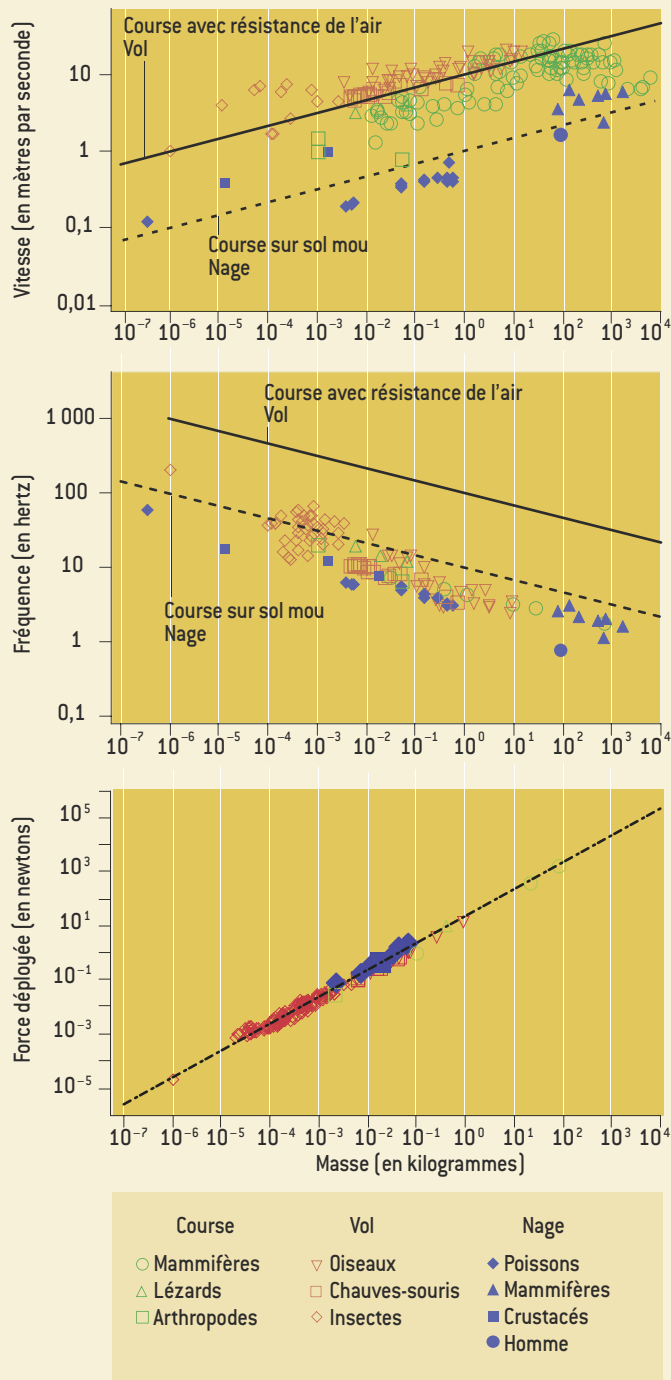


Prévisions et observations

Les données empiriques sur la locomotion des animaux sont en bon accord avec les prévisions théoriques fondées sur l'optimisation de l'énergie dépensée. Les trois graphiques ci-dessous indiquent comment, pour divers animaux et en fonction de leur masse, se comportent la vitesse, la fréquence de battement d'ailes ou de foulée, et la force déployée. Les droites figurant sur ces graphiques à échelle logarithmique représentent les prévisions théoriques et correspondent à une loi d'échelle (la grandeur en ordonnée est égale à une certaine puissance de la masse, multipliée par un coefficient constant; la pente de la droite correspond à l'exposant de la loi d'échelle, et son intersection avec l'axe des ordonnées indique le coefficient).



auraient pour des coureurs soumis principalement aux frottements avec un sol dur ou avec un sol mou déformable.

Une autre surprise nous est venue en calculant le travail fourni pour soulever le corps du sol. Comme dans le cas du vol, nous avons trouvé que la force moyenne exercée au cours du cycle de foulée devrait être égale au double du poids de l'animal. Un résultat en accord avec les mesures force-masse pour toutes les tailles d'animaux, qu'ils volent ou qu'ils courent (*voir l'encadré ci-contre*). Ainsi, notre démarche fondée sur l'optimisation de la dépense d'énergie conduit à la conclusion que la course et le vol obéissent à des relations semblables.

