se diriger moins abruptement vers sa surface. Il n'en est rien. Si l'on tient compte de l'attraction de toutes les planètes et de leurs satellites, le champ de gravité est en réalité d'une grande complexité, et les trajectoires y forment une jungle inextricable. Certaines sont contraires à l'intuition : un objet lâché à proximité de la Terre peut dans un premier temps se retrouver en orbite autour de celle-ci, puis du Soleil, puis à nouveau de la Terre, et ainsi de suite pendant des années.

Des mathématiciens, dont moi-même, mais aussi des chimistes ou des mécaniciens des fluides, ont étudié ces trajectoires étranges et ont mis en évidence ces dernières années l'existence d'un « réseau de transport interplanétaire » constitué d'un enchevêtrement de trajectoires privilégiées qui se croisent et se séparent. Ces autoroutes invisibles, qui ont pour point de départ une planète ou une lune, dictent la circulation dans le Système solaire. Contrairement aux autoroutes classiques, néanmoins, ce réseau est dynamique. Les voies, les échangeurs et la vitesse du trafic évoluent en fonction des configurations relatives des planètes et des satellites. Bal-

lotés dans cette toile mouvante, les comètes et les astéroïdes sautent d'une voie à l'autre, sont échangés entre les planètes et finissent parfois par en percuter une.

Si nous ne pouvons pas encore influencer sur la trajectoire des petits objets du Système solaire, nous pouvons d'ores et déjà manœuvrer les sondes spatiales de façon à leur faire emprunter ce réseau d'autoroutes interplanétaires pour parcourir de grandes distances en n'utilisant que très peu de carburant. Comme un navigateur sur une île qui confie une bouteille aux courants marins, il suffirait d'envoyer une sonde vers des points précis qui sont les portes d'entrée naturelle de ce réseau. On pourrait ainsi atteindre des destinations lointaines qui, autrement, seraient hors de portée.

Ramer ou suivre le courant ?

La plupart du temps, les sondes spatiales n'exploitent pas ces effets gravitationnels subtils : elles filent vers leur destination le plus directement possible à l'aide de fusées. Se déplacer de la sorte est simple : on peut se contenter de prendre en compte l'influence d'un seul corps céleste à la fois. Le départ de la Terre et l'arrivée sur une planète voisine sont vus comme deux interactions distinctes et indépendantes entre la sonde et un astre massif. De même, l'attraction du Soleil suffit à décrire la phase de transit du voisinage de la Terre vers celui d'une planète. On considère ainsi deux corps seulement, l'un massif, l'autre négligeable. La trajectoire globale d'une sonde est ainsi formée en première approximation de portions accolées d'ellipse, de para-





bole ou d'hyperbole – les solutions du problème à deux corps découvertes dès le XVI^e siècle par Johannes Kepler –, avant d'être précisée en prenant en compte toutes les influences s'exerçant sur la sonde.

Pour des missions portant sur plusieurs planètes à la suite, telle l'exploration par les sondes *Voyager* du Système solaire externe, la vitesse relative de la sonde par rapport à chacune des planètes est élevée. Le laps de temps durant lequel l'attraction de la planète et du Soleil deviennent comparables est ainsi très court, si bien que l'approximation de la trajectoire par des coniques accolées est bonne. Mais la brièveté des survols planétaires est ici un inconvénient.

La consommation de carburant en est un autre. Une quantité prohibitive de propergol serait en effet nécessaire pour freiner et insérer un vaisseau en orbite autour d'une planète, observer celle-ci pendant un moment, puis repartir pour la destination suivante. Or le carburant destiné aux manœuvres représente autant de charge utile en moins. Aussi doit-on trouver un juste équilibre entre la trajectoire souhaitée et la quantité d'instruments scientifiques embarquée. Le carburant représentait ainsi près de la moitié de la masse au décollage de la mission *Galileo*, à destination de Jupiter.

En comparaison, le carburant n'excédait pas cinq pour cent de la masse de la mission *Genesis Discovery*, lancée en 2001 pour récolter des échantillons du vent solaire. Et pourtant, la sonde a gagné une région distante de 1,5 million de kilomètres en direction du Soleil et y a passé deux ans et demi à collecter des ions, avant de les ramener sur Terre en 2004. Au total, un périple de 30 millions de kilomètres accompli avec une quantité dérisoire de propergol (voir la figure 4). Avec un réservoir plein, soit environ cinq pour cent de sa masse, une voiture ne parcourt que 500 kilo-

