

LES AUTEURS



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

LE MYSTÈRE DES PIERRES QUI BOUGENT

Grâce à une conjonction improbable de conditions climatiques et de configurations de terrain, des roches se déplacent toutes seules de plusieurs mètres en quelques minutes.

Racetrack Playa, un lac temporaire dans le parc américain de la Vallée de la Mort, en Californie, est le siège d'un phénomène déconcertant. Des centaines de roches s'y déplacent en laissant sur le sol des traces rectilignes, longues de plusieurs dizaines de mètres et dont le parallélisme et les points anguleux suggèrent que leurs mouvements sont synchrones...

Ces déplacements ne se produisent dans ce lieu difficile d'accès que lors de très rares épisodes, parfois séparés de plusieurs années. Aussi les chercheurs n'ont-ils pu résoudre l'énigme que récemment, en équipant des pierres de capteurs de géolocalisation et en disposant autour du lac des caméras.

Le lieu, l'un des rares dans le monde à présenter le même phénomène, est bien particulier: Racetrack Playa est un

lac de quelques kilomètres carrés alimenté uniquement par les pluies. L'eau s'en échappe ensuite par infiltration et évaporation. La conséquence est l'absence de courant, d'où un fond particulièrement plat et horizontal, constitué de sable fin, de vase et d'argile.

UNE MORNE PLAINE BALAYÉE PAR LES VENTS

Lorsque ce lac est à sec, on peut y voir de nombreux cailloux et rochers de taille allant jusqu'à 50 centimètres. Beaucoup sont à l'extrémité de traces sur le sol, comme s'ils s'étaient déplacés tout seuls. Comment est-ce possible?

La présence d'un fond limoneux, particulièrement glissant lorsqu'il est humide, suggère que les rochers les plus plats glisseraient facilement dessus. Certaines mesures le confirment: le coefficient de frottement statique sur le sol humide est de l'ordre de 0,15, alors



Pour déterminer la cause des déplacements des roches, les chercheurs ont équipé certaines pierres de capteurs de position et autres instruments.

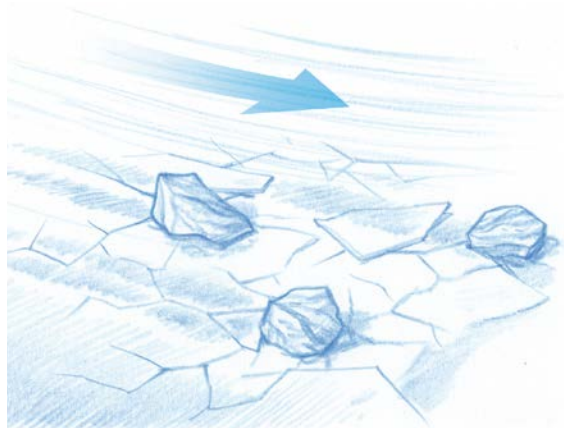
que pour des matériaux secs usuels (bois, métal...), il est plutôt de l'ordre de 0,5 ou 0,6. Cela signifie qu'il suffit d'appliquer une force horizontale égale à 0,15 fois leur poids pour déplacer ces roches. Mais d'où viendrait cette force?

Sur le sol, aucune trace de pas d'animaux. Le vent? Faisons une estimation grossière. Une roche cubique de 15 centimètres de côté pèse quelque 9 kilogrammes et requiert donc une poussée horizontale de 13 newtons pour bouger. Cela correspond à des vents d'environ 30-35 mètres par seconde – des vitesses supérieures à celles des vents qui sévissent à cet endroit.



LA SOLUTION DE L'ÉNIGME

À la suite de ses observations et mesures sur des pierres équipées de capteurs, l'équipe de Richard Norris, aux États-Unis, a proposé en 2014 un scénario qui résout le mystère des pierres qui bougent. Selon ce scénario, les pierres sont poussées par les mouvements des plaques de glace formées lors d'une nuit froide. Ces plaques se rompent le jour et sont elles-mêmes poussées par le vent, grâce à la très grande surface globale qu'elles lui offrent et aux enchevêtrements qui se créent. Les mouvements de l'eau liquide, également dus au vent, contribuent aussi à la poussée des plaques de glace.



