

L'EXOSPHERE : UN STROBOSCOPE AU RALENTI

Mercure n'a pas d'atmosphère au sens classique, mais une « exosphère », une atmosphère tellement ténue que les atomes entrent rarement en collision les uns avec les autres. Leurs mouvements dépendent seulement des interactions avec la magnétosphère et avec la surface.

Outre de l'hydrogène et de l'hélium, les observations spectroscopiques depuis la Terre ont révélé les raies d'émission du sodium, du potassium et du calcium excités par la lumière solaire. Lors de ses survols, MESSENGER a détecté du magnésium et des ions calcium.

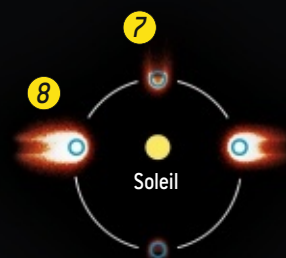
Ces éléments ayant une durée de vie d'au plus quelques jours dans l'exosphère, ils sont continuellement renouvelés.

L'hydrogène et l'hélium seraient principalement libérés par la capture des ions du vent solaire à la surface. Le rayonnement solaire altère les minéraux et fait s'évaporer les éléments les plus légers comme le sodium. Enfin, le bombardement continu de micrométéorites pulvérise des poussières dans l'exosphère. La photoaltération est relativement peu énergétique, si bien que les atomes éjectés retombent en général à la surface **4**. Le vent solaire et le bombardement de micrométéorites sont plus violents, et les atomes qu'ils arrachent restent plus longtemps dans l'exosphère **5**.

Certains éléments, en particulier le sodium, sont même arrachés à l'exosphère par la pression du rayonnement

solaire, formant ainsi une queue semblable à celle d'une comète **6**, longue de plus de deux millions de kilomètres.

