

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.

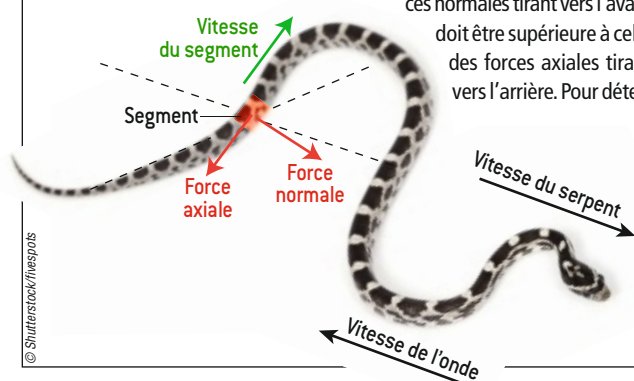
Pour simplifier, on supposera que les animaux ondulent dans un plan. La force agissant sur le segment se décompose alors en deux parties, l'une tangente (force axiale) et l'autre perpendiculaire (force normale) à la surface du segment (voir la figure). Pour que l'animal se déplace, la somme des forces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

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

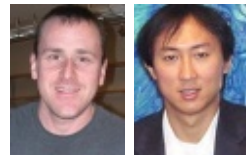
L'agencement des écailles ventrales suffit-il à expliquer la vitesse du serpent qui ondule ? Pour le savoir, nous avons modélisé le déplacement d'un serpent virtuel auquel nous avons donné les propriétés des écailles du serpent ; en d'autres termes, outre les caractéristiques du mouvement par ondulation (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,

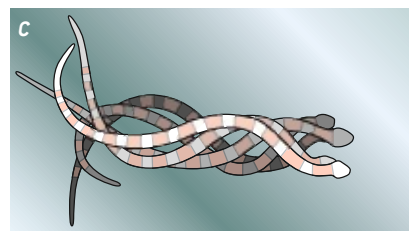
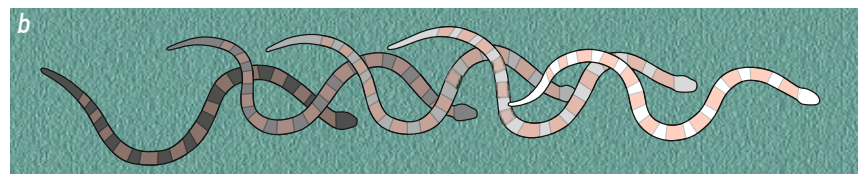
LES AUTEURS



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).