



Le vol libre d'un ballon aérosolaire au-dessus d'un désert de sel argentin, sans énergie. Une nouvelle façon de penser les liens entre humanité et environnement.

Reprenant les principes de base du concept, un ballon a été conçu sur place avec l'aide de communautés locales de la région (Tres Pozos, Pozo Colorado...) avec l'ambition de faire résonner leurs revendications quant aux abus liés à l'extraction du lithium sur leurs terres, une activité particulièrement polluante et surtout gourmande en eau: deux millions de litres sont nécessaires pour obtenir une tonne de cet élément chimique au cœur de la transition énergétique et indispensable aux batteries. L'agriculture et le mode de vie des peuples indigènes sont menacés par l'essor de cette «révolution verte». Ainsi, sur la toile de l'aéronef était inscrit: «L'eau et la vie ont plus de valeur que le lithium.» Avant le décollage, une cérémonie réunissant Argentins et Coréens a placé le ballon sous la protection de Pachamama, la Terre Mère, la déesse de la Terre nourricière des peuples Andins.

La divinité a sans doute entendu ces invocations, car le vol s'est déroulé au mieux et a même battu de nombreux records, validés officiellement par des représentants de la Fédération aéronautique internationale présents sur place, dont le plus long vol en ballon sans recours à une quelconque énergie. La pilote, Leticia Noemi Marqués a parcouru d'une traite 667,85 mètres en 16 minutes et s'est élevée à 272,1 mètres d'altitude.

Selon Tomás Saraceno, *Aerocene Pacha* offre un exemple de technologies, indépendantes de tout extractivisme, mises au service d'une cause sociale tout en provoquant des émotions. Plus encore, le projet *Aérocène* dans son ensemble, avec son message simple et poétique de se laisser porter par les courants aériens au gré des conditions climatiques, invite à repenser nos relations avec l'environnement et à renoncer à vouloir l'assujettir. Et c'est cet appel à remplacer l'ère de

l'Anthropocène par celle de l'«Aérocène», à refaire de l'espace un commun partagé, qui est donné à voir aux visiteurs du domaine des Étangs. En guise d'apothéose, rendez-vous leur est donné en avril 2022 pour l'inauguration de *Du sol au Soleil*, car le titre de l'exposition est aussi le nom de l'œuvre permanente et monumentale qui sera installée à ce moment. Cette structure aérienne, à la fois nuage et toile d'araignée, est destinée une fois encore à relier le ciel et la terre. ■

« Du sol au Soleil », de Tomás Saraceno, jusqu'au 24 avril 2022, au domaine des Étangs, 16310 Massignac. domainedesetangs.com/fr/actualites/

L'auteur a publié:
**Pollock, Turner, Van Gogh,
Vermeer et la science...**
(Belin, 2018)



LES AUTEURS



**JEAN-MICHEL COURTY
ET ÉDOUARD KIERLIK**
professeurs de physique
à Sorbonne Université, à Paris

UN BON POINT POUR LE TÉLESCOPE

**Le télescope spatial «James-Webb»
a rejoint un point particulier du système
solaire, un point dit «de Lagrange».
En quoi consiste ce type de point
et pourquoi est-ce une bonne idée
d'y placer un satellite?**

Le 25 décembre 2021 une fusée Ariane 5 s'est envolée depuis Kourou, en Guyane, avec à son bord le télescope spatial *James-Webb* (JWST). Celui-ci a atteint sa destination trente jours plus tard à quelque 1,5 million de kilomètres de la Terre, dans une direction opposée à celle du Soleil. Là, il orbite désormais autour d'un point de l'espace qui tourne autour du Soleil au même rythme que la Terre. Le plus étonnant est qu'en ce point particulier, on ne trouve... rien! Comment est-ce possible? Orbiter autour de rien? La réponse est à chercher dans les travaux du mathématicien et physicien français Joseph Louis Lagrange. Au XVIII^e siècle, il a montré qu'il existe pour le système Terre-Soleil cinq points de ce type. Découvrons

l'origine physique de ces «points de Lagrange» et leurs avantages pour l'astronomie et l'exploration spatiale.