Qu'en est-il de la nage ? S'apparente-t-elle à la course et au vol ? La réponse qui paraît évidente est non, parce que les poissons semblent échapper à la gravité, en raison de la poussée d'Archimède exercée par le liquide environnant. La course n'est pourtant pas radicalement différente de la nage ou du vol. En dépit du fait qu'un oiseau ou un poisson ne touche pas le sol, celui-ci soutient en fin de compte le poids de tous les corps situés au-dessus. Sans lui, aucun mouvement ne serait possible.

Un poisson déplace son corps relativement au fond immobile de l'étendue d'eau. Il effectue un travail pour contrer la gravité et les frottements, exactement comme un oiseau ou une antilope. Pour avancer horizontalement sur une distance égale à la longueur de son corps, un animal immergé doit fournir un travail équivalent à celui qu'il faut pour soulever un volume d'eau de sa propre taille à une hauteur approximativement égale à la dimension de son corps (*voir la figure 5*). Pourquoi cette eau est-elle soulevée et non juste chassée sur les côtés ? Parce qu'un déplacement vertical net est le seul moyen pour l'eau de s'écouler autour d'un animal ou d'un objet évoluant dans une rivière, un lac ou une mer : l'eau étant incompressible et le fond étant solide et immobile, seule la surface libre de l'eau est déformable. Cela s'observe facilement sous la forme de la lame d'étrave qui se soulève à l'avant d'un corps immergé se déplaçant près de la surface de l'eau ; mais ce travail vertical était auparavant considéré comme négligeable, alors qu'il est fondamental dans la physique de la nage, à quelque profondeur que ce soit.

Le nageur soulève de l'eau

Pourquoi ne voyons-nous pas la déformation de la surface libre produite par chaque poisson qui soulève de l'eau lors de sa progression horizontale ? Parce que la plupart des poissons sont petits et nagent en profondeur. Le volume d'eau soulevée se répartit sur une surface d'autant plus grande que le poisson nage en profondeur, et la déformation de la surface libre est généralement imperceptible. On remarque cependant le soulèvement de la surface lorsqu'un gros poisson nage à proximité de la surface. L'élévation de la surface de l'eau a également été mise en évidence et utilisée en marine de guerre, certains systèmes de radars étant capables de détecter le passage d'un sous-marin en mesurant la variation de hauteur de l'eau.

Ainsi, même si certains animaux ne sont pas directement en contact avec le sol, ce support solide leur est nécessaire pour se mouvoir. Les battements d'ailes de l'oiseau engendrent des tourbillons d'air qui finissent par atteindre le sol et y augmenter la pression. Le déplacement d'eau dû à

un poisson en train de nager élève localement la surface libre et accroît la pression au fond du lac. Le sol soutient tout ce qui se déplace et il y réagit mécaniquement, quel que soit le milieu dans lequel l'animal évolue.

Compte tenu de ces considérations, on peut refaire pour la nage le même type de calculs d'optimisation que ceux réalisés pour la course ou pour le vol. Les prédictions obtenues concernant la vitesse de déplacement et la fréquence des mouvements natatoires sont les mêmes que celles relatives à la course sur sol déformable, et elles sont en accord avec de nombreuses données.

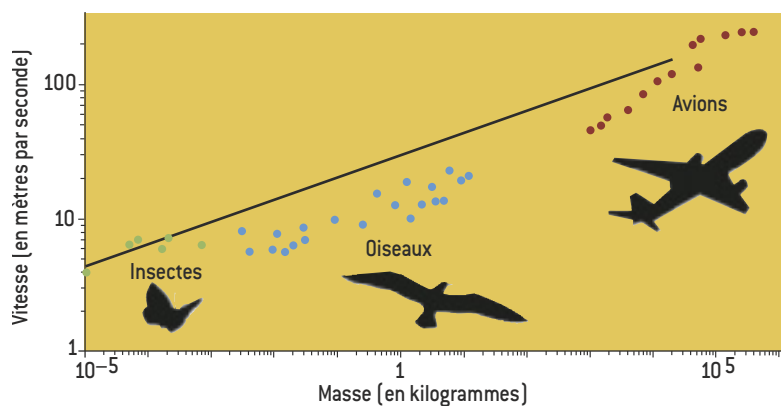
Tous les exposants qui apparaissent dans les lois d'échelle que nous avons obtenues en fonction de la masse reposent sur une hypothèse de similitude géométrique : nous caractérisons la taille d'un animal par une seule longueur, ce qui revient à supposer que l'animal est approximativement de forme sphérique. Cependant, des écarts petits mais statistiquement significatifs à cette hypothèse semblent être la règle plutôt que l'exception. C'est en particulier le cas pour les ailes des oiseaux : les gros oiseaux ont des ailes relativement plus longues que ne l'impliquerait une simple proportionnalité (longueur proportionnelle à la puissance $1/3$ de la masse), et la loi d'échelle décrivant la fréquence de battement d'ailes en fonction de la masse de l'animal devrait être caractérisée par un exposant inférieur à la valeur $-1/6$ prédite par notre modèle.

