

partir des laves qui remontent en surface. Les cristaux de magnétite contenus dans la lave s'orientent dans la direction du champ magnétique ambiant, juste avant que la lave ne se solidifie en une croûte océanique. Ainsi se crée, au cours de l'évolution de la Terre et des inversions de son champ magnétique, une série de bandes d'aimantation alternée.

Les plaques terrestres se meuvent de quelques centimètres par an et il y a quelques inversions par million d'années, d'où une largeur de bande de l'ordre de dix kilomètres. Mars pourrait avoir produit de la même façon les

bandes observées (200 kilomètres de large) à condition que son champ magnétique ait inversé sa polarité beaucoup plus lentement qu'aujourd'hui sur Terre ou que la vitesse d'épanchement de la croûte martienne ait été bien supérieure à ce qu'elle est sur Terre aujourd'hui.

Forts de cette comparaison, nous pensons que ces bandes magnétiques se seraient formées très tôt dans l'histoire de la planète, lors d'un épisode de tectonique des plaques et d'épanchement magmatique. Les hauts plateaux de Mars constitueraient alors les restes de la croûte océanique primi-

tive, modifiée par des impacts postérieurs et par des événements thermiques, telle l'activité engendrée lors du refroidissement de la croûte martienne.

Toutefois, l'évolution de la planète Mars reste mal connue : aucune théorie n'explique, par exemple, l'origine de la frontière. S'il se vérifie que ces bandes magnétiques résultent d'une tectonique des plaques martiennes, il faudra remplacer le modèle de la plaque unique admis jusqu'à aujourd'hui.

Didier VIGNES et Christian MAZELLE, CESR/CNRS-Univ. Paul Sabatier, Toulouse

Le jongleur d'eau

Certaines fontaines présentent un étrange comportement oscillatoire.

Dans la mythologie grecque, les fontaines sont le royaume des naïades. Ces dernières sont des êtres fantasques et imprévisibles : d'où les oscillations que l'on observe parfois dans les jets d'eau. Comment expliquer les variations périodiques de hauteur d'eau de certaines fontaines ? Le physicien marseillais Christophe Clanet a percé le mystère des fontaines oscillantes : l'eau se comporte comme les balles d'un jongleur.

En 1997, à Grenoble, Emmanuel Villiermaux effectua les premiers enregistrements de fontaines oscillantes et identifia une périodicité, dans certains cas. Lesquels ? Pour répondre à cette question, Ch. Clanet a repris l'étude en étudiant l'influence du diamètre de l'injecteur et de la vitesse d'éjection.

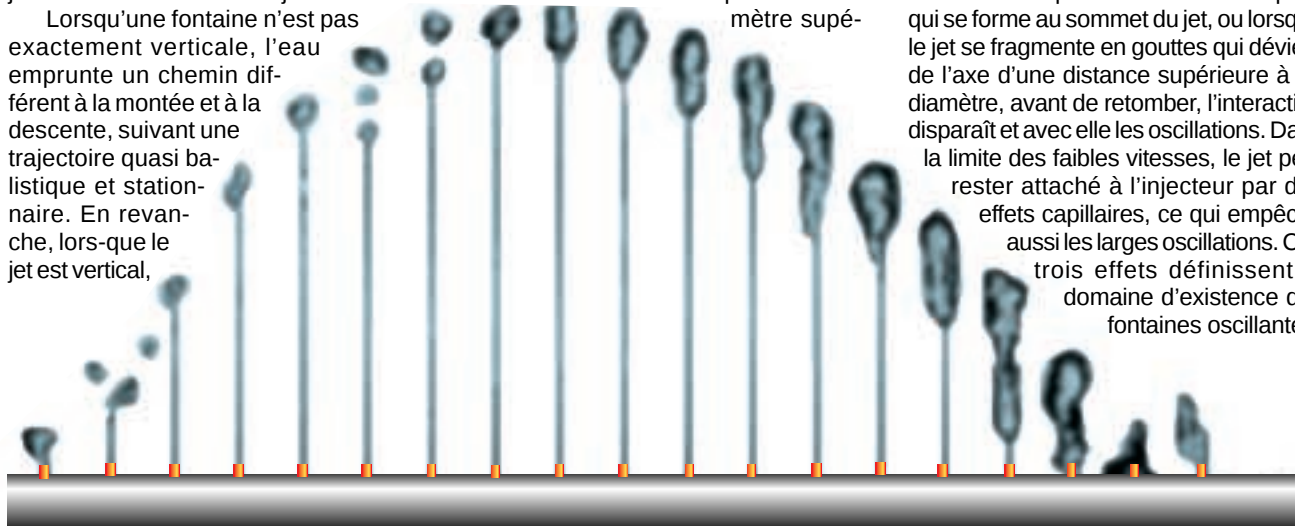
Lorsqu'une fontaine n'est pas exactement verticale, l'eau emprunte un chemin différent à la montée et à la descente, suivant une trajectoire quasi balistique et stationnaire. En revanche, lorsqu'elle est verticale,

le fluide qui redescend interagit avec le fluide qui monte ; ces interactions engendrent parfois des oscillations dont l'amplitude est de l'ordre de la hauteur de la fontaine.