DE DEUX À TROIS CORPS

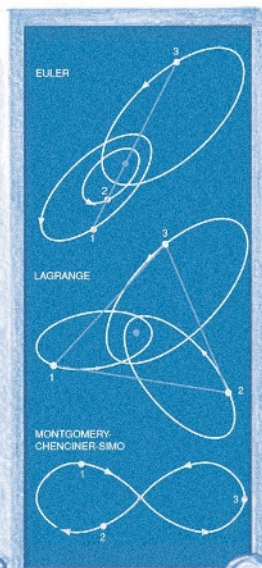
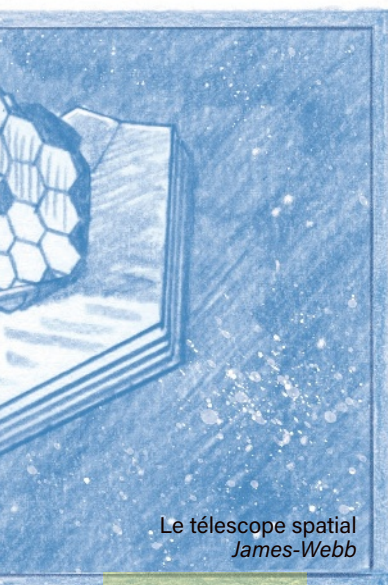
Le mouvement de deux corps massifs en interaction gravitationnelle est particulièrement simple et élégant. Les trajectoires sont des cercles, des ellipses, des paraboles ou des hyperboles, soit, en termes mathématiques, des coniques. Qu'en est-il avec trois corps? Newton s'était posé la question en réfléchissant à l'effet du Soleil sur la rotation de la Lune autour de la Terre, mais comme l'a bien compris le mathématicien Henri Poincaré deux cents ans plus tard, le passage de deux à trois masses change tout: les trajectoires peuvent être incroyablement variées et

compliquées et sont de nature chaotique! Nonobstant de nouveaux résultats régulièrement publiés, on peut considérer que ce «problème à trois corps» ne sera jamais complètement résolu en pratique.

En tout bon physicien, il est urgent de simplifier: qu'advient-il lorsqu'une des trois masses est assez petite par rapport à celle des deux autres pour rendre son effet négligeable sur leur mouvement? On peut dès lors déterminer d'abord la trajectoire des deux objets les plus massifs (une conique), puis étudier le mouvement du troisième. C'est en s'intéressant à cette situation, fréquente en mécanique céleste, que Lagrange découvrit ses fameux points.

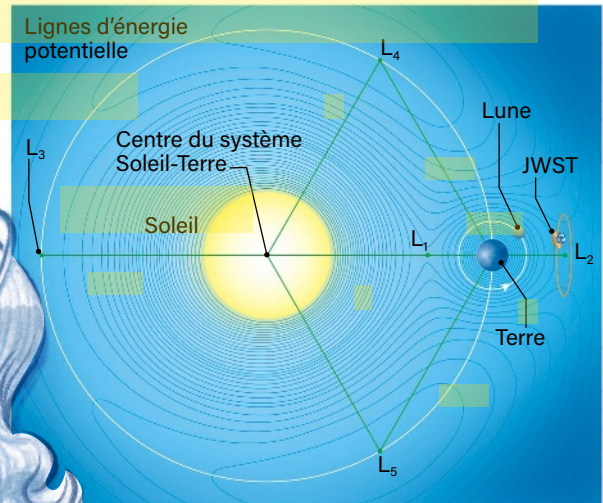
Prenons le cas du Soleil, de la Terre et d'un satellite comme le JWST. La Terre a





CINQ POINTS, C'EST TOUT

Dans le système Soleil-Terre, les points de Lagrange sont répartis le long du plan de l'écliptique. L_1 , L_2 (celui rejoint par le JWST) et L_3 sont alignés le long de l'axe Terre-Soleil. Les deux premiers sont à quelque 1,5 million de kilomètres de notre planète et sont utilisés pour des missions spatiales. Le troisième est le symétrique de la Terre par rapport au Soleil. L_4 et L_5 sont les sommets des triangles équilatéraux ayant pour côté le segment Terre-Soleil. Le « paysage » de l'énergie potentielle (en fond) montre que chaque point de Lagrange correspond à des extrema.