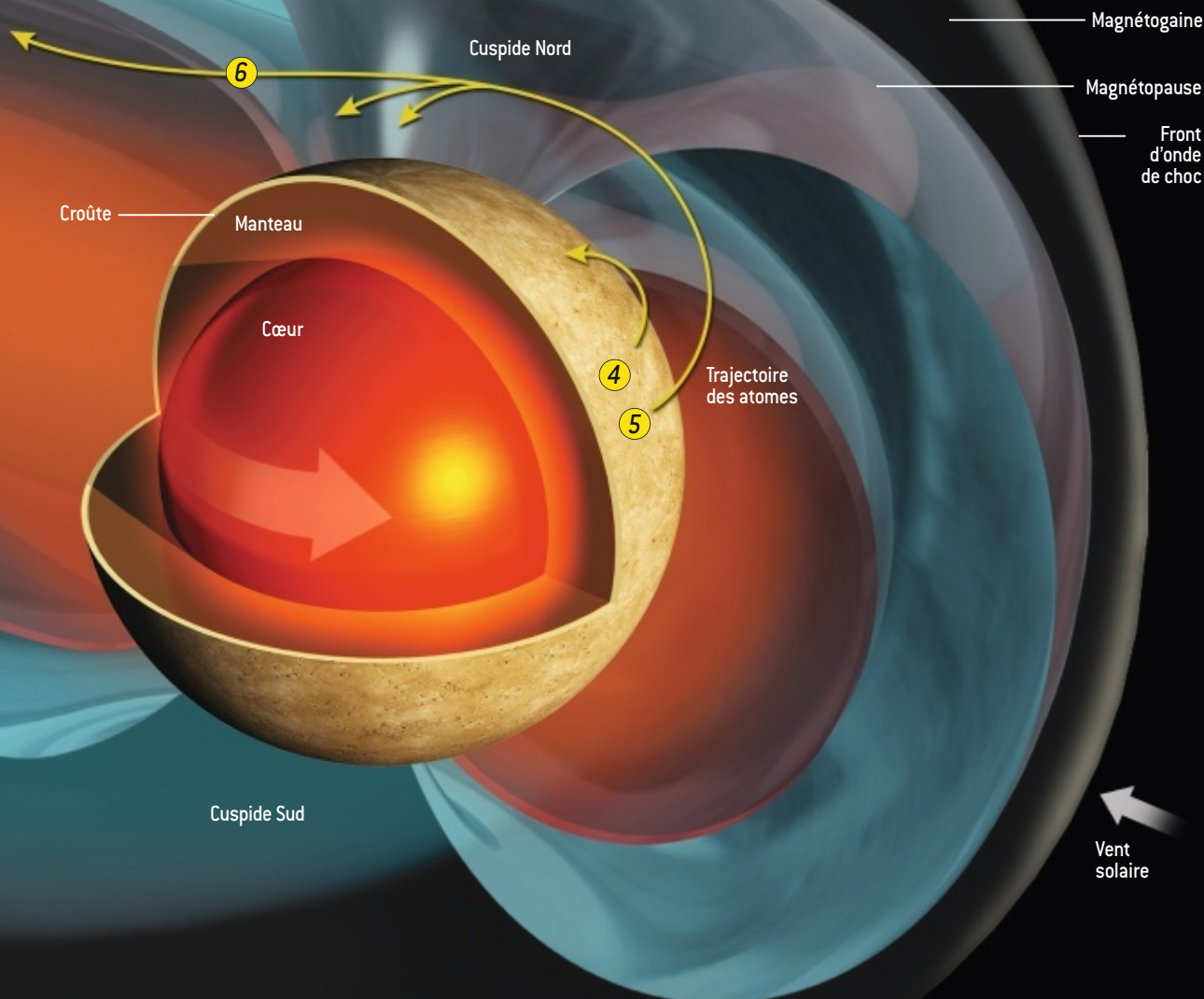
L'exosphère et la queue de Mercure ont la particularité de s'illuminer deux fois par orbite. Il a été proposé que cela résulte de l'excitation par le rayonnement solaire des atomes de l'exosphère. Cependant les longueurs d'onde concernées sont aussi en partie absorbées dans les couches externes du Soleil. Mais comme l'orbite de Mercure est très elliptique, la planète accélère vers le Soleil ou s'en éloigne durant son orbite, de sorte que le spectre de la lumière solaire est décalé par effet Doppler. Un excès de rayonnement aux longueurs d'onde adéquates atteint alors l'exosphère et la fait briller.



Ronald J. Vervack, Jr.

Ainsi, quand Mercure est au plus près ou au plus loin du Soleil, l'exosphère est à peine visible **7**. Aux positions intermédiaires de son orbite, elle est brillante **8**.

Au cours de l'année à venir, MESSENGER va suivre ces variations de l'exosphère. Mais nous savons d'ores et déjà que Mercure nous réserve des phénomènes inattendus.



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.

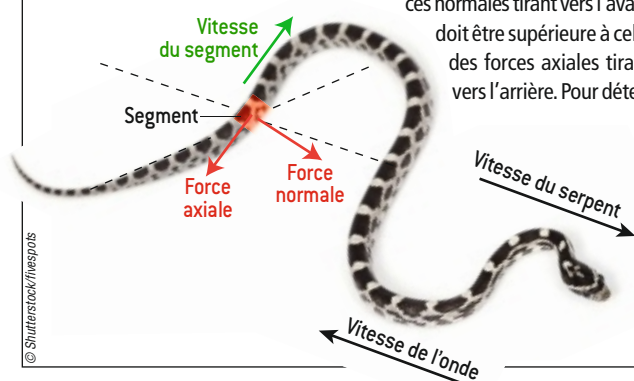
Pour simplifier, on supposera que les animaux ondulent dans un plan. La force agissant sur le segment se décompose alors en deux parties, l'une tangente (force axiale) et l'autre perpendiculaire (force normale) à la surface du segment (voir la figure). Pour que l'animal se déplace, la somme des forces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

