

Onduler pour avancer

Pour se déplacer, les serpents et d'autres animaux se tortillent.
Leurs ondulations se ressemblent, mais sont en fait régies
par des mécanismes très différents suivant le support.

Daniel Goldman et David Hu

Se déplacer... pour vivre et survivre! Les anguilles nagent, les faucons montent en flèche dans le ciel, les taupes creusent des tunnels et les écureuils sautent pour fouiller le sol, se reproduire ou échapper aux prédateurs. Ces prouesses de locomotion nécessitent une coordination de processus biophysiques complexes, qui interviennent à l'échelle moléculaire (des molécules contrôlent la propagation des informations dans les neurones), à l'échelle intermédiaire (muscles et tendons se couplent avec des éléments du squelette pour entraîner le mouvement de différentes parties du corps) et à grande échelle (certaines parties du corps, comme les pieds et

les mains, interagissent avec leur environnement pour que l'on avance). L'un des objectifs de la science de la locomotion est de découvrir des principes généraux du déplacement grâce au développement de modèles multi-échelles – un défi qui nécessite la collaboration de biologistes, de physiciens, de mathématiciens et d'ingénieurs. Ces études inspirent la conception de véhicules dont la mobilité égale, voire dépasse, celle des animaux.

De nombreux animaux se déplacent sans utiliser leurs membres. Certains lézards, par exemple, tortillent leur corps sans l'aide des pattes pour se frayer un chemin à travers les herbes hautes et denses

ou dans des environnements sablonneux. Des milliers d'espèces de serpents, limaces et vers (et quelques lézards) sont dépourvues de membres. Leur corps allongé et flexible leur permet de se faufiler dans d'étroites fissures et de parcourir de longues distances dans des milieux complexes et souvent tortueux, tels que les cimes des arbres, le sous-sol ou le tube digestif d'autres organismes.

Nos récents travaux et nos modèles de locomotion terrestre sans membres ont permis d'élucider les mécanismes qui rendent la locomotion par ondulation efficace dans deux environnements : sur le sol, où glissent les serpents, et dans des milieux



plus ou moins fluides, tel le sable où «nagent» les poissons des sables (*Scincus scincus*), petits lézards du désert africain. Les mouvements de ces reptiles peuvent sembler similaires. Pourtant, nous verrons qu'ils se propulsent grâce à des interactions propres à leurs environnements respectifs.

S'appuyer sur les aspérités

Des serpents filiformes de quelques centimètres aux anacondas de dix mètres de long, les reptiles dépourvus de pattes ont tous un corps fondé sur le même principe : un tube flexible de chair recouvert d'écailles durcies. Cette forme leur confère une grande souplesse : ils peuvent glisser à la verticale le long de troncs d'arbres, passer de la terre ferme à l'eau sans changer de mode de locomotion, se déplacer sur terre, tel le mamba noir de deux mètres

de long, sans dépenser plus d'énergie qu'un organisme à pattes de même poids, filer presque aussi vite qu'un homme peut courir (à cinq mètres par seconde).

Avec Michael Shelley, de l'Université de New York, l'un de nous (D. Hu) s'est consacré en 2009 à l'étude de la locomotion des jeunes serpents de lait et serpents des blés, en raison de leur capacité à glisser dans des habitats terrestres tels que des prairies et des pentes caillouteuses. Comme tous les serpents, ils se déplacent de plusieurs façons (voir page 68). Nous avons étudié la plus commune, la reptation par ondulation : les serpents glissent en appuyant leurs flancs contre des pierres et des branches. Nos premières expériences ont donc consisté à faire glisser des serpents sur un panneau muni de chevilles. Sur ce dispositif, un serpent avance, car les forces musculaires qu'il exerce sur les chevilles environnantes sont supérieures à la force de

L'ESSENTIEL

✓ La locomotion par ondulation permet à de nombreux animaux de se déplacer vite dans des environnements variés.

✓ Comprendre la physique de ces mouvements peut aider à concevoir des robots rampants aussi performants, voire plus.

✓ En combinant expériences et modélisation, des biophysiciens ont montré que des serpents sur le sol et des lézards dans du sable ondulent selon des mécanismes différents.

© Shutterstock/Eric Issele

1. LE SERPENT DES BLÉS

[*Elaphe guttata* ou *Pantherophis guttatus*], qui vit en Amérique et dans les Antilles, se déplace généralement en ondulant. De quelques dizaines de centimètres dans sa jeunesse, il mesure plus d'un mètre à l'âge adulte.



Qu'ils aient lieu dans un liquide, dans du sable ou sur le sol, les mouvements d'ondulation peuvent être modélisés à l'aide d'une même approche : la technique de la force de résistance, développée pour modéliser la locomotion de petits organismes dans des liquides. Considérons une petite « tranche » d'un reptile ondulant. Les forces musculaires agissant sur le segment, associées à l'inertie du corps, engendrent une réaction de son support : l'animal subit, de la part de son environnement, des forces

de réaction égales à celles qu'il a produites et de sens opposé. Il avance lorsque ses mouvements sont tels que la somme de toutes les forces de réaction s'exerçant sur son corps propulse son centre de gravité vers l'avant.