Comment savoir quand ces oscillations sont périodiques ? Ch. Clanet enregistra l'évolution du sommet du jet au cours du temps. En répétant la procédure pour différentes vitesses et différents diamètres, on observe que la fréquence caractéristique des oscillations diminue avec la vitesse d'éjection de l'eau et varie peu avec le diamètre tant que celui-ci reste de l'ordre de la longueur capillaire. Cette longueur est la distance pour laquelle les forces de capillarité sont du même ordre d'intensité que les forces de gravité. Pour l'interface eau/air, la longueur capillaire est d'environ quatre millimètres. La capillarité a pour conséquence que, lorsqu'une paille de diamètre inférieur à quatre millimètres est approchée de la surface de l'eau dans un verre, l'eau monte dans la paille, tandis que pour une paille de diamètre supé-

rieur, l'eau reste au même niveau que la surface. Afin de comprendre l'origine physique des oscillations, Ch. Clanet a analysé l'influence des divers facteurs et il propose aujourd'hui le «modèle du jongleur» : imaginons que le jet soit composé de gouttes isolées, lancées successivement vers le haut, comme le sont les balles par un jongleur. Si la période de lancer des balles est suffisamment courte, lorsque la balle supérieure redescend, elle heurte la balle qui la suit ; en utilisant la conservation de la masse et de l'impulsion lors de la collision, on détermine le temps de retour des balles dans la main du jongleur. En faisant tendre vers zéro l'intervalle de temps entre deux balles successives, on peut comparer la fréquence calculée à celle qui est mesurée expérimentalement sur les fontaines. Cette comparaison révèle un bon accord entre la théorie et l'expérience.

Cet accord perdure tant que le fluide ascendant interagit avec le fluide descendant. Lorsque l'inertie du jet est suffisamment forte pour briser la masse liquide qui se forme au sommet du jet, ou lorsque le jet se fragmente en gouttes qui dévient de l'axe d'une distance supérieure à un diamètre, avant de retomber, l'interaction disparaît et avec elle les oscillations. Dans la limite des faibles vitesses, le jet peut rester attaché à l'injecteur par des effets capillaires, ce qui empêche aussi les larges oscillations. Ces trois effets définissent le domaine d'existence des fontaines oscillantes.



États successifs d'une fontaine oscillante.

Origine extraterrestre ?

Des bactéries résistent aux impacts de météorites.

La vie a-t-elle vu le jour sur Terre, dans une soupe primitive, ou, au contraire, a-t-elle commencé ailleurs, puis essaimé sur Terre, transportée par les météorites ? Cette question lancinante déchire les exobiologistes depuis des décennies. À l'aide d'expériences de balistique, nous avons montré que même des micro-organismes complexes, telles les levures, résistent à des accélérations analogues à celles qui sont subies par les météorites qui atteignent la Terre.

Dans la Grèce antique, Anaxagore postule déjà la dissémination du vivant dans l'Univers, mais c'est seulement au XIX^e siècle, après que Pasteur a montré l'absence de génération spontanée, que l'hypothèse de la panspermie est élaborée. Hermann Richter, Hermann von Helmholtz et Lord Kelvin proposent que des cellules vivantes voyagent à l'intérieur de météorites (lithopanspermie). Dans l'impossibilité d'expliquer comment des germes peuvent être logés dans une météorite, le concept est modifié par le chimiste Svante Arrhenius : poussées par la pression du rayonnement (radiopanspermie), les bactéries seraient échangées entre systèmes planétaires.

Au cours du XX^e siècle, la constatation que le rayonnement solaire ultraviolet tue rapidement les bactéries relègue la panspermie dans l'oubli, mais, depuis la découverte de météorites martiennes sur Terre, la lithopanspermie est à nouveau débattue : des fragments de surface, arrachés à une planète par un impact météorique explosif, véhiculeraient la vie.

Les météorites arrachées à la croûte martienne sont captées par la Terre et s'y écrasent après quelques millions d'années. Des expériences montrent que, logées dans une météorite, les bactéries survivent durant une telle durée aux particules solaires et aux rayonnements spatiaux, tel le rayonnement solaire ultraviolet. De surcroît, des spores et des bactéries isolées dans de l'ambre vieux de 25 à 40 millions d'années ont un chromosome encore fonctionnel. Enfin, le froid et le vide de l'espace sont des conditions idéales pour un stockage durable. Seule la résistance bactérienne aux stress mécaniques d'un tel transport n'avait pas encore été testée.