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

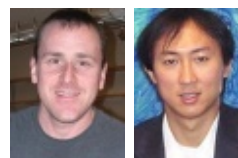
L'agencement des écailles ventrales suffit-il à expliquer la vitesse du serpent qui ondule ? Pour le savoir, nous avons modélisé le déplacement d'un serpent virtuel auquel nous avons donné les propriétés des écailles du serpent ; en d'autres termes, outre les caractéristiques du mouvement par ondulation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

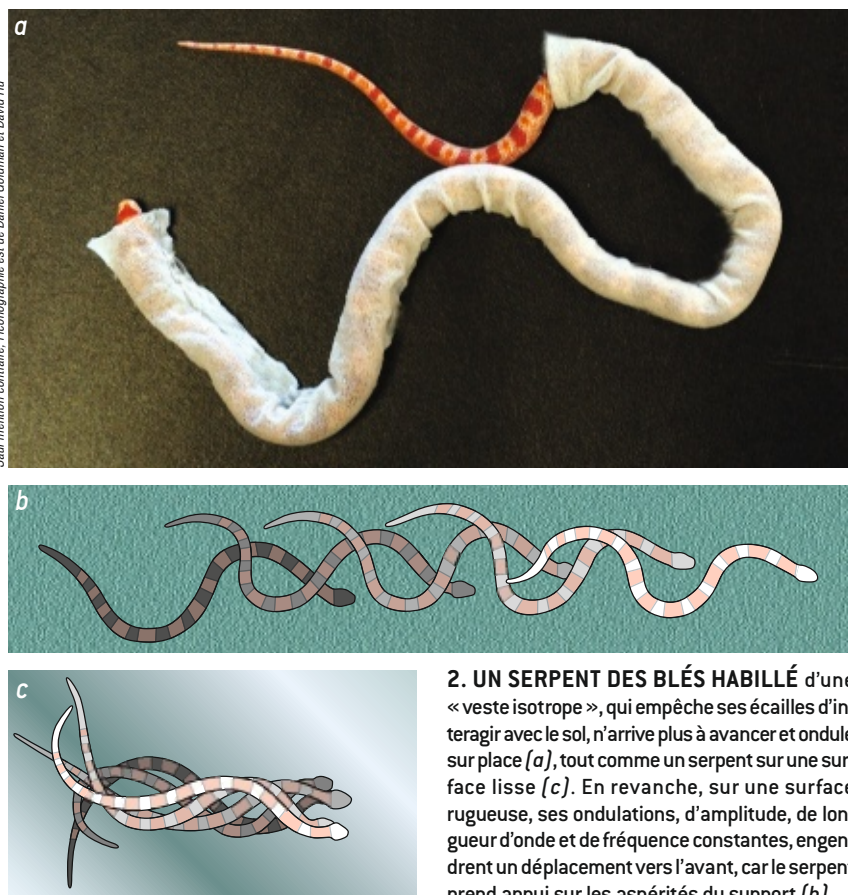
En injectant cette nouvelle donnée dans notre modèle, nous avons observé qu'un tel équilibre dynamique de la charge entraîne une augmentation de la vitesse de 35 pour cent et de l'efficacité de 50 pour cent. Pourquoi un tel avantage ? Parce que les zones que le serpent soulève présentent des forces de 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