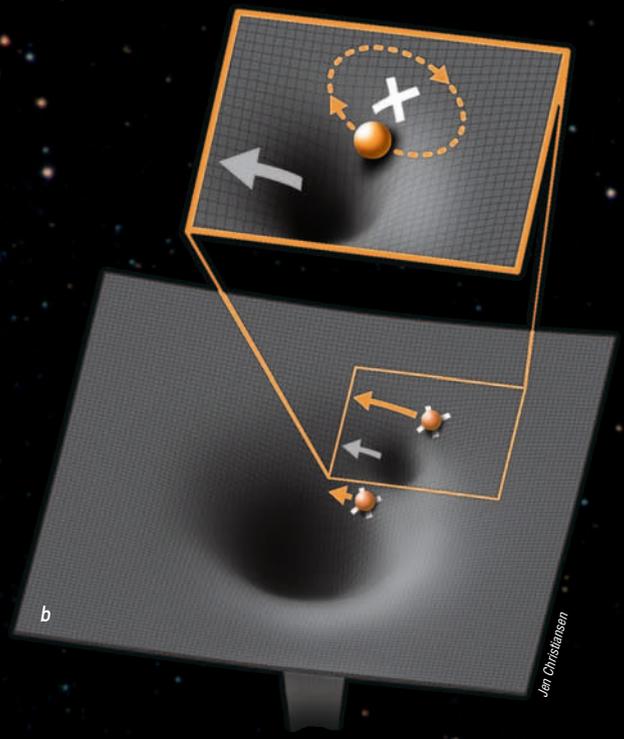
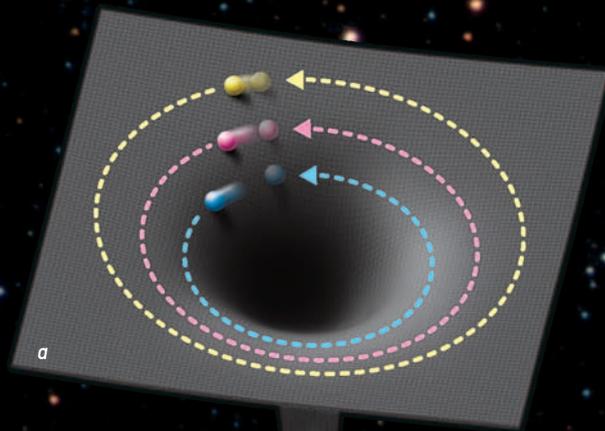
mètres environ! Malheureusement, le parachute de la sonde *Genesis* ne s'est pas ouvert lors de la rentrée dans l'atmosphère et le collecteur a été très endommagé à l'atterrissage, mais une partie de la charge a néanmoins pu être sauvée, ce qui représente les premiers échantillons extraterrestres prélevés au-delà de la Lune.

Des missions telles que *Genesis* n'auraient pas été concevables il y a quelques années. Elles sont aujourd'hui possibles grâce à une meilleure compréhension des trajectoires de basse énergie qui serpentent entre les planètes. Les anciens navigateurs ont découvert les courants océaniques en observant le déplacement du bois de flottage et des algues qu'ils charrient, et en ont tiré parti pour réduire la durée des traversées. Les « navigateurs de l'espace » d'aujourd'hui peuvent en faire de même et repérer les courants spatiaux en observant le déplacement des comètes et des astéroïdes.

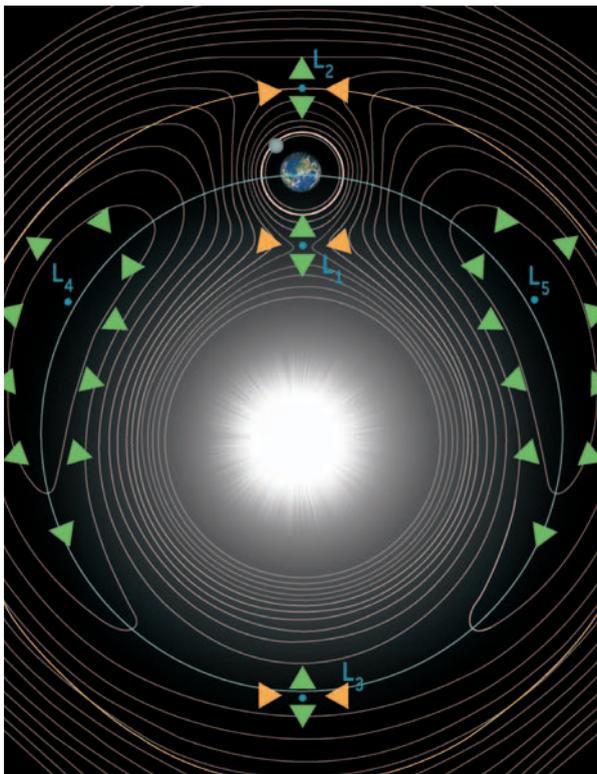
La comète *Oterma* est à ce titre particulièrement intéressante. Au début du XX^e siècle, elle était située au-delà de l'orbite de Jupiter. Après avoir frôlé la planète géante en 1937, elle a dévié pour se placer sur une orbite interne à celle de Jupiter, puis, après l'avoir croisée de nouveau en 1963, elle est repassée au-delà, où elle réside à l'heure actuelle. Lors de chaque rencontre, la comète s'est placée sur une orbite lâche autour de Jupiter, devenant temporairement une lune.

Comment expliquer cette étrange orbite? Pour ce faire, il faut considérer le mouvement de la comète sous l'influence gravitationnelle combinée du Soleil et de Jupiter.

1. En empruntant des trajectoires particulières, les sondes spatiales pourraient explorer le Système solaire en dépensant des quantités infimes de carburant.



