

rence une manche de tissu ajustée pour coller au serpent sans gêner sa respiration (voir la figure 2). Les forces de frottement s'opposent toujours au glissement sur le sol du serpent vêtu de sa veste. Toutefois, lorsque le serpent engendre une onde de déplacement, la somme des forces s'appliquant sur le ventre du serpent est nulle: le serpent ondule sur place, comme s'il se trouvait sur de la glace. On obtient le même effet en plaçant les serpents sur des surfaces très lisses, en plastique par exemple. Les serpents sont alors incapables d'avancer, à moins de soulever leur corps en ondulant ou d'adopter un autre type de mouvement.

Répartir son poids pour aller plus vite

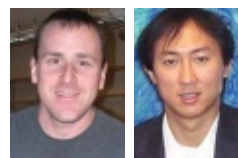
L'agencement des écailles ventrales suffit-il à expliquer la vitesse du serpent qui ondule? Pour le savoir, nous avons modélisé le déplacement d'un serpent virtuel auquel nous avons donné les propriétés des écailles du serpent; en d'autres termes, outre les caractéristiques du mouvement par ondulation (fréquence, longueur d'onde et amplitude), le serpent virtuel présentait les coefficients de frottement du ventre déterminés expérimentalement. Nous avons par ailleurs supposé que sur toute la longueur du serpent, son poids s'appliquait uniformément sur le sol. Le modèle calcule l'intensité et la direction des forces de frottement s'exerçant sur le ventre du serpent (voir la figure 3). Seules celles orientées dans le sens de déplacement du serpent contribuent à sa propulsion; les autres indiquent les directions dans lesquelles se dissipe l'énergie perdue. Après avoir additionné toutes les forces de frottement, nous avons constaté que la vitesse de notre serpent virtuel n'était égale qu'à la moitié de celle du serpent observé en laboratoire (huit centimètres par seconde, ou 0,2 fois la longueur du serpent par seconde): notre modèle mathématique ne reproduisait que partiellement le mouvement du serpent.

Par ailleurs, des chercheurs ont observé que des serpents modifient la répartition de leur poids en soulevant les sommets de l'ondulation de leur corps, faisant porter leur poids sur les zones restant en contact avec le sol. Ce soulèvement est particulièrement visible lors du déplacement par déroulement latéral, au cours duquel le serpent se déplace latéralement et laisse une série de traces obliques dans le sable et non

une trace ondulante continue. Sur des surfaces réfléchissantes et de la gélatine photo-élastique (qui transmet la lumière lorsqu'elle est comprimée), nous avons vérifié que les serpents sont aussi capables de soulever leur ventre tout en ondulant vers l'avant (voir la figure 4).