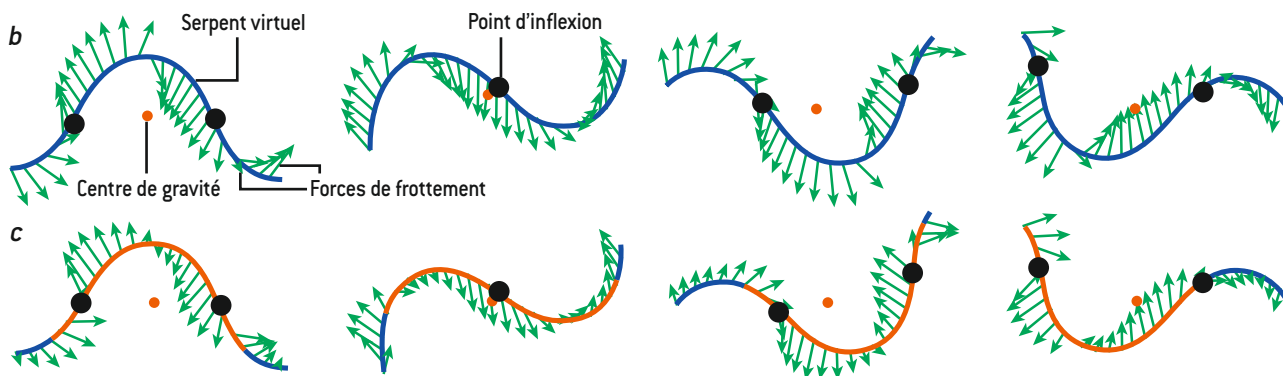


Daniel GOLDMAN est maître de conférences à l'École de physique de l'Institut de technologie de Géorgie, à Atlanta aux États-Unis. David HU est maître de conférences de génie mécanique et de biologie dans le même institut.

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-

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

Rendez-vous
sur le site de Pour la Science
www.pourlascience.fr

L'actualité scientifique internationale,
en quelques clics :

- » Des actualités quotidiennes et d'autres contenus en accès libre
- » Tous les articles et numéros depuis 2004 en PDF
- » L'accès libre à tous les numéros compris dans votre abonnement
- » Tous les ouvrages Belin-Pour la Science
- » Votre compte abonné



À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

POUR LA
SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique

effet sur la vitesse pour une fréquence donnée de l'onde. De plus, les mouvements de l'animal étaient les mêmes dans les milieux de faible et de forte compacité. Plus étrange encore, en moyenne, le poisson des sables nageait plus vite dans le matériau très tassé que dans celui de faible compacité. Comment ? En augmentant sa fréquence d'ondulation.

De fait, la locomotion du poisson des sables est particulièrement efficace. L'efficacité de son onde en milieu granulaire (le rapport de sa vitesse moyenne de nage et de la vitesse de l'onde) est de 0,5, soit plus du double de celle des vers nématodes dans des liquides (environ 0,2) et supérieure à celle des serpents sur une surface rugueuse (environ 0,3). L'efficacité maximale, 1, correspond à un animal qui avance sans glissement dans un milieu statique, et l'efficacité minimale, 0, à un animal cherchant à se déplacer dans le vide.

Pour comprendre ce phénomène, un de nos doctorants, Yang Ding, a modélisé le mouvement du poisson des sables à l'aide de la technique de la force de résistance (voir l'encadré page 68). Cette approche nous semblait applicable, car, d'une part, l'étude aux rayons X a indiqué que le matériau s'écoule au voisinage de l'animal et, d'autre part, les perturbations des

différentes régions du sable n'influent pas les unes sur les autres, de sorte que les forces agissant sur des « tranches » du corps s'ajoutent de façon linéaire.

La modélisation du poisson des sables

Comme avec les serpents, la première étape de la modélisation consiste à décrire les forces de frottement qui s'exercent sur le reptile. À défaut de connaître les lois de la dynamique des milieux granulaires, Y. Ding et Chen Li, un autre doctorant du groupe, ont établi des lois empiriques en mesurant les composantes de la traînée sur un cylindre en acier inoxydable tiré dans le sable sous différents angles par rapport à la direction de déplacement (voir l'encadré ci-dessous). Ils ont observé que la composante perpendiculaire à l'axe du cylindre était accrue par rapport à celle qu'aurait subie le cylindre dans un fluide réel ou sur le sol. L'efficacité de l'onde du poisson des sables était-elle due à l'accroissement de cette composante ?

Oui, a répondu le modèle mathématique dans lequel ces lois empiriques avaient été injectées : le modèle retrouve bien que la vitesse augmente de façon linéaire avec la fréquence. En outre, l'efficacité de l'onde

qu'il prédit est comprise entre 0,4 et 0,7 (il faudrait tenir compte de la forme de la tête pour affiner ce résultat) et est bien indépendante de la compacité. Le modèle a donc montré que l'animal peut « nager » sous le sable sans utiliser ses membres. De plus, il donne une explication plausible de l'indépendance de l'efficacité de l'onde par rapport à la compacité : lorsque la force de résistance augmente dans un matériau très tassé, il en va de même pour les forces de poussée qui peuvent être engendrées.