2. Les planètes tournant dans le puits gravitationnel du Soleil sont comme des billes lancées dans un entonnoir. Leur vitesse angulaire est d'autant plus grande que leur orbite est serrée (a). Le champ gravitationnel d'un couple d'objets massifs, tels le Soleil et la Terre, ressemble à un puits à la surface duquel se déplace un puits secondaire (b). Une bille lancée dans l'entonnoir principal à la même vitesse angulaire que l'entonnoir secondaire rencontre deux points d'équilibre de part et d'autre de celui-ci (croix blanches) : ce sont les points de Lagrange L_1 et L_2 du système. En imprimant à la bille une vitesse adéquate, on peut la faire tourner autour de l'un de ces points (zoom).



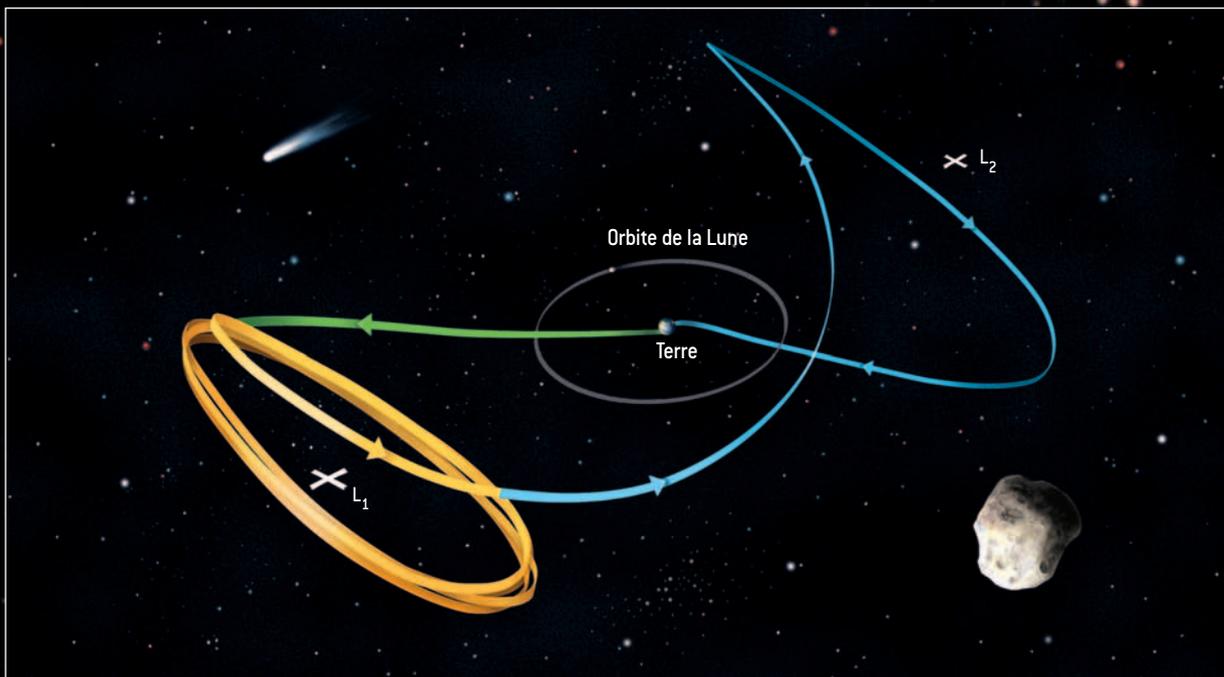
3. Les points de Lagrange sont des points d'équilibre gravitationnel dans le problème à trois corps restreint (un corps de masse négligeable soumis à l'attraction de deux corps massifs, ici le Soleil et la Terre). Ils sont au nombre de cinq. Ils se déplacent de conserve avec la Terre pendant sa révolution autour du Soleil. Les points de Lagrange L_1 , L_2 et L_3 sont instables, car, sauf dans le plan perpendiculaire à la ligne qui joint les deux corps massifs (flèches orange), un objet placé en l'un de ces points va s'en éloigner lentement (flèches vertes). Les points L_4 et L_5 , ou points troiens, se révèlent stables après analyse.

Cette situation, où l'un des objets est de masse négligeable par rapport aux deux autres, est qualifiée de problème à trois corps restreint.

En reprenant les travaux de Kepler, Isaac Newton a résolu à la fin du XVIII^e siècle le problème de la gravitation à deux corps. Les solutions sont les trajectoires elliptiques ou paraboliques précédemment évoquées. Le problème à trois corps, même restreint, est hélas beaucoup plus difficile. Newton s'y est cassé les dents et de nombreux scientifiques s'y sont attelés à sa suite sans succès.