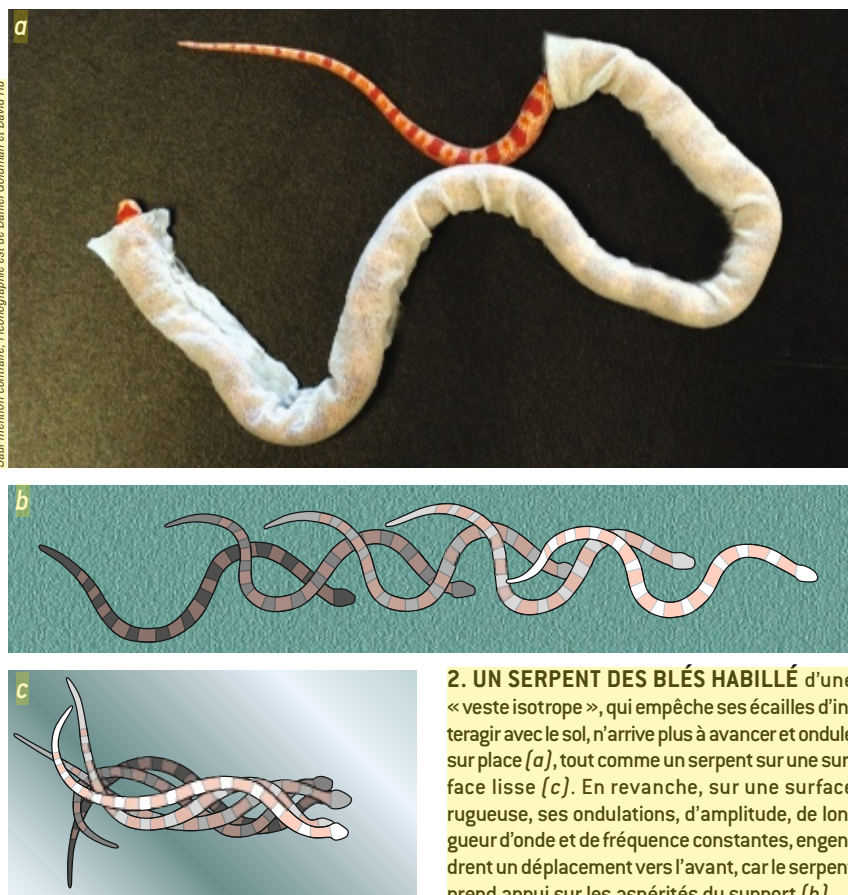
En injectant cette nouvelle donnée dans notre modèle, nous avons observé qu'un tel équilibre dynamique de la charge entraîne une augmentation de la vitesse de 35 pour cent et de l'efficacité de 50 pour cent. Pourquoi un tel avantage? Parce que les zones que le serpent soulève présentent des forces de frottement perpendiculaires à sa direction de déplacement, c'est-à-dire qui ne participent pas à sa propulsion. Le frottement étant proportionnel au poids appliqué, le serpent engendre davantage de poussée s'il soulève son corps dans ces régions et augmente son poids ailleurs. La reptation par ondulation partage ainsi certaines caractéristiques avec la marche humaine. Quand nous marchons, nous transférons du poids de notre pied arrière sur le pied avant en soulevant le pied arrière au lieu de le traîner. De même,

LES AUTEURS

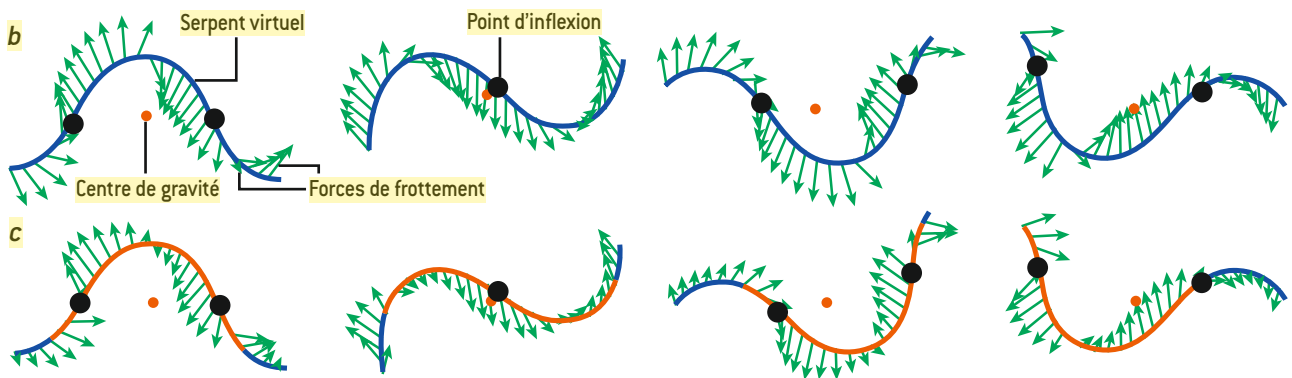


Daniel GOLDMAN est maître de conférences à l'École de physique de l'Institut de technologie de Géorgie, à Atlanta aux États-Unis. David HU est maître de conférences de génie mécanique et de biologie dans le même institut.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.



2. UN SERPENT DES BLÉS HABILLÉ d'une « veste isotrope », qui empêche ses écailles d'interagir avec le sol, n'arrive plus à avancer et ondule sur place (a), tout comme un serpent sur une surface lisse (c). En revanche, sur une surface rugueuse, ses ondulations, d'amplitude, de longueur d'onde et de fréquence constantes, engendrent un déplacement vers l'avant, car le serpent prend appui sur les aspérités du support (b).



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-