Notre modèle prédit aussi avec quelle amplitude le poisson des sables doit onduler pour atteindre une vitesse maximale en milieu granulaire : pour accélérer, le reptile augmente l'amplitude de son onde tout en maintenant à peu près constant le nombre d'ondulations par seconde. L'animal ayant une longueur finie, au-delà d'une certaine amplitude d'ondulation, il avance moins loin à chaque ondulation. Notre modèle a trouvé pour cette amplitude limite une valeur d'environ un cinquième de la longueur d'onde. Dans notre dispositif expérimental, l'amplitude d'ondulation des lézards testés se concentrait autour de cette valeur : nos animaux fuyaient donc probablement le plus vite possible dans le sable.

La concordance des données expérimentales avec notre modèle est encourageante,

DÉCRIRE LE COMPORTEMENT DU SABLE

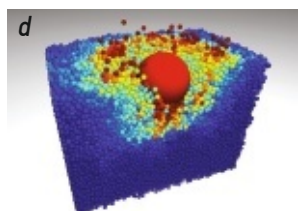
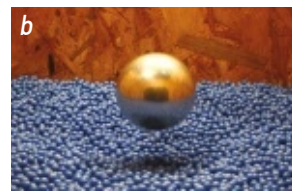
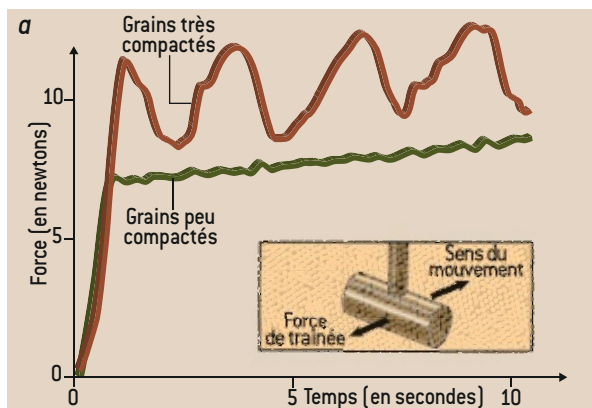
Les lois physiques qui régissent les interactions avec les milieux granulaires peuvent être très complexes. En voici deux exemples. Dans le premier (a), un même milieu réagit différemment à une perturbation selon sa compacité : la force de traînée (force de frottement qui s'oppose au mouvement) qui s'exerce sur une courte tige (deux

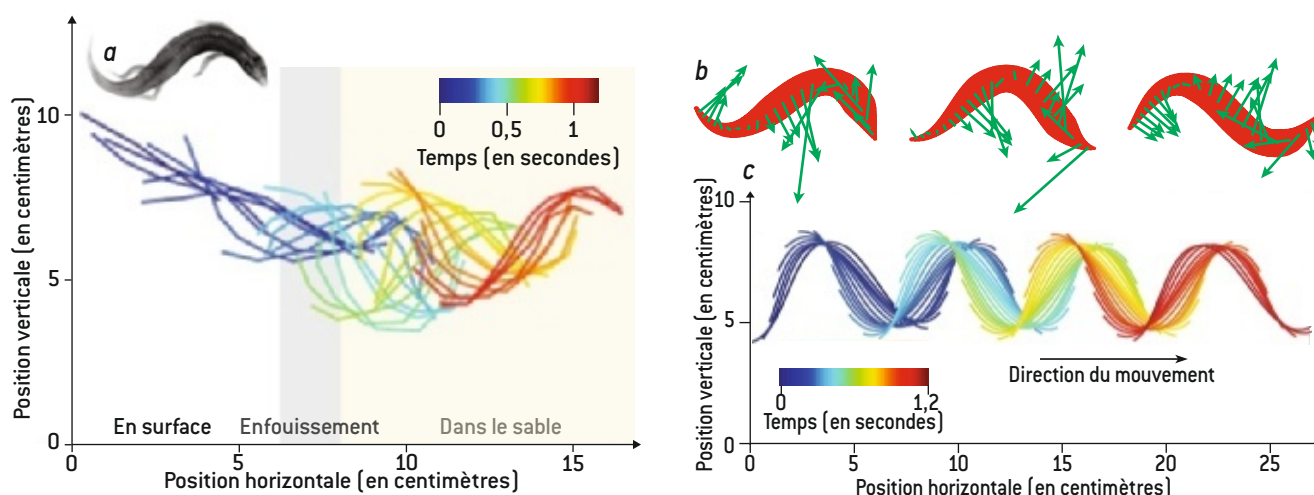
centimètres de long) tirée à une vitesse d'un centimètre par seconde n'est pas la même dans un milieu de perles de verre de 0,3 millimètre faiblement (en vert) ou fortement (en marron) compactées. Avec des particules peu tassées, la force est constante, après une augmentation initiale transitoire, quand le matériau s'écoule autour de la tige.