Le ballet d'un poids plume avec deux corps massifs

Faute de trouver une équation explicite pour décrire le mouvement, on peut cependant éclairer ce problème en adoptant un point de vue géométrique. Imaginons une sorte d'entonnoir dans lequel on lance une bille (voir la figure 2a). Cet entonnoir représente un « puits gravitationnel », celui du Soleil par exemple, et la bille, un corps en mouvement dans ce champ de gravité, comme la Terre. Dans un entonnoir matériel, la bille est freinée par le frottement et finit par tomber en spirale au fond. Ce faisant, plus la trajectoire se resserre, plus la bille va vite. Il en va de même pour les objets en orbite dans l'espace (à ceci près qu'en l'absence de frottement, ils tournent indéfiniment) : plus l'orbite est serrée, plus la vitesse angulaire est élevée. C'est la troisième loi de Kepler. Si l'on considère trois objets sur des orbites proches, le plus extérieur se déplacera à une vitesse angulaire moindre que celui du milieu pour conserver une orbite stable, tandis que le plus intérieur avancera à une vitesse angulaire plus élevée.



Jean Christensen

4. La sonde Genesis, lancée en 2001, a parcouru 1,5 million de kilomètres en direction du Soleil (*en vert*) avant de se mettre en orbite pendant deux ans et demi autour du point de Lagrange L_1 de la Terre (*en jaune*) et d'y accumuler des particules de vent solaire. Elle est ensuite revenue

sur la Terre en septembre 2004 en passant par le point de Lagrange L_2 (*en bleu*), soit un voyage de près de 30 millions de kilomètres, le tout en consommant une quantité infime de carburant. Ce tour de force résulte de l'utilisation d'une trajectoire à basse énergie.

Imaginons maintenant que dans l'entonnoir initial est creusé un petit entonnoir supplémentaire, qui tourne à la vitesse qu'aurait une bille située sur cette trajectoire. Ce dispositif reproduit le puits gravitationnel combiné de la Terre (le petit entonnoir) et du Soleil (le grand entonnoir).

Lançons maintenant – sans frottement – une bille dans le grand entonnoir à une vitesse angulaire égale à celle du petit entonnoir, mais pas tout à fait sur la même orbite. De prime abord, on peut penser que si la bille est plus éloignée du centre, là où la pente est plus douce, elle ira trop vite pour être stable et sera éjectée par la force centrifuge. *A contrario*, plus à l'intérieur, la bille sera trop lente pour se maintenir sur la pente, plus abrupte, et elle tombera vers une orbite plus interne. Le seul endroit où la bille, avec cette vitesse angulaire précise, semble pouvoir se maintenir est précisément l'orbite de l'entonnoir représentant la Terre. Mais est-ce bien sûr ?

Un examen plus attentif révèle l'existence de deux points particuliers. Le premier se trouve sur la crête qui sépare le puits de la Terre et celui du Soleil. En partant du fond de l'entonnoir principal et en allant vers le petit, la pente s'adoucit d'abord comme elle le ferait dans une autre direction ; mais elle diminue bientôt de façon plus rapide, avant de s'annuler sur une crête, puis de s'inverser en replongeant dans l'entonnoir secondaire. Avant d'atteindre la crête, on passe par un point où la pente est idéale pour qu'une bille qui tourne à la même vitesse angulaire que l'entonnoir-Terre se maintienne à l'équilibre. Ailleurs, cette bille devrait tourner plus vite pour rester à l'équilibre, mais en ce point, la pente est moins prononcée qu'elle ne l'est normalement à ce rayon, si bien que la trajectoire circulaire de la bille est stable (*voir la figure 2b*).

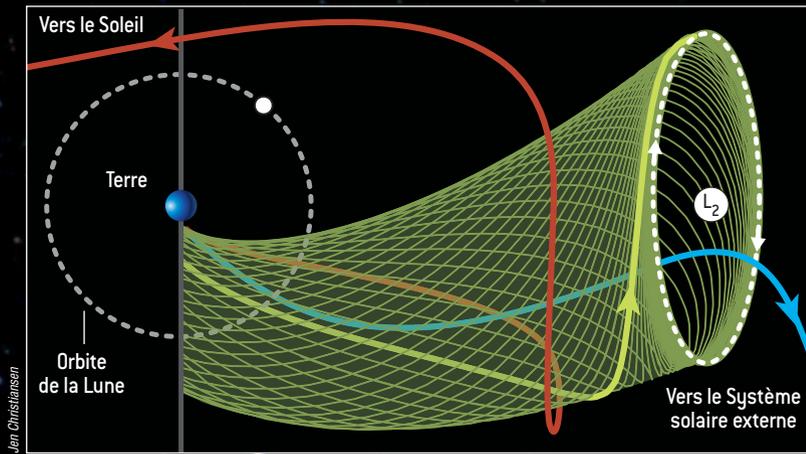
Ce point d'équilibre a son équivalent dans l'espace, et est situé à 1,5 million de kilomètres de la Terre en direc-

tion du Soleil. De même, de l'autre côté de l'entonnoir secondaire, il existe un point où la pente est plus prononcée qu'ailleurs au même rayon et où une bille lancée à la même vitesse que celle de l'entonnoir secondaire va conserver une trajectoire stable au lieu d'être éjectée. Dans l'espace, ce second point d'équilibre se situe à 1,5 million de kilomètres de la Terre dans la direction opposée au Soleil.