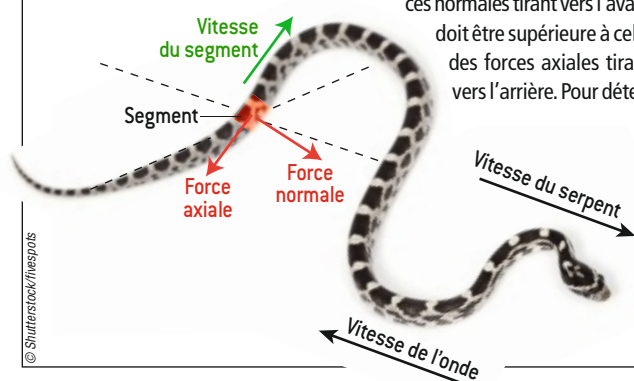
Pour simplifier, on supposera que les animaux ondulent dans un plan. La force agissant sur le segment se décompose alors en deux parties, l'une tangente (force axiale) et l'autre perpendiculaire (force normale) à la surface du segment (voir la figure). Pour que l'animal se déplace, la somme des forces normales tirant vers l'avant doit être supérieure à celle des forces axiales tirant vers l'arrière. Pour déter-

miner si tel est le cas, on calcule les forces de réaction qu'exerce l'environnement sur l'animal. C'est là que réside toute la difficulté.

Dans un environnement liquide tel que ceux où évoluent les spermatozoïdes, les nématodes ou les serpents de mer, on utilise l'équation de la dynamique des fluides, dite de Navier-Stokes. Cette équation applique la deuxième loi du mouvement de Newton au mouvement d'un fluide, en tenant compte de sa pression et de sa viscosité. Connaissant la vitesse d'écoulement du fluide, sa viscosité et sa pression, on peut en déduire les forces s'exerçant sur les corps qui nagent et qui volent. En pratique, on utilise des modèles approximatifs (comme la loi de Stokes pour les perturbations dominées par les effets de viscosité), car dans la plupart des cas, il est impossible de trouver les solutions exactes de cette équation.

Hormis les surfaces sèches et solides, les environnements pour

la locomotion terrestre sont en général plus compliqués à modéliser, car les lois régissant la dynamique de nombreux matériaux tels que la boue ou le sable nous sont inconnues. Sur une surface sèche et rigide, la force de résistance est indépendante de la vitesse, proportionnelle à la force normale appliquée et de sens opposé à celui du déplacement. Un matériau sec et granulaire tel que le sable, en revanche, se comportera comme un solide ou comme un liquide, selon les contraintes et la compacité du matériau, voire changera de comportement si une perturbation modifie sa compacité. Une caractéristique, cependant, facilite la résolution des équations : l'inertie de l'organisme et celle de l'environnement sont négligeables devant les forces de frottement, de sorte que, contrairement au serpent dans l'eau, un animal qui veut s'arrêter dans un milieu granulaire n'a qu'à arrêter d'onduler.



frottement qui s'exerce sur son ventre (voir l'encadré ci-dessus). Mais les serpents glissent aussi avec aisance sur un terrain presque sans aspérités, comme le sable ou une roche nue, qui ne fournissent pas de points d'appui évidents. Comment font-ils ? Pour le comprendre, nous avons étudié plus précisément les frottements des serpents sur le sol.

Le frottement est une force qui résiste au glissement d'un objet sur un autre, comme la semelle d'une chaussure sur le sol. La force résulte du fait qu'aucune surface n'est parfaitement lisse. Toutes les surfaces sont couvertes de minuscules aspérités qui s'accrochent et se déforment lorsque deux surfaces sont pressées l'une contre l'autre et glissent. Cette résistance au glissement est décrite par un coefficient de frottement, rapport de la force de frottement résultante entre deux surfaces et de la force de compression appliquée. Pour glisser, un serpent doit ainsi appliquer une force supérieure au produit de son poids et du coefficient de frottement.

Si le dos des serpents est couvert d'écailles en forme de losange, celles de

Quatre types de reptation

- ✓ La reptation par ondulation, courante chez les petits serpents : le serpent glisse sur le sol en propageant une ondulation dans son corps.
- ✓ La reptation rectiligne, fréquente chez les serpents lourds : des ondes musculaires tirent vers l'avant le corps, qui reste à peu près droit dans l'axe du déplacement, tandis que la peau est ancrée au sol par endroits.
- ✓ La reptation en accordéon, utilisée par de nombreux serpents : le reptile, ondulé en forme de S, avance la partie antérieure de son corps, puis la partie postérieure, en les soulevant successivement.
- ✓ La reptation par « déroulement » latéral des serpents des sables : l'animal, ondulé en forme de S, projette latéralement sa partie antérieure, puis ramène sa queue. Il effectue ainsi une série de sauts obliques, et peut être très rapide.

leur ventre se chevauchent comme les bardeaux d'un toit et s'accrochent au sol lorsque le serpent est traîné latéralement ou par la queue. Cette orientation confère une propriété utile : sur certains supports, les écailles ventrales glissent préférentiellement dans une direction donnée. En endormant des serpents pendant quelques minutes et en les disposant sur des plans inclinés, nous avons mesuré le coefficient de frottement d'un serpent en fonction de son orientation. Les mesures ont été réalisées sur un tissu dont l'échelle de longueur caractéristique de la rugosité (0,2 millimètre) était comparable à l'épaisseur des écailles ventrales du serpent (0,1 millimètre), afin que les écailles puissent s'accrocher au tissu. Pour des serpents de lait, le coefficient de frottement est minimal si le serpent glisse vers l'avant (0,10), moyen s'il glisse vers l'arrière (0,14) et maximal s'il glisse sur le côté (0,20). Sans cette anisotropie du frottement, le serpent serait incapable d'avancer sur un sol plat.

Pour le prouver, il suffit d'habiller le reptile d'une « veste isotrope » – en l'occu-