Dans le matériau très compacté, la force présente de grandes oscillations, car le matériau devant la tige cède périodiquement, tandis qu'un bloc de matériau solidifié est poussé vers la surface.

Dans le second exemple, un récipient rempli de grains (des sphères en plastique de six millimètres) reste solide jusqu'à ce qu'une boule

d'aluminium de cinq centimètres de diamètre (b) frappe la surface (c). Le milieu granulaire devient alors fluide autour de la boule. Une fois que la boule s'immobilise, les grains forment à nouveau un solide. Une technique de simulation appelée dynamique moléculaire permet de visualiser les forces et les vitesses appliquées aux grains (d). Les particules bleu foncé se déplacent lentement et se comportent presque comme un solide, alors que les particules plus rouges, autour de l'objet ayant produit l'impact, se déplacent plus vite.





6. LES MOUVEMENTS DU DOS D'UN POISSON DES SABLES filmé à l'aide d'une caméra rapide à rayons X (a) et de son homologue virtuel (b-d). Après un déplacement très rapide en surface, le reptile s'enfouit tout aussi vite, puis commence à onduler sous le sable en ralentissant (a). Le mouvement d'un lézard simulé dans un bac contenant environ 150 000 perles de verre de trois millimètres de diamètre ressemble à celui d'un animal réel (c). Les forces de frottement (b, en vert) sont principalement perpendiculaires à l'axe du corps : ce sont elles qui propulsent le reptile. Le milieu est quant à lui solide (d, en bleu foncé), sauf dans une petite zone autour du lézard (particules plus rouges).

et la prédiction d'une nage optimale tentante. Toutefois, ne concluons pas trop vite. L'approche choisie présente quelques inconvénients. D'une part, changer les paramètres du modèle, tels que la taille des grains de sable, nécessite à chaque fois de nouvelles mesures empiriques. D'autre part, rien ne prouve que nos hypothèses (comme celle selon laquelle les différents segments du lézard n'influencent pas les uns sur les autres) sont judicieuses, de sorte que la concordance n'est peut-être que fortuite.

Des reptiles virtuels aux robots

Nous avons donc adopté une autre approche utilisant les techniques de dynamique moléculaire décrites plus haut. Après avoir montré que ce modèle présentait une bonne capacité prédictive du comportement du sable pour tout un éventail de conditions expérimentales, nous avons créé un poisson des sables virtuel qui combinait les caractéristiques de déplacement expérimentales et les forces de frottement calculées dans le modèle de dynamique moléculaire.

Nous avons trouvé une bonne concordance avec l'efficacité de l'onde expérimentale et celle prédite dans notre premier modèle : la dynamique moléculaire confirme l'existence d'une nage optimale du poisson des sables. De plus, elle donne accès à des

informations à l'échelle de la particule : nous avons visualisé l'écoulement des particules autour du poisson des sables et estimé la force s'exerçant sur différents éléments. Des travaux complémentaires avec ce modèle nous permettront d'étudier en détail les lois physiques qui déterminent la poussée et la traînée pour lesquelles l'efficacité de l'onde et la compacité deviennent indépendantes.