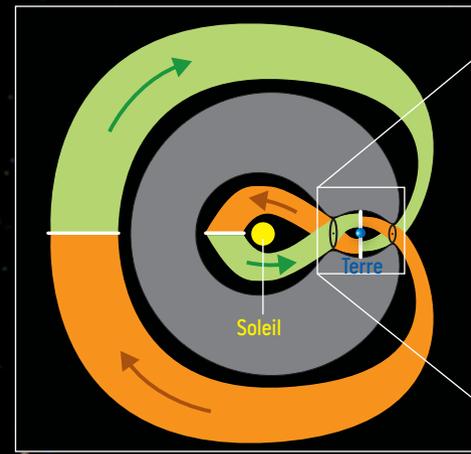
Ces deux points, ainsi qu'un troisième, ont été découverts au XVIII^e siècle par le mathématicien suisse Leonhard Euler. Son contemporain Joseph Louis Lagrange en a découvert deux autres, et ces cinq points sont maintenant connus comme les points de Lagrange L_1 à L_5 (*voir la figure 3*). Ces « points » représentent des lieux fixes dans un référentiel héliocentrique qui tourne à la même vitesse que la Terre autour du Soleil, mais chacun d'entre eux correspond en fait à une orbite spécifique autour du Soleil. Cinq points de Lagrange existent pour chaque paire d'objets massifs, tels le Soleil et une planète, ou une planète et l'un de ses satellites. L_1 est le point d'équilibre interne décrit précédemment, et L_2 le point d'équilibre externe. Ces deux points sont cruciaux pour comprendre le réseau de transport interplanétaire : ce sont les portes d'embarquement pour des destinations lointaines.

En orbite autour de rien

Bien que L_1 et L_2 soient des points instables – la bille finit toujours par tomber d'un côté ou de l'autre de la crête –, une sonde peut néanmoins rester à leur voisinage durant un long moment. De fait, le jeu de la gravitation et de la force centrifuge permet à une sonde de décrire une trajectoire autour de L_1 ou L_2 dans le référentiel en rotation bien qu'il n'y ait aucun objet matériel à ces endroits. Une telle orbite correspond à rater de peu le point d'équilibre faute d'avoir exactement la vitesse adéquate.



5. Avec la bonne vitesse initiale, un engin spatial suit une trajectoire qui le place en orbite autour d'un point de Lagrange (*trajectoire verte*). L'ensemble des trajectoires de ce type forme un tube dans l'espace des phases (*fillet vert*). Un objet sur une trajectoire interne à ce « tube de transport spatial » dépassera le point de Lagrange pour se diriger vers le Système solaire externe (*en bleu*), tandis qu'une trajectoire extérieure le fera rebrousser chemin vers le Soleil (*en rouge*).



6. Certains tubes spatiaux amènent les objets qui les empruntent en orbite autour des deux premiers points de Lagrange de la Terre (*en vert*) alors que d'autres tubes les en éloignent (*en orange*). En faisant sauter les sondes d'un tube à l'autre aux intersections, on

Imaginons qu'une sonde spatiale se situe près du point L_2 , mais légèrement décalée vers l'intérieur et avec une vitesse un peu plus élevée que celle correspondant à une orbite stable au point L_2 . Que va-t-il se passer ? Reprenons l'image des entonnoirs. La bille représentant la sonde commence par suivre son orbite dans l'entonnoir principal, en avance par rapport à L_2 . Sa vitesse étant trop élevée pour cette orbite, elle est déviée vers l'extérieur. Mais alors que la bille se déplace vers l'avant et l'extérieur, la surface qui la devance se soulève (elle s'éloigne du puits secondaire, donc la pente s'accroît de nouveau), ce qui la ralentit. Le point L_2 la rattrape alors et la double par l'intérieur, puis, la bille se retrouvant au-dessus et à la traîne de L_2 , elle rencontre une autre pente prononcée qui la fait chuter en accélérant vers le fond du puits principal. Résultat : la bille revient à peu près à son point de départ avec une vitesse similaire. Elle peut de la sorte parcourir quelques orbites autour du point L_2 avant d'être finalement éjectée vers l'extérieur ou tomber dans le puits de potentiel du Soleil.

Un engin spatial positionné au voisinage du premier point de Lagrange se comporte de la même façon. Vu depuis la Terre, le vaisseau semblera graviter autour du point L_1 pendant un moment avant de filer vers la Terre ou vers le Soleil, le tout sans dépenser la moindre énergie. Certaines des orbites quasi stables au voisinage des points de Lagrange se trouvent dans le plan de l'orbite terrestre, d'autres, comme celle suivie par la sonde *Genesis*, forment des spirales tridimensionnelles. De telles orbites ont été qualifiées d'orbites « halo » après la découverte du même phénomène autour du point de Lagrange du système Terre-Lune dans les années 1960 par Robert Farquhar, de l'Université Johns Hopkins. R. Farquhar fut par ailleurs le promoteur de la première mission au point de Lagrange L_1 de la Terre, *ISEE 3* (*International Sun-Earth Explorer 3*).