Puisque, comme plusieurs études l'ont confirmé, le vent ne suffit pas, il faut chercher d'autres ingrédients.

DES PIERRES PORTÉES PAR DES RADEAUX DE GLACE ?

Notamment en analysant les périodes de l'année où se produisent ces déplacements – en hiver, lorsque le lac peut geler –, le géologue tchèque Gunther Kletetschka et ses coauteurs ont formulé en 2013 une nouvelle hypothèse.

Elle s'appuie sur le fait que la conductivité thermique de la roche est quatre fois supérieure à celle de l'eau. Imaginons qu'au moment du gel, l'eau soit à un

niveau tel que le haut du rocher est encore bien émergé.

Dans ce cas, puisque la chaleur diffuse bien à travers la roche, cette dernière se retrouvera rapidement et intégralement à une température inférieure à 0 °C. L'eau qui est à son contact peut geler et ainsi former une gangue de glace autour de la partie immergée du caillou. De plus, ce gel peut s'étendre en dessous du rocher, les sédiments et la vase étant aussi très humides.

Et comme le niveau d'eau du lac fluctue avec les apports d'eau en provenance de toute la zone environnante, cet ensemble « rocher + radeau de glace »

peut se détacher du fond et se mettre à flotter (voir l'encadré page suivante).

Avec notre cube de 15 centimètres, et si on oublie la fragilité mécanique de la glace, il faudrait un radeau de glace de 4 centimètres d'épaisseur sur un peu moins de 1500 mètres carrés pour le faire flotter grâce à la poussée d'Archimède.

C'est considérable. Mais même avec un radeau plus petit, notre rocher pourrait se trouver suffisamment allégé pour >

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



> être poussé par le vent. Les traces parallèles et uniformes des rochers proches les uns des autres semblent confirmer cette hypothèse: ils seraient tous pris dans le même radeau; ils ne rouleraient pas en se déplaçant, mais frotteraient sur le fond.

Hélas, les campagnes d'observations ont invalidé ce séduisant scénario. Les trajectoires de rochers proches ne sont en fait pas parfaitement parallèles: elles s'écartent ou se rapprochent légèrement, et on en déduit que ces rochers ne sont pas solidaires du même bloc de glace.

D'autres éléments viennent infirmer l'hypothèse du radeau. L'épaisseur de glace nécessaire pour assurer la flottaison semble plus importante que celle ayant cours d'habitude dans ce lac. Ensuite, lorsque les températures sont négatives et que tout le lac gèle et se recouvre de glace, les mouvements deviennent impossibles; il faut que la glace se brise pour que les plaques se mettent à dériver. Or dès que le soleil point, les pierres s'échauffent bien plus vite que l'eau et c'est donc autour d'elles que la glace fond le plus vite: les pierres se détachent de leur radeau avant que celui-ci ait le temps de bouger! Enfin, les traces au sol se révèlent trop profondes pour être dues à un attelage pierre-glace allégé.