Test ultime, nous avons conçu, à l'aide des données de la dynamique moléculaire, un modèle physique du poisson des sables, un robot qui nage dans un matériau granulaire. Ce robot est une chaîne de sept segments de cinq centimètres de long, chacun contenant un servomoteur dont l'oscillation est ajustée pour que l'ensemble se déplace en ondulant. Nous avons aussi augmenté la taille des particules granulaires à six millimètres, pour éviter qu'elles pénètrent dans les moteurs et simplifier la modélisation (le poisson des sables se déplace par ailleurs avec la même efficacité d'onde dans des particules plus grosses, et les simulations obtiennent aussi le même résultat). Nous avons obtenu un bon accord entre l'expérience avec le robot et sa simulation. Lui aussi présente une efficacité optimale de l'onde, tant dans la simulation que dans l'expérience, mais de 0,3 et non 0,5 comme le poisson des sables. Ce résultat est probablement dû au nombre fini de segments du robot : dans la simulation, quand on aug-

mente le nombre de segments de façon à ce que le corps soit presque lisse, l'efficacité optimale de l'onde avoisine 0,5.

Nous avons étudié deux environnements distincts où la locomotion par ondulation est efficace. Chez les serpents se déplaçant sur le sol, un frottement anisotrope du ventre engendre une poussée qui surpasse la traînée, alors que dans le sable, l'animal engendre une poussée en exploitant avec ses flancs les frottements de type liquide des milieux granulaires. Bien que les lois de traînée soient différentes dans ces deux régimes, les techniques de modélisation de la force de résistance, issues de l'hydrodynamique, s'appliquent avec succès dans les deux cas.

Ces travaux soulèvent plusieurs questions : d'abord, nous n'avons exploré les mouvements que dans deux dimensions. Qu'apporte la troisième ? Ensuite, que se passe-t-il si la forme de l'animal ou de l'onde change ? Quelles sont les limites métaboliques et musculaires des animaux étudiés ? Que se passe-t-il dans un matériau mouillé ? Avec des modèles améliorés des environnements et des organismes, ainsi que de leurs interactions, notre approche aiderait à trouver des conceptions de dispositifs robotiques sans membres, capables de se déplacer sur un terrain complexe plus vite et plus efficacement que leurs homologues naturels. ■

Des livres à offrir ou à s'offrir à découvrir et à commander sur www.pourlascience.fr



À contre-idées • Didier Nordon

Trouver du comique dans une idée sérieuse (et inversement), du local dans une idée générale (et inversement), de l'absurde dans une idée sensée (et inversement), de l'esprit littéraire au sein des sciences (et inversement). Au fil de ses billets d'humeur, Didier Nordon s'ingénie à bousculer les idées reçues et tout ce qui semble évident et... qui ne l'est pas. Un livre décapant, pour jouer avec les mots... et les idées.

224 pages • 19 euros • 075110

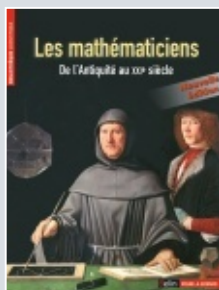


Au nom de l'infini • Jean-Michel Kantor, Loren Graham

Peut-on parler de mathématiques, de religion, de politique dans un même ouvrage ? Oui, et c'est le défi qu'ont relevé le mathématicien Jean-Michel Kantor et l'historien des sciences Loren Graham, du MIT.

Ce livre touchera même ceux que les mathématiques laissent indifférents, voire effraient. Les auteurs éclairent les liens étroits entre la vie – avec ses plaisirs et ses drames – et l'œuvre de ces hommes et ces femmes qui ont marqué le XX^e siècle par leur créativité en mathématiques.