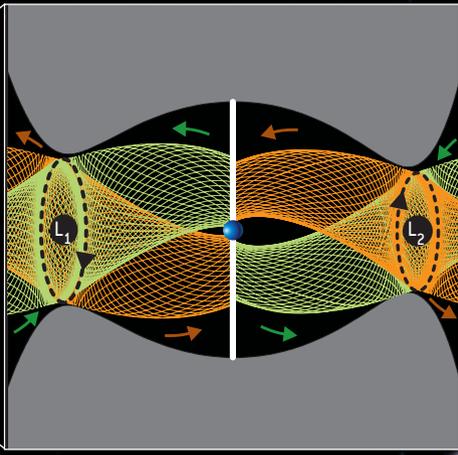
Henri Poincaré fut le premier à entrevoir, à la fin du XIX^e siècle, les mouvements complexes que peut suivre le corps de masse négligeable dans le problème des trois corps restreint. Les méthodes géométriques qu'il a utilisées consti-

tuent les fondements de ce que l'on nomme aujourd'hui la dynamique non linéaire, ou théorie du chaos. Chaotique n'est pas synonyme d'aléatoire. Des trajectoires chaotiques existent dans le problème des trois corps, mais elles sont néanmoins prévisibles, au moins sur une certaine échelle. On peut donc tirer parti de leurs caractéristiques pour déterminer des trajectoires célestes de faible énergie. Poincaré a étudié ces trajectoires dans un espace abstrait à six dimensions, un « espace des phases » constitué par les trois dimensions de l'espace usuel et les trois dimensions correspondant aux composantes de la vitesse du mobile dans les trois directions.

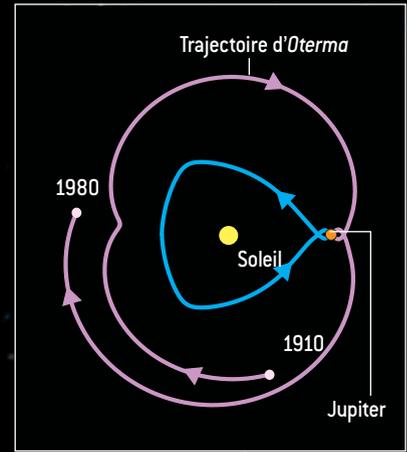
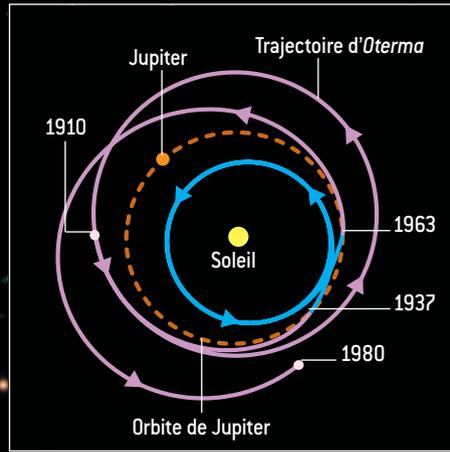
Des tubes dans un espace à six dimensions

En poursuivant les travaux de Poincaré, Charles Conley, alors à l'Université du Wisconsin, a découvert dans les années 1960 que les trajectoires du problème des trois corps restreint se répartissent sur des surfaces en forme de tubes dans l'espace des phases (*voir la figure 5*). Cette étude a été poursuivie par son étudiant Robert McGehee, aujourd'hui à l'Université du Minnesota. Un objet situé sur l'un de ces tubes à six dimensions – cela revient à dire que sa vitesse et sa position restent liées par une certaine relation au fil du temps – voit sa trajectoire évoluer naturellement de deux façons possibles : soit il s'approche d'une orbite autour des points de Lagrange L_1 ou L_2 , soit il s'en éloigne. Les trajectoires situées à l'intérieur d'un tel tube finissent toutes par se mettre en orbite autour d'un point de Lagrange, tandis que celles situées à l'extérieur s'en éloignent.

À partir du milieu des années 1990, Martin Lo, du Laboratoire de propulsion par réaction de la NASA (le JPL), Wang Sang Koon et Jerrold Marsden, de l'Institut de technologie de Californie, et moi-même avons mis en évidence une caractéristique essentielle de ces tubes : tout objet qui se déplace



peut les faire voyager à loisir entre les points de Lagrange ou sur des trajectoires autour du Soleil plus grandes ou plus petites que celle de la Terre (à gauche). Certaines régions sont inaccessibles (en gris), sauf à donner de l'impulsion supplémentaire à la sonde à l'aide d'un moteur.



7. La comète Oterma a suivi les tubes de transport spatial pour passer d'une orbite externe à celle de Jupiter (en violet) à une orbite interne (en bleu) entre 1937 et 1963, avant de revenir à l'extérieur de l'orbite jovienne. Lorsqu'on représente cette étrange trajectoire dans un référentiel en corotation avec Jupiter (à droite), on constate qu'elle passe par les points de Lagrange de la planète géante.

naturellement d'une région située à l'intérieur de l'orbite d'une planète vers une région à l'extérieur de cette orbite passe par un tel tube. Le flux des objets passant à proximité d'une planète forme comme un écoulement le long de ces tubes. De fait, nous avons utilisé des techniques conçues par François Lekien, de l'Université de Princeton, et ses collègues pour calculer les courants océaniques afin d'étudier les trajectoires célestes de basses énergies. Nous avons découvert que les tubes s'étendent loin de leur région de départ – le voisinage de L_1 ou L_2 – et qu'ils s'enroulent autour des deux corps massifs considérés en se déformant en chemin (voir la figure 6). Les deux premiers points de Lagrange d'une planète sont en quelque sorte les portes d'entrée et de sortie du domaine contrôlé par cet astre. Les objets situés à la surface des tubes ont de surcroît une autre propriété : leur vitesse par rapport à la planète est minimale lorsqu'ils traversent le portail. Ces entrées correspondent à des régions de quasi-équilibre.