Locomotion : une théorie unifiée ?

En général, les exposants des lois d'échelle empiriques varient selon les espèces échantillonnées, selon les différences des proportions corporelles, selon la méthodologie utilisée, selon les hypothèses statistiques adoptées. Bien que les valeurs des exposants de nos lois d'échelle théoriques ne soient pas étayées statistiquement à tous les niveaux, ces valeurs correspondent assez bien aux données, à un facteur dix près. C'est un résultat remarquable sachant que l'analyse dimensionnelle à la base de nos calculs assimile à 1 les constantes multiplicatives comprises entre 0,1 et 10, et que nous ne faisons intervenir que des grandeurs telles que la densité, l'accélération de la pesanteur et la masse, sans aucune constante à ajuster.

Nous avons ainsi montré qu'une approche théorique de type thermodynamique, où une certaine grandeur (l'énergie dépensée) doit être minimisée, permet de mettre au jour quelques lois remarquables auxquelles se conforment les animaux. Il nous semble avoir fourni des arguments convaincants indiquant que si l'évolution devait repartir de zéro, et que si des animaux qui courent, volent ou nagent réapparaissaient, ces formes de locomotion obéiraient aux mêmes lois qu'aujourd'hui, alors même que les espèces concernées seraient probablement très différentes. On pourrait même appliquer ce modèle théorique pour prédire les caractéristiques de la locomotion sur d'autres planètes, où la pesanteur et la densité des environnements fluides sont différentes des nôtres.

Nous autres humains nous déplaçons souvent sur divers terrains, et nous ajustons notre vitesse et la fréquence de nos pas pour en tenir compte. Consciemment ou non, nous prêtons attention à l'efficacité de nos mouvements, et nous



6. La relation entre vitesse et masse prévue par les auteurs s'applique aussi bien aux animaux qu'aux machines. Dans ce graphique à échelle logarithmique, la droite correspond à la relation prévue théoriquement (vitesse proportionnelle à la puissance $1/6$ de la masse), tandis que les points (verts pour les insectes, bleus pour les oiseaux, rouges pour les avions) correspondent à des valeurs mesurées.

pourrions bien être programmés pour adopter des allures optimales. Quand les astronautes ont marché sur la Lune, ils se sont trouvés confrontés à une pesanteur bien différente de la pesanteur terrestre ; il serait intéressant de voir dans quelle mesure leur vitesse privilégiée et la fréquence de leurs bonds concordaient avec les prédictions de notre théorie.

Les prédictions de la théorie constructale sont valables non seulement pour les animaux, mais aussi pour les machines construites par l'homme. La relation entre force et masse des moteurs est la même que celle qui s'applique aux êtres qui courent, volent ou nagent. L'étude du vol animal par notre approche prédit également les vitesses des machines volantes, et fait ainsi le lien entre le vivant et l'inanimé.

De telles analyses théoriques aideraient, par exemple, à concevoir des robots efficaces pour explorer d'autres planètes ou des environnements terrestres difficilement accessibles. Elles pourraient servir à concevoir tout nouveau système de locomotion, ou à améliorer ceux qui existent déjà. Par exemple, les pneus d'automobiles se déforment à chaque tour et entraînent des pertes d'énergie verticale, tout en subissant des pertes horizontales par frottement. Il serait intéressant de voir si la conception des pneus a déjà été optimisée, ou si de nouvelles améliorations sont envisageables. Sur un plan plus ludique, nos prédictions pourraient aider, dans le domaine de l'animation, à choisir les vitesses et la démarche de créatures telles que des dinosaures pour montrer avec « réalisme » à quoi ressemblerait, par exemple, une course-poursuite entre un tyrannosaure et un véhicule.

Nous remercions la revue *American Scientist* de nous avoir autorisés à publier cet article.

Adrian BEJAN est professeur de génie mécanique à l'Université Duke, à Durham, aux États-Unis. **James MARDEN** est professeur de biologie à l'Université d'État de Pennsylvanie, aux États-Unis.

A. BEJAN et J. H. MARDEN, *Unifying constructal theory for scale effects in running, swimming and flying*, in *Journal of Experimental Biology*, vol. 209, pp. 238-248, 2006.

J. H. MARDEN, *Scaling of maximum net force output by motors used for locomotion*, in *J. Exp. Biol.*, vol. 208, pp. 1653-1664, 2005.

A. BEJAN et S. LORENTE, *La loi constructale*, L'Harmattan, 2005.

<http://www.constructal.org/>