

Epreuve d'ADS

Analyse de documents scientifiques

Titre : **Locomotion : une même loi pour tous**
(Dossier tombé à Polytechnique en MP en 2014)

Contenu :

- 1 article intitulé « Locomotion, une même loi pour tous » tiré de la revue *Pour La Science*

Temps de préparation : 2h

Temps de présentation : 15 minutes, suivies d'un entretien avec le jury.

Travail demandé :

L'analyse de l'article est demandée aux candidats. Celle-ci s'attachera à décrire les lois d'échelles et à expliquer leur origine physique et l'adéquation entre ces modèles et les observations. Il est recommandé de proposer une modélisation permettant de retrouver certains résultats quantitatifs présentés dans le texte.

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

pooids, 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 ?

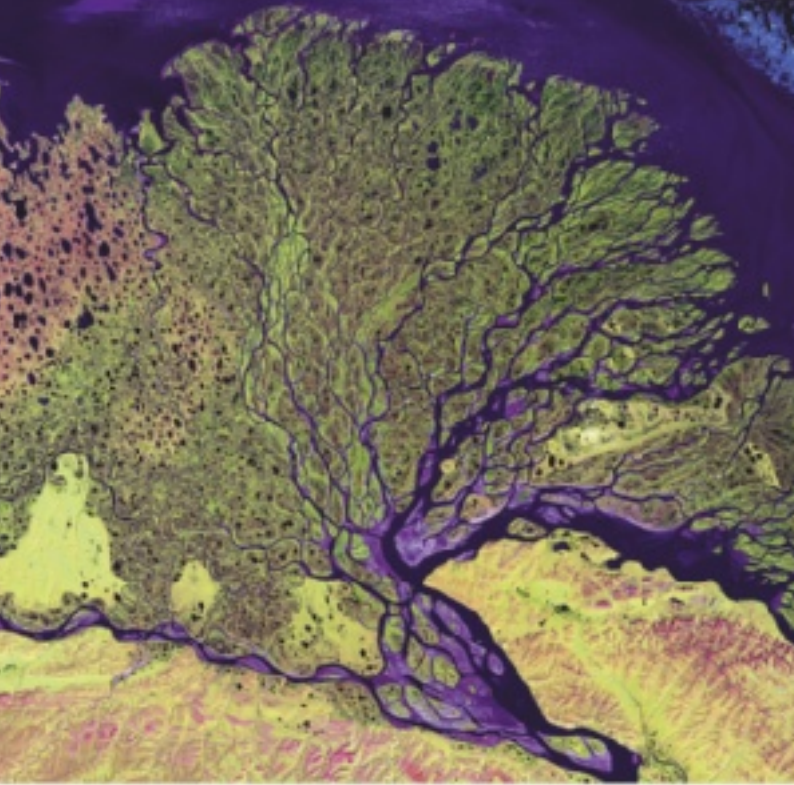
Nos travaux indiquent que oui. À certains égards, les systèmes naturels et les machines conçues par les ingénieurs relèvent d'une même problématique. Qu'il s'agisse d'un animal, d'un bâtiment ou d'une machine, l'un des principaux objectifs du système est d'optimiser ses performances par rapport à l'énergie 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.

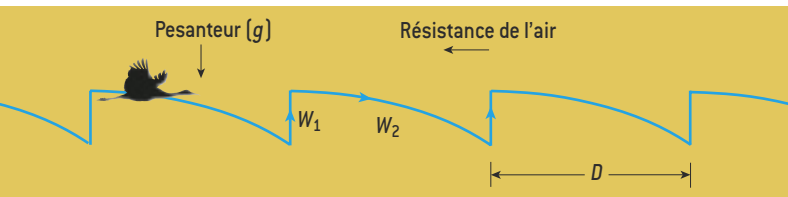


Pete Atkinson/NHPA

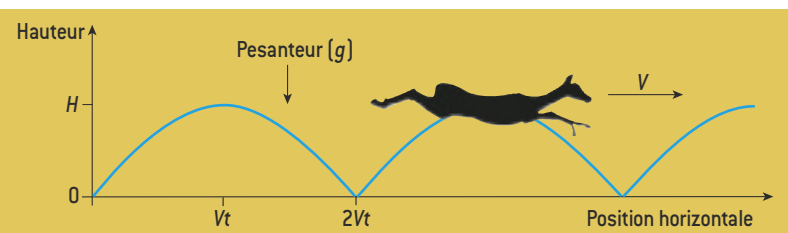


MASA, Landsat Project Science Office et USGS National Center for EROS

2. Selon la « théorie constructale » proposée par A. Bejan depuis 1996, pour qu'un système de taille finie persiste dans le temps, il doit évoluer de façon à fournir un accès de plus en plus aisé aux courants qui le traversent. Cette optimisation se traduit dans de nombreux systèmes par l'adoption d'une structure arborescente, comme dans le cas d'un réseau hydrographique (ici le delta du fleuve Lena, en Russie, vu par satellite et en fausses couleurs).