En réexaminant la trajectoire étrange de la comète Oterma à l'aune de ces découvertes, nous avons remarqué qu'elle passe par le pont tubulaire qui connecte les points de Lagrange L_1 et L_2 de Jupiter (voir la figure 7). C'est comme si la comète avait suivi un « tunnel » reliant des régions de l'espace éloignées. Certains de ces portails pourraient déboucher directement sur la planète : la comète Shoemaker-Levy 9 se déplaçait peut-être sur l'un de ces tubes avant de se disloquer et de s'écraser sur Jupiter en 1994.

Comment tirer parti de ces tubes gravitationnels pour voyager dans le Système solaire ? On pourrait faire du stop sur Oterma ou sur l'un des objets célestes qui parcourent les autoroutes tubulaires reliant les planètes. Mais pourquoi attendre le bon astéroïde ? Il suffirait de diriger un vaisseau spatial vers l'un de ces conduits célestes pour pouvoir ensuite parcourir le Système solaire en dépensant très peu de carburant. Le point d'entrée du réseau se situe au voisinage de la Terre.

Bénéficiant d'une vue dégagée sur le cosmos, le point de Lagrange L_2 de la Terre est idéal pour installer des téles-

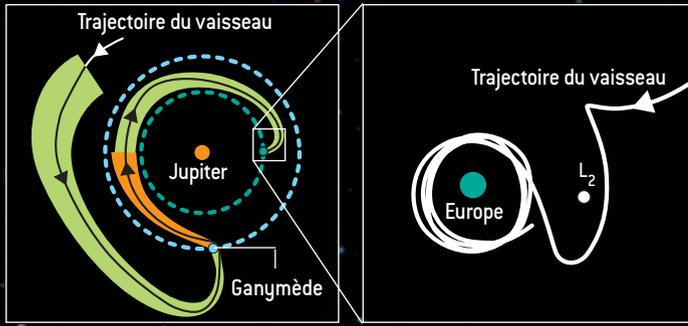
copies qui scrutent l'espace profond. Quant au voisinage du point L_1 , le Soleil y est toujours en vue, ce qui en fait un lieu de choix pour un observatoire solaire.

De fait, la principale phase de la mission *Genesis* consistait en une orbite halo autour du point de Lagrange L_1 de la Terre. *Genesis* a emprunté une trajectoire de basse énergie vers son orbite halo et y est restée, tournant autour du Soleil en amassant des échantillons, avant de regagner la Terre par une autre trajectoire de basse énergie passant à proximité du deuxième point de Lagrange. Cette prouesse réalisée par le concepteur de la mission, M. Lo, et ses collègues en s'appuyant sur la connaissance des tubes gravitationnels a suscité un intérêt considérable tant dans la communauté astronautique que mathématique.

Le guide du routard galactique

M. Lo et moi-même avons étudié plus en détail la dynamique du voisinage terrestre. Nous avons compris que les points de Lagrange L_1 et L_2 des systèmes Terre-Soleil et Terre-Lune constituent d'importants nœuds de distribution. Les tubes connectant les voisinages de ces quatre points se croisent parfois, et une fois par mois environ, les orbites halos autour des points de Lagrange L_1 et L_2 de la Lune se connectent aux orbites halos des points L_1 et L_2 de la Terre via des trajectoires peu consommatrices de carburant. Les implications de cet agencement fortuit pour l'exploration du Système solaire sont énormes.

Avec des collègues de la NASA, M. Lo et moi avons proposé de placer une station spatiale permanente au point de Lagrange lunaire L_1 , qui constituerait le premier jalon et le centre névralgique d'un réseau de transport spatial. Cela faciliterait de façon considérable l'exploration au-delà de l'orbite basse terrestre. Une telle station serait en quelque sorte l'aire de repos la plus proche sur l'autoroute du voyage interplanétaire. De là, des cargos spatiaux à faible poussée, peu gourmands en carburant, pourraient atteindre à leur rythme la destination voulue, tandis que les astronautes



8. Une sonde pourrait explorer successivement les lunes glacées de Jupiter en passant du temps en orbite autour de chacune d'elles. Pour ce faire, elle devrait emprunter de façon judicieuse des tubes de transport spatial (en vert, orange et blanc). Un tel périple est impossible avec des trajectoires classiques en raison d'une consommation de carburant prohibitive.

les rejoindraient à l'aide de véhicules plus véloce. Les vaisseaux quittant la base pourraient atteindre la surface lunaire en quelques heures, ce qui en ferait l'étape idéale pour le retour de l'homme sur la Lune. Cette station serait aussi un excellent point de départ et d'arrivée pour des voyages vers Mars, les astéroïdes ou les planètes extérieures. Les télescopes spatiaux du futur, destinés à être déployés près des points de Lagrange de la Terre, pourraient être assemblés dans cette station et convoyés vers leur destination finale, voire ramenés pour réparation, en utilisant très peu de carburant.

