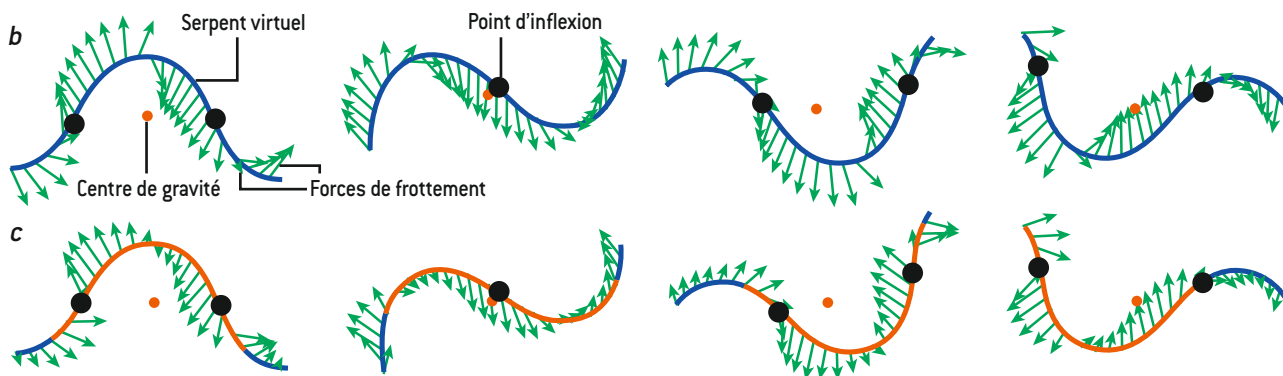




**3. UN SERPENT DES BLÉS QUI SE DÉPLACE EN ONDULANT** sur un miroir. Il soulève certaines portions de son ventre, dont on aperçoit alors le reflet (*a*, *flèche*). La modélisation de l'ondulation montre que cette répartition non uniforme du poids (*c*) augmente la vitesse du serpent par rapport à une répartition uniforme (*b*) : le serpent virtuel se déplace de gauche à droite. Les forces de frottement (*flèches vertes*)

exercées par le sol lors de son déplacement le propulsent lorsqu'elles sont orientées vers la droite, le freinent lorsqu'elles sont vers la gauche (forces de traînée), et entraînent une dissipation d'énergie dans les autres directions. En soulevant certaines parties de son corps (*c*, *segments orange*), un serpent diminue les forces de frottement dissipatives et augmente la force tirant vers l'avant aux points d'inflexion.

## ✓ BIBLIOGRAPHIE

Y. Ding *et al.*, Drag induced lift in granular media, *Physical Review Letters*, vol. 106, 028001, 2011.

N. Cohen *et* J. H. Boyle, Swimming at low Reynolds number : a beginner's guide to undulatory locomotion, *Contemporary Physics*, vol. 51, pp. 103-123, 2010.

É. Guyon *et al.*, « Avoir un bon contact », dans *Matière et matériaux*, pp. 78-79, Belin, 2010.

D. Hu *et al.*, The mechanics of slithering locomotion, *PNAS*, vol. 106, n° 25, pp. 10081-10085, 2009.

R. D. Maladen *et al.*, Undulatory swimming in sand : subsurface locomotion of the sandfish lizard, *Science*, vol. 325, pp. 314-318, 2009.

D. C. Rapaport, *The Art of Molecular Dynamics Simulation*, Cambridge University Press, 2004.

un serpent soulève les parties de son corps qui effectuent le travail le moins utile. Cet ajustement est une simple modification de la répartition du poids.

## Le sable : parfois solide, parfois liquide

De nombreux organismes du désert – serpents, taupes, lézards, scorpions – disparaissent dans le sable pour échapper aux prédateurs et à la chaleur, ou pour attraper des proies. Le poisson des sables que l'un de nous (D. Goldman) a choisi pour modèle est un lézard de dix centimètres de long, muni d'orteils à franges sur ses quatre pattes, d'un groin en forme de pelle, et d'un ventre et de flancs aplatis – des traits qui l'aident à s'enfouir et à « nager » dans le sable. Ses écailles sont lisses et résistantes à l'abrasion, comme celles des serpents, mais les écailles ventrales ne se chevauchent pas. Le déplacement de ce petit animal sous le sable a été très peu étudié, notamment à cause des difficultés d'observation, le sable étant opaque.

Le poisson des sables utilise ses membres pour se déplacer à la surface du sable, mais dès qu'il sursaute, il pointe son groin vers le bas et disparaît en une demi-seconde

sous le sable. Les lois physiques qui régissent les forces de propulsion dans un tel milieu granulaire sont différentes des forces de frottement qui interviennent dans l'ondulation sur des surfaces solides, essentiellement parce que les matériaux granulaires peuvent céder (s'écouler) ou se solidifier en réponse à une perturbation.

Généralement sec, le sable du désert est composé de particules à peu près sphériques de 0,1 à 0,3 millimètre de diamètre. Elles n'interagissent que par contact, l'énergie étant dissipée sous l'effet de forces telles que la viscoélasticité (réaction à une contrainte du matériau, qui se comporte comme s'il était composé d'un solide élastique et d'un fluide visqueux), la déformation plastique et le frottement. Selon la contrainte appliquée, le milieu granulaire présente tout un éventail de comportements physiques avec des propriétés caractéristiques des gaz, des liquides et des solides. Par exemple, un tas de grains sur une planche plane se comporte comme un liquide à seuil élastique : il se comporte comme un solide s'il n'est pas trop penché, mais à des angles d'inclinaison suffisamment élevés, il s'écoule comme un liquide.