Joseph Louis Lagrange, Henri Poincaré et Isaac Newton se féliciteraient du lancement du télescope spatial *James-Webb* (JWST), l'engin ayant ensuite rejoint le voisinage de l'un des points dits « de Lagrange ». En ces points, en présence de deux corps en orbite circulaire, comme le Soleil et la Terre, un troisième de masse négligeable, resterait à peu près immobile par rapport aux deux autres. Ces points constituent des solutions particulières du problème à trois corps parmi bien d'autres : le tableau montre d'autres solutions trouvées par Leonhard Euler (en haut), Lagrange encore (au centre) et, plus récemment, en 2000, par Alain Chenciner et Richard Montgomery (en bas).

une orbite quasi circulaire autour du centre de masse du système Terre-Soleil, ce centre, compte tenu du rapport des deux masses, étant situé à l'intérieur du Soleil, légèrement décalé du centre de l'étoile. Considérons maintenant un référentiel dont l'origine est ce centre de masse et dont les axes tournent à la même vitesse que la Terre, c'est-à-dire le référentiel où Soleil et Terre sont immobiles. Lagrange a montré qu'il existe dans ce référentiel cinq positions particulières telles que si on y place un objet, ce dernier restera immobile. Cela signifie qu'en pratique ces objets tournent autour du centre de masse du système Terre-Soleil selon une trajectoire circulaire avec la même vitesse angulaire que la Terre. En ces points, la somme des deux forces gravitationnelles que subit

l'objet de la part du Soleil et de la Terre est exactement compensée par la force centrifuge qui tend à l'éloigner du centre de masse Terre-Soleil.

Afin de mieux comprendre les propriétés de ces points, notamment ce qui se passe à leurs voisinages, la représentation de l'énergie potentielle du satellite, somme des énergies gravitationnelle et centrifuge, en fonction de sa position est utile. Les points de Lagrange sont des points d'équilibre dans ce référentiel, des lieux où ce potentiel présente un extremum, ce qui correspond à une force totale nulle. Hélas, aucun de ces extrema n'est une « cuvette » d'énergie potentielle (voir la figure ci-dessus, à droite), et tous sont des « cols » ou des « sommets » : cela signifie que l'équilibre en ces points

ne devrait pas être stable ; à la moindre perturbation, le satellite devrait s'éloigner indéfiniment.

C'est sans compter avec la force de Coriolis, cette force d'inertie qui dépend de la vitesse et qui est responsable du sens de circulation des alizés sur la Terre ou de la rotation du pendule de Foucault. Les physiciens ont montré qu'elle rendait stable les équilibres aux points L_4 et L_5 à condition que la masse de la planète soit inférieure à 3,8% de la masse du Soleil, ce qui est le cas de toutes celles du Système solaire.

Les auteurs ont notamment publié : **En avant la physique !**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



Ainsi, en ces points, la présence prolongée d'objets célestes est parfaitement possible. Dans le cas du système Soleil-Terre, l'astéroïde 2010 TK₇ a été repéré au point L₄ en 2010 et, tout dernièrement, le 2020 XL₅ au point L₅. Peut-être est-ce dû aux perturbations engendrées par les autres planètes? Ce point se situe en effet à 150 millions de kilomètres la Terre, et le champ gravitationnel de Jupiter y est supérieur. *A contrario*, on a découvert dès 1906, mais cent trente ans après l'étude de Lagrange, une accumulation d'astéroïdes autour des points L₄ et L₅ du système Soleil-Jupiter, la plus massive des planètes: appelés «troyens», ils forment des nuages un peu étalés le long de l'orbite de Jupiter et, vus de cette planète, ils semblent tourner autour des points de Lagrange selon des trajectoires très allongées, conformément aux prédictions de l'analyse de stabilité.