Des atomes aux galaxies

L'exploitation des trajectoires à faible consommation d'énergie ne se limite pas au voisinage de la Terre. Une équipe internationale dont je fais partie a proposé une nouvelle classe de missions spatiales où un vaisseau se placerait successivement en orbite autour des différentes lunes d'une planète extérieure pour mener des observations de longue durée. La NASA avait envisagé d'explorer Callisto, Ganymède et Europe, lunes de Jupiter de tailles comparables à celles des planètes telluriques et qui contiennent peut-être de l'eau, en profitant des tubes de basse énergie entre la planète géante et ses satellites. Le financement de cette mission nommée JIVO (*Jupiter icy moons orbiter*, ou satellite des lunes glacées de Jupiter) a cependant été remis en question l'année dernière. Enfin, il existe aussi des trajectoires pour voyager d'une planète à une autre sans utiliser de carburant, mais le voyage dure alors des milliers d'années. Seuls les astéroïdes et les comètes font montre d'une telle patience.

L'étude du problème à trois corps restreint et de la dynamique associée aux points de Lagrange fera certainement progresser l'exploration spatiale, mais l'idée des trajectoires de basse énergie a un domaine d'application plus vaste. En 2000, Charles Jaffé, chimiste à l'Université de Virginie occidentale, a remarqué que, dans certaines conditions, les trajectoires des électrons externes des atomes de Rydberg (atomes à niveaux d'énergie électronique fortement excités) ressemblent à celle de la sonde *Genesis*. De surcroît, en présence de champs électrique et magnétique orthogonaux, les électrons de Rydberg suivent aussi des trajectoires « tubulaires » ! Avec J. Marsden, M. Lo et moi-même, Turgay Uzer,

de l'Institut de technologie de Géorgie, et David Farrelly, de l'Université de l'Utah, C. Jaffé a entrepris d'étudier l'évolution des éjectats martiens – les roches projetées dans l'espace lors d'un impact sur la planète rouge – à l'aide de techniques issues de la chimie statistique.

Cet apport de la chimie à la mécanique céleste s'opère aussi dans l'autre sens. En collaboration avec plusieurs équipes, j'ai développé les fondements mathématiques et computationnels d'une théorie des taux de réaction qui contourne certaines difficultés rencontrées en chimie, travaux qui s'appuient sur les calculs introduits pour le transport tubulaire dans le Système solaire.

Les tubes spatiaux interviennent aussi dans la formation des structures et le mouvement à des échelles galactiques. Toshi Fukushima, de l'Université de Tokyo, et Douglas Heggie, de l'Université d'Édimbourg, ont ainsi montré que les tubes reliés aux points de Lagrange entraînent une « évaporation » des petits amas d'étoiles en orbite autour de certaines galaxies.

Des exemples encore plus dramatiques se présentent quand deux galaxies interagissent. À 420 millions d'années-lumière de nous, la galaxie Arp 188, ou galaxie du têtard, a une forme qui témoigne d'un épisode passé aussi bref que violent : son énorme traînée correspond à des étoiles qui se sont glissées dans des tubes de transport qui la connectent à une galaxie intruse, sortie du champ depuis lors. La queue du têtard est ainsi un pont de 280 000 années-lumière vers nulle part, mais on distingue dans certains autres couples de galaxies des conduits tubulaires reliant les deux membres du couple.

On peut supposer que des tubes similaires connectent le Système solaire à des étoiles du voisinage. Si l'une des sondes *Voyager* était entrée dans un tube conduisant vers une région d'équilibre gravitationnel entre le Soleil et par exemple Alpha du Centaure, distante de plusieurs années-lumière, elle pourrait être emportée sans effort vers cette étoile voisine. Cela étant, elle n'atteindrait pas sa destination avant des milliers d'années. D'autres étoiles ont pu néanmoins passer près du Soleil par le passé et des échanges de matière entre le Système solaire et d'autres systèmes stellaires se sont peut-être déjà produits par le biais des tubes de transport. Même si ce n'est pas pour demain, nous ferons peut-être bientôt du stop dans la galaxie !

Nous remercions la revue *American Scientist* de nous avoir autorisés à publier cet article.

Shane ROSS est professeur au Département de sciences de l'ingénierie et de mécanique à l'Institut polytechnique et à l'Université d'État de Virginie, aux États-Unis.

J. E. MARSDEN et S. D. ROSS, *New method in celestial mechanics and mission design*, in *Bulletin of the American Mathematical Society*, vol. 43, pp. 43-73, 2006.

C. JAFFÉ et al., *Statistical theory of asteroids escape rates*, in *Physical Review Letters*, vol. 89, article 011101, 2002.

D. L. SMITH, *Next exit 0,5 million kilometers*, in *Engineering & Science*, vol. LXV(4), pp. 6-15, 2002.

Animations et schémas sur le site de Shane Ross : www.esm.vt.edu/ffsdross/