

■ POUR LA SCIENCE

Offre spéciale été !
15 numéros pour 54€ seulement
soit 3 mois de lecture offerts !*



*Offre Valable jusqu'au 25 Août 2006

ABONNEMENT

à retourner accompagné de votre règlement à :
Service Abonnements - Pour La Science
8 rue Férou 75278 Paris Cedex 06

☐ **Oui, Je m'abonne à Pour La Science pour 1 an (12 N°)**
et je reçois en cadeau trois numéros supplémentaires,
pour 54€ seulement ! au lieu de ~~95,65€~~.**

**Prix de vente au numéro

Mes Coordonnées (à remplir) :

Nom, Prénom : _____

Adresse : _____

Code Postal : _____

Ville : _____

Pays : _____

E-mail (facultatif) : _____

Je règle par :

☐ Chèque ci-joint à l'ordre de **Pour La Science**

☐ Carte bancaire

Numéro de la carte

**

Date d'expiration

Signature obligatoire

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-contre sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès de Pour La Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. En cas de refus de votre part, il vous suffit de nous prévenir par simple courrier.

**Inscrire les trois derniers chiffres de la série de 7 figurant au dos de votre carte dans la bande où figure votre signature.

PLS15MOI

Locomotion : une même loi

La course, le vol et la nage correspondent à des mouvements et à des organismes très différents. Pourtant, certaines lois communes, explicables par un principe physique d'optimisation, les caractérisent.

Adrian Bejan • James Marden

Stephen Jay Gould, l'un des grands paléontologues et biologistes de l'évolution du XX^e siècle, affirmait que si l'on pouvait remonter l'horloge de la vie jusqu'à ses débuts et si on laissait l'évolution se dérouler à nouveau sur la même durée, les animaux qui en résulteraient seraient très différents de ceux connus aujourd'hui. Gould soulignait ainsi l'importance du hasard dans la sélection des organismes qui survivent et évoluent. Il avait probablement raison, mais on peut tout de même se demander s'il n'existe pas quelques règles générales et constantes auxquelles se conforment les organismes vivants. Il en est ainsi pour la locomotion des animaux : qu'ils nagent, courent ou volent, il est possible de dégager des lois quantitatives communes aux différents modes de locomotion et indépendantes de l'espèce considérée. Qui plus est, ces lois peuvent s'expliquer sur la base d'une idée unificatrice. C'est ce que nous montrerons dans cet article.

Les principaux modes de locomotion que sont la course, la nage et le vol diffèrent par nombre de caractéristiques. Les animaux qui courent ou qui volent sont soumis à leur

poids, tandis que celui des animaux nageurs est compensé par l'action porteuse de l'eau, c'est-à-dire par la poussée d'Archimède. Les ailes des oiseaux, les pattes des antilopes et les nageoires des poissons ont des structures différentes. Les battements d'ailes des oiseaux ne ressemblent pas aux foulées des animaux coureurs ni aux ondulations du corps d'un poisson. En régime de croisière, les oiseaux et les poissons sont à altitude et profondeur constantes, tandis que le corps des coureurs monte et descend alternativement (leur trajectoire est cycloïdale dans un plan vertical). Le choc sur le sol lors de la course diffère beaucoup du frottement avec l'air et l'eau lors du vol et de la nage. Et pour compliquer les choses, une forme de locomotion donnée correspond à des tailles corporelles, des anatomies et des vitesses très diverses ; le vol, par exemple, concerne des oiseaux aussi bien que des insectes et des mammifères (les chauves-souris).

Malgré toutes ces différences, de nombreux chercheurs ont noté d'intrigantes convergences. On constate que la fréquence de foulée des vertébrés coureurs est, *grosso modo*, proportionnelle à l'inverse de leur masse corporelle M élevée à la puissance $1/6$, c'est-à-dire proportionnelle à $M^{-1/6}$; or la fréquence de nage des poissons est aussi



Patrick Ward/Alamy



Jim Zipp/Photo Researchers, Inc.

proportionnelle à $M^{-1/6}$. De même, la vitesse des animaux coureurs est approximativement proportionnelle à $M^{1/6}$, tout comme celle des oiseaux qui volent. Et la force par unité de masse déployée par les muscles des animaux coureurs, nageurs ou volants reste remarquablement proche de 60 newtons par kilogramme. D'autres corrélations analogues ont été constatées à travers plusieurs groupes zoologiques, par exemple entre la taille du corps et le rythme de respiration, ou entre la taille et les pertes de chaleur par le corps.

Des lois d'échelle à expliquer

Pour tenter d'expliquer de telles lois – des lois dites d'échelle –, approximativement valables pour tout un ensemble d'organismes, les biophysiciens se sont concentrés sur des contraintes éventuellement communes, telles que la vitesse de contraction des muscles ou les efforts maximaux supportables par la structure corporelle. La plupart de leurs analyses étaient fondées sur des relations empiriques, partant des observations pour trouver un modèle qui corresponde aux résultats. Peut-on adopter une démarche différente, qui se fonde sur un principe théorique unique afin de déduire et prédire des grandeurs diverses telles des vitesses maximales de déplacement, des fréquences de foulée ou de battement d'ailes ?

Nos travaux indiquent que oui. À certains égards, les systèmes naturels et les machines conçues par les ingénieurs relèvent d'une même problématique. Qu'il s'agisse d'un animal, d'un bâtiment ou d'une machine, l'un des principaux objectifs du système est d'optimiser ses performances par rapport à l'énergie investie. Des exemples d'une telle optimisation sont la forme cylindrique des tuyaux, la structure arborescente des cours d'eau d'un bassin fluvial (voir la figure 2), la structure arborescente des poumons ou de la circulation sanguine, ou celle des surfaces boueuses qui craquent en séchant.

Toutes ces architectures optimisent le débit des fluides en écoulement, en minimisant la résistance rencontrée. Ainsi, le bassin hydrographique d'un fleuve se modifie au cours du temps de façon que l'eau atteigne l'embouchure en rencontrant de moins en moins de résistance. Ce principe d'optimisation des écoulements peut-il se généraliser et s'appliquer à d'autres systèmes naturels, qu'ils soient inanimés ou vivants ? Telle est l'idée de la théorie dite constructale, proposée dès 1996 par l'un d'entre nous (A. Bejan). Exprimée de façon

1. Avec le vol, la course et la nage, la nature semble avoir développé trois formes très différentes de locomotion. Cependant, en invoquant un principe d'optimisation – selon lequel la masse d'un animal parcourt la plus grande distance possible pour une dépense d'énergie utile donnée –, il est possible de dégager des lois approximatives communes aux trois modes de locomotion, lois qui avaient aussi été établies empiriquement.



Pete Atkinson/NHPA