288 pages • 24 euros • 075107



Les mathématiciens • Collectif

Autant artistes que scientifiques, les mathématiciens sont en proie à leurs passions, leurs interrogations, leurs doutes, leurs tourments, leurs angoisses, et la hantise de la beauté. « Nul ne peut être mathématicien s'il n'a une âme de poète », disait Sophie Kowalevskaja. Les mathématiciens doivent faire preuve de rigueur et de ténacité, mais surtout d'inventivité. Maudissant chaque jour leur impuissance à faire reculer les frontières du savoir, ils s'émerveillent pourtant, regardant derrière eux, de l'ampleur du chemin parcouru.

280 pages • 24 euros • 075109



La physique buissonnière • Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique et curieux de sciences, les auteurs vous invitent à une promenade sur ces chemins de traverse. Avec eux, laissez-vous surprendre par un phénomène que vous avez déjà côtoyé sans même le remarquer. Suivez-les pour découvrir et comprendre cette physique du quotidien.

160 pages • 22 euros • 075105

La supraconductivité à l'ère industrielle

Certains matériaux perdent toute résistance électrique au-dessous d'une certaine température. Ce phénomène découvert il y a tout juste 100 ans a des applications méconnues, mais de plus en plus présentes.

Pascal Tixador et Philippe Lebrun

L'ESSENTIEL

- ✓ En ce mois d'avril 2011, la découverte de la supraconductivité a 100 ans.
- ✓ Les applications de la supraconductivité sont limitées par le coût et la complexité de la cryogénie requise.
- ✓ La découverte en 1986 des premiers supraconducteurs à haute température critique a fait croire à une révolution technologique imminente.
- ✓ Cette révolution a pris du retard, mais les applications de la supraconductivité (imagerie médicale, électrotechnique, etc.) se multiplient.

© Shutterstock/Levent Konuk

Dans le monde, plus de 26 000 appareils d'IRM (imagerie par résonance magnétique) fournissent de précieux diagnostics médicaux. L'IRM est maintenant familière au grand public (*voir la figure 1*), mais combien savent qu'une bobine supraconductrice fonctionnant à -269°C , près du zéro absolu (0 kelvin ou $-273,15^{\circ}\text{C}$), est à la base de ce remarquable équipement médical ?

Plus généralement, les applications de la supraconductivité, phénomène extraordinaire découvert il y a 100 ans, restent méconnues, car discrètes. C'est l'occasion de passer en revue quelques-unes des utilisations les plus importantes des matériaux supraconducteurs : imagerie médicale, puissants aimants pour la physique des particules, détection et mesure de champs magnétiques infimes, transport de l'électricité, conception de circuits quantiques.

Mais commençons par rappeler ce qu'est la supraconductivité, comment elle a été découverte et quelles sont les principales propriétés des matériaux supraconducteurs. Cela nous permettra de comprendre les difficultés qui ont can-

tonné la supraconductivité à des niches particulières.

L'histoire commence dans une petite ville universitaire des Pays-Bas, Leyde, qui devint le 10 juillet 1908 l'endroit le plus froid au monde. Heike Kammerlingh Onnes (1853-1926) y avait réussi, le premier, à liquéfier de l'hélium, donc à atteindre la température record de 4,2 kelvins (-269°C). La liquéfaction de ce gaz découvert en 1895 faisait l'objet d'une compétition internationale : c'était le dernier des « gaz non condensables » qui résistait à la liquéfaction, après celle de l'hydrogène en 1898.

En ayant accès à l'hélium liquide, Kammerlingh Onnes pouvait étudier la résistivité des métaux aux très basses températures. Or le 8 avril 1911, Gilles Holst, un étudiant de Kammerlingh Onnes, qui sera l'un des fondateurs du Centre de recherche de Philips et son premier directeur, constata que la résistance électrique du mercure placé dans un capillaire en verre devenait brusquement non mesurable au-dessous de 4,15 kelvins. Après de multiples et méticuleuses vérifications, tant le phénomène paraissait extraordinaire, le mercure