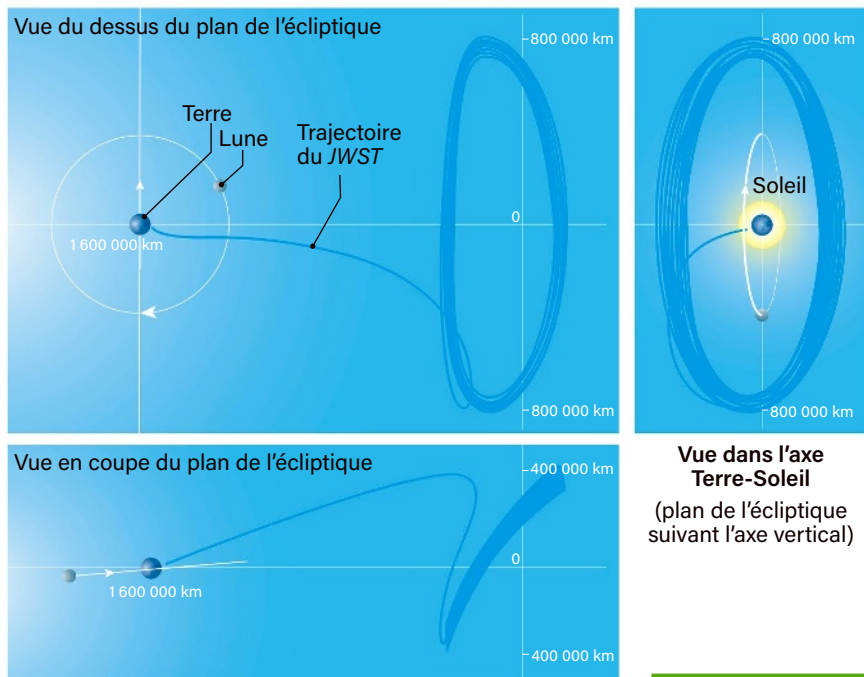
DES POINTS BIEN UTILES

Que vient donc faire le JWST près de L₂? Il rejoint la longue liste des engins spatiaux déjà placés en cet endroit (les satellites WMAP, *Herschel*, *Planck* et *Gaia*, qui y est toujours), faisant fi de son instabilité. On peut invoquer plusieurs raisons: d'abord ces points ne sont pas très éloignés de la Terre; ensuite, en raison justement de cette instabilité, on est sûr de ne pas y trouver un corps céleste susceptible de perturber la mission; enfin, le voisinage de L₂ reste une zone où le bilan résiduel des forces est faible, et il y est donc beaucoup plus facile de corriger ou de changer de trajectoire en actionnant les propulseurs que dans une zone avec un champ de forces plus élevé. Cette dernière propriété est d'ailleurs au cœur de la conception du réseau de transport interplanétaire, un ensemble de trajectoires gravitationnelles à travers le Système solaire qui nécessitent peu d'énergie pour être parcourues, les corrections se faisant justement au voisinage des points de Lagrange associés aux différents couples Soleil-Planète. Si la sobriété énergétique est de mise dans de tels transits, la contrepartie est une durée de voyage considérablement allongée.

Pour en revenir aux points de Lagrange, L₁ possède les mêmes propriétés que L₂ mais est plus adapté à l'observation du Soleil, comme c'est le cas avec le satellite *Soho*, plutôt que celle de l'espace profond. Il y a enfin une raison plus profonde à l'utilisation des points de Lagrange: depuis Poincaré, on sait qu'il existe en effet des familles de trajectoires

TOURNER AUTOUR DU POINT

Le JWST ne va pas simplement se positionner au point de Lagrange L₂, mais plutôt se mettre en orbite autour de celui-ci. Ces schémas montrent différentes vues de la trajectoire de transit et de six mois d'orbite de l'engin, où il se déplacera à des vitesses de l'ordre de 250 mètres par seconde. Le télescope spatial s'éloignera jusqu'à 832 000 kilomètres de L₂ et sera toujours exposé à la lumière du Soleil.



quasi-périodiques, pas nécessairement dans le plan de l'écliptique et parfois quasi fermées (on parle d'orbites de halo) à proximité de ces points, y compris les instables L₁ et L₂. Pour un satellite placé sur une telle orbite, le coût pour l'y maintenir malgré l'instabilité intrinsèque de l'orbite et d'éventuelles autres perturbations (dans le cas du JWST, par exemple, l'écran solaire qui le protège subit de plein fouet la pression de radiation de la lumière de notre étoile) est très limité. Pour le JWST, ce coût équivaut à booster chaque année sa vitesse de 2,5 mètres par seconde. L'orbite choisie (voir la figure ci-dessus) est à bonne distance de L₂: elle s'en éloigne de 250 000 à 832 000 kilomètres. Grâce à son inclinaison par rapport à l'écliptique, jamais le télescope ne se trouvera dans l'ombre de la Terre ou de la Lune: de quoi maintenir en permanence la communication vers la Terre et éviter des variations d'éclairement à même de perturber le délicat équilibre thermique de l'instrument. L₂ est si pratique que *Gaia* et le JWST seront rejoints bientôt par *Euclid* et *Nancy-Grace-Roman*, deux autres télescopes spatiaux! ■

BIBLIOGRAPHIE

R. Montgomery, **Le problème des trois corps rebondit**, *Pour la Science*, n° 520, 2020.

Z. Musielak et B. Quarles, **The three-body problem**, *Reports on Progress in Physics*, 2014.

G. Collange, **Introduction au problème à trois corps et dynamique linéarisée autour des points de Lagrange**, note technique CCT Mécanique orbitale N° 7, CNES, 2006.

Le site du JWST :
www.jwst.nasa.gov/