Le comportement des milieux granulaires dépend aussi de leur compacité, c'est

à-dire du volume relatif que les grains occupent. Bien que la fourchette de compacité d'un milieu du type du sable du désert soit restreinte (entre 58 et 63 pour cent), un tel milieu se comporte très différemment selon sa compacité : en réaction à une perturbation, des grains peu tassés s'écoulent comme un liquide, tandis que des grains très tassés s'écoulent par à-coups quand un objet se fraye un passage entre eux.

La modélisation d'un tel comportement constitue un défi, car on ne connaît pas de loi physique décrivant un écoulement où coexistent un état solide et un état liquide. Une méthode fructueuse – la dynamique moléculaire – consiste à suivre par ordinateur le mouvement et les interactions de millions de grains individuels soumis aux lois de la collision et de la gravité. Une fois validés, ces modèles donnent une idée des écoulements de particules, fonctionnant comme un microscope virtuel à l'intérieur du matériau.

## Sans les pattes

Comment un poisson des sables se déplace-t-il dans son milieu ? L'animal utilise-t-il ses membres pour pagayer ou frétille-t-il comme une anguille ? Comment se comporte le sable quand la tête y a pénétré ? Reste-t-il fluide ou se solidifie-t-il sous la perturbation ? Quelle fluidité présente-t-il lorsque la suite du corps s'enfouit ? Des changements de compacité du matériau modifient-ils le mouvement du poisson des sables ? Pour étudier ces questions, l'un de nos doctorants, Ryan Maladen, a utilisé une combinaison de techniques d'imagerie à rayons X pour visualiser les mouvements du reptile sous le sable.

Pour contrôler la compacité du sable, les grains sont placés dans un bac à fond poreux. Un flux d'air traversant ce fond les pousse vers le haut. Lorsque son intensité est suffisante, les grains s'agitent comme un fluide et, une fois le flux d'air arrêté, s'arrangent dans un état de faible compacité. Différents degrés de compacité sont ensuite provoqués par des jets d'air ou des vibrations contrôlées. Le poisson des sables est placé dans un enclos relié au bac. Quand on soulève la porte de l'enclos, l'animal se précipite vers le sable, le dos raide, en utilisant ses membres pour se propulser. Une caméra rapide révèle qu'il s'y enfouit en combinant les mouvements de son corps et la poussée



**4. UN SERPENT DES BLÉS** glissant sur de la gélatine photo-élastique illuminée par dessous et filmé entre des filtres à polarisation croisée. Initialement, l'orientation des filtres empêche la lumière polarisée de parvenir à la caméra, mais quand le serpent appuie sur la gélatine, il y a rotation de la polarisation de la lumière, ce qui permet à la caméra de la détecter (les zones lumineuses sous le serpent). Cette technique visualise les points de contact du serpent avec le sol.



**5. LE POISSON DES SABLES**, qui vit dans les déserts d'Afrique du Nord, utilise son groin en forme de pelle (a), sa peau lisse et son puissant corps se tortillant dans le sable. Il avance ainsi à une vitesse atteignant deux longueurs de corps par seconde. Le reptile, long de dix centimètres, peut s'enfouir en moins d'une seconde (b). En surface, il utilise ses membres pour se déplacer, mais sous le sable, il se déplace uniquement en propageant une onde sinusoïdale le long de son corps (c, observé aux rayons X).

de ses membres. Très bref, le temps d'enfouissement ne dépend pas de la compacité du sable.

Le déplacement du reptile dans le matériau est suivi à l'aide d'une caméra rapide à rayons X. Le sable (et le lézard) est placé entre une source de rayons X et une matière scintillante qui convertit les photons X en électrons ; ces derniers frappent une autre surface qui émet alors de la lumière visible, laquelle est ensuite captée par une caméra conventionnelle à grande vitesse.

La première fois que nous avons observé le déplacement du poisson des sables sous la surface, nous avons constaté qu'il avançait à une vitesse d'environ deux longueurs de corps par seconde, en se tortillant et sans se servir de ses pattes, se déplaçant plus vite que des serpents de lait sur un sol plat. Le lézard nageait jusqu'à une profondeur d'environ quatre centimètres, puis s'arrêtait, se sentant probablement en sécurité. Il avançait en propageant une onde sinusoïdale de déplacement de la tête vers la queue à une fréquence donnée (plus la fréquence était élevée, plus il allait vite). Dans un milieu très compacté, l'animal utilisait des fréquences allant jusqu'à quatre ondulations par seconde.

En augmentant la compacité, nous nous attendions à ce que l'animal ralentisse. Des mesures effectuées sur de petites tiges dans des milieux granulaires avaient montré que la force de traînée (la composante du frottement qui s'oppose au mouvement) dans du sable très tassé est presque le double de celle mesurée dans un sable peu compact (voir l'encadré page 73). À notre grande surprise, la compacité n'avait aucun