POUSSÉES PAR DES PLAQUES DE GLACE

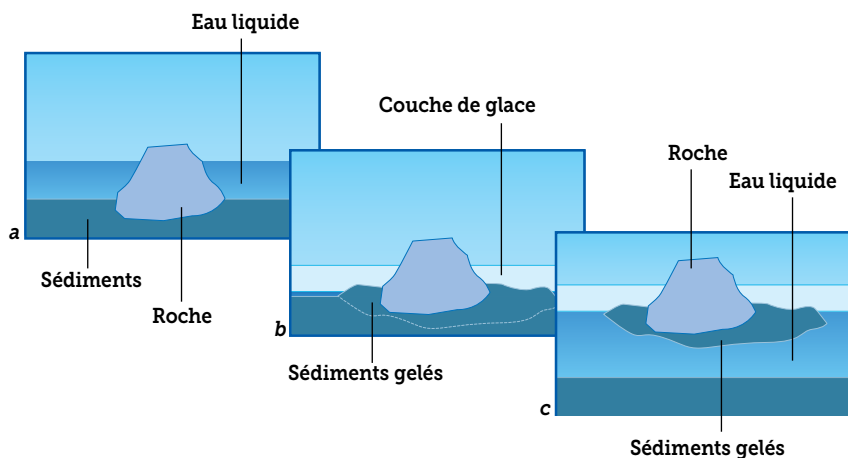
L'énigme a persisté notamment parce que les observations étaient très difficiles. En effet, même en imaginant être sur place au bon moment, il est difficile à l'œil nu de distinguer les lents mouvements de rochers (1 à 2 mètres par minute) dans un paysage dépourvu de points de repère. C'est en équipant des rochers de balises de géolocalisation, d'enregistreurs et de capteurs de température que l'Américain Richard Norris, de l'institut Scripps d'océanographie, et ses collègues ont pu comprendre le phénomène.

La position et la température étaient enregistrées toutes les heures jusqu'à ce qu'un mouvement soit détecté grâce à un déclencheur magnétique enterré dans le sol, sous les rochers équipés. L'enregistrement passait alors en mode continu et des caméras placées en divers endroits filmaient.

Ces chercheurs ont alors constaté que les mouvements se produisaient par des jours clairs et ensoleillés, après des nuits où la température était descendue en dessous de 0 °C. À la mi-journée, la chaleur et le vent brisaient la mince couche de glace qui s'était formée durant la nuit. Ce

UN SCÉNARIO ERRONÉ

Selon un scénario proposé en 2013, une roche posée sur le lac est dans un premier temps partiellement immergée (a). Quand la température baisse suffisamment, l'eau gèle, ainsi que la roche et les sédiments qui sont à son contact (b). Avec l'arrivée d'eau liquide, un radeau de glace solide de la roche et des sédiments associés se détache et se met à flotter au-dessus de la couche liquide (c); ce radeau peut alors se déplacer sous l'effet du vent. Mais ce scénario s'est révélé erroné, notamment parce que les couches de glace constatées sont trop minces.



sont ces plaques de glaces qui, mues par le vent, poussaient les roches. Les plaques, épaisses de 3 à 6 millimètres, sont bien trop minces pour soulever les cailloux, mais la grande surface qu'elles offrent au vent les soumet à des forces latérales suffisantes pour qu'elles se chevauchent et s'enchevêtrent; cela augmente leur prise au vent, au point qu'elles deviennent en mesure de pousser les cailloux se trouvant sur leur chemin (voir l'encadré page précédente).

Cette explication permet aussi de comprendre pourquoi les mouvements des cailloux semblent synchronisés: les pierres sont poussées par un même ensemble de plaques de glace. Mais les mouvements ne sont pas parfaitement parallèles, car chaque caillou est poussé sans être solidaire des autres. Lors de certains événements, ce sont plus de 60 pierres qui sont poussées ensemble dans la même direction. Ces mouvements sont rares et brefs, les enregistrements révélant des durées de quelques minutes, une vingtaine tout au plus.

À l'influence directe du vent sur les plaques viennent s'ajouter les mouvements de l'eau du lac dus au vent. Observés à une vitesse comprise entre 60 et 100 centimètres par minute, ces mouvements font passer de l'eau de la partie nord du lac à sa partie sud. Ils facilitent les dérives des plaques et donc le déplacement des pierres. ■

BIBLIOGRAPHIE

R. D. Norris et al., **Sliding rocks on Racetrack Playa, Death Valley National Park: First observation of rocks in motion**, *PLoS One*, vol. 9(8), article e105948, 2014.

G. Kletetschka et al., **Sliding stones of Racetrack Playa, Death Valley, USA: The roles of rock thermal conductivity and fluctuating water levels**, *Geomorphology*, vol. 195, pp. 110-117, 2013.