Retraçons le scénario de capture : un rocher de l'ordre du kilomètre de diamètre percute Mars et met en orbite des fragments de la planète. Les accélérations subies lors de la mise en orbite sont égales à plus de 10 000 fois l'accélération de la pesanteur (g).

Ces fragments sont ensuite captés par la Terre à une vitesse comprise entre 11 et 70 kilomètres par seconde. Des objets de plusieurs tonnes, peu ralentis par l'atmosphère, gardent une vitesse supersonique et explosent au moment de l'impact, libérant leur formidable énergie cinétique sous forme de chaleur, fatale aux éventuelles bactéries transportées. De même, les objets de quelques centimètres de diamètre se consument intégralement pendant la traversée de l'atmosphère (les étoiles filantes), stérilisant toute forme de vie.

En revanche, les micrométéorites d'un diamètre inférieur à quelques millimètres convertissent leur énergie cinétique en rayonnement et tombent très lentement ; elles constituent un vecteur potentiel pour le transfert de matière organique. De même, une météorite de diamètre compris entre quelques centimètres et un mètre est suffisamment ralentie par l'atmosphère pour que son énergie cinétique soit dissipée, principalement par chauffage de l'air, et aussi par fusion d'une couche de moins d'un centimètre d'épaisseur. L'intérieur de la météorite reste alors froid. La vitesse résiduelle est



Chute d'une météorite dans l'océan.

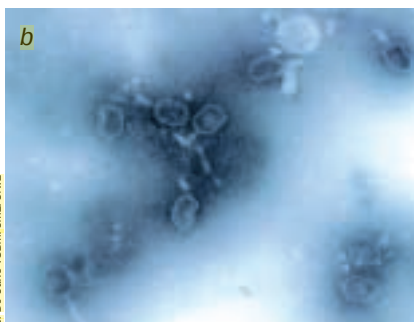
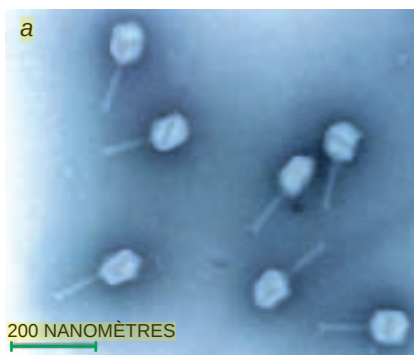
celle d'une chute libre (100 à 250 mètres par seconde) et si la météorite heurte, par exemple, une surface de sable, elle subit une décélération de quelques milliers de g , lors de laquelle les bactéries pourraient être préservées.

Pour reproduire le stress mécanique subi par de petites météorites, nous avons procédé à des expériences balistiques. Dans une carabine à air comprimé, le projectile subit une accélération de 100 000 g , bien supérieure à celle d'un transfert planétaire. Nous avons déposé des levures, des bactéries en croissance, des bactéries sans paroi et des virus qui s'attaquent aux bactéries (bactériophages) sur les projectiles de la carabine. Après avoir tiré ces projectiles à une vitesse de 300 mètres par seconde dans des bouteilles contenant du sable stérile, nous avons vérifié la survie et l'intégrité physique de ces micro-organismes : les levures et les bactéries ont, pour la plupart, résisté au choc de décélération de 300 000 g . Seules les bactéries sans paroi et les bactériophages ne résistent pas à ces violentes décélération. Ces résultats balistiques montrent que des organismes unicellulaires, logés à l'intérieur de petites météorites, survivraient aux contraintes mécaniques d'un transfert interplanétaire.

L'ensemencement de notre planète expliquerait la rapidité de l'émergence de la vie terrestre. Si cette hypothèse est confirmée, la vie que nous connaissons proviendrait soit d'une autre planète de notre Système solaire, soit d'un autre système planétaire. Les étoiles naissent par centaines en amas et les échanges de comètes sont intenses durant la période initiale de l'accrétion planétaire, ce qui aurait favorisé une diffusion galactique de la vie.

Indépendamment de la question de l'origine de la vie terrestre, cette capacité à certainement permis aux premiers organismes terrestres de survivre aux violents impacts des débuts de la Terre, capables de vaporiser les océans : mises en orbite par de tels événements, les bactéries auraient réensemencé la surface de notre planète dès la réapparition de conditions favorables à leur prolifération.

C.-A. ROTEN, Institut de génétique et de biologie microbiennes, Lausanne



S. De Carlo-IGBM/CNRS/UNIL

On compare la survie des micro-organismes à celle de virus qui servent de «contrôles négatifs». Alors que les levures résistent aux impacts, les virus T4 sont détruits : avant le tir, ils sont intacts (a), mais après le choc (b), ils sont cassés et leur ADN est dispersé.