3. En vol de croisière, un oiseau décrit une trajectoire approximativement en dents de scie où chaque segment vertical correspond à un coup d'ailes qui fait regagner l'altitude perdue. Il s'agit alors d'évaluer, en fonction de la vitesse et de la masse de l'oiseau, le travail $W_1 + W_2$ effectué par l'animal pour voler sur chaque cycle de longueur D , W_1 étant la dépense d'énergie pour le mouvement vertical et W_2 la dépense d'énergie pour vaincre la résistance de l'air sur une distance horizontale D . Cela fait, on peut calculer, en fonction de la masse de l'oiseau, la vitesse optimale qui minimise la dépense d'énergie totale. Dans ces calculs, on utilise notamment le fait que la hauteur de chute dans chaque cycle est du même ordre que la dimension linéaire de l'animal.



4. Le centre de masse d'un animal qui court s'élève et s'abaisse alternativement d'une hauteur H dans un plan vertical. La longueur de chaque foulée est un multiple du produit de la vitesse V de l'animal par la durée t de la chute sur la hauteur H . Cette durée t est, à un facteur proche de un près, égale à la racine carrée de H/g où g est l'accélération de la pesanteur. Mises bout à bout, des relations de ce type permettent d'exprimer l'énergie dépensée en fonction de la masse de l'animal et de sa vitesse, d'où l'on déduit une relation entre la vitesse optimale (qui minimise l'énergie dépensée) et la masse.

concise, cette théorie stipule que, pour qu'un système de taille finie perdure, il doit évoluer de façon à fournir un accès de plus en plus aisé aux flux qui y circulent.

Malgré son apparente simplicité, cette idée se révèle puissante et pourrait s'appliquer avec profit dans de nombreux domaines, notamment en biologie. En particulier, on peut considérer la locomotion comme un déplacement de masse d'un point à un autre, c'est-à-dire comme un flux. Les animaux se déplacent de diverses façons et à des fins différentes. Cependant, au cours de l'évolution, la plupart d'entre eux ont probablement adopté des trajectoires et des rythmes qui leur permettent de déplacer leur masse en maximisant la distance parcourue par rapport à l'énergie dépensée. En d'autres termes, le système de locomotion des animaux devrait optimiser la distance parcourue pour un coût énergétique donné.

En appliquant un tel principe d'optimisation à la question de la locomotion, on ne part pas des contraintes comme dans l'approche habituellement suivie, mais des objectifs généraux de la structuration – ce qui n'exclut pas la prise en compte d'autres hypothèses, telles les contraintes communes aux différents organismes. Notre démarche constructale est en mesure de prédire, d'expliquer et d'organiser un ensemble croissant de connaissances empiriques, en réunissant dans un même cadre théorique les vitesses de croisière, les fréquences et les forces impliquées dans la course, la nage et le vol.

Soulignons qu'il ne s'agit pas de rendre compte de façon précise de toutes les formes offertes par la diversité biologique, mais seulement de déterminer des tendances centrales et approximatives que devraient suivre des animaux d'espèces et de tailles diverses. Des facteurs écologiques particuliers peuvent conduire à s'écarter de ces tendances, par exemple en favorisant des espèces plutôt immobiles là où l'énergie est abondante et où le risque d'être capturé par des prédateurs actifs est élevé.

Dépenser le minimum d'énergie

Examinons pour commencer le cas du vol. L'énergie utile dépensée par un oiseau en vol se compose de deux parties. Il y a d'abord une perte d'énergie verticale : le corps ayant un poids, il tend à chuter, et l'oiseau doit effectuer un travail pour se maintenir à son altitude de croisière. Il y a aussi une perte horizontale, car l'oiseau déploie de l'énergie pour surmonter la résistance de l'air et avancer horizontalement. Ces deux dépenses d'énergie sont nécessaires au vol de l'animal et ne peuvent être éliminées. Cependant, leurs parts relatives peuvent être ajustées afin que l'énergie totale dépensée soit minimale.

Un oiseau qui vole n'effectue pas un mouvement à altitude constante. Sa trajectoire ressemble plutôt à une ligne en dents de scie, la taille de ces dents de scie étant déterminée par le battement des ailes (voir la figure 3). Pour minimiser l'énergie investie, le travail nécessaire pour conserver l'altitude et le travail nécessaire à la progression horizontale doivent s'ajuster de façon à ce que leur somme soit minimale. Cela permet de calculer une vitesse optimale. On montre en effet que le travail vertical et le travail horizontal se comportent de façon inverse vis-à-vis de la vitesse : alors que le

travail vertical décroît quand la vitesse augmente, l'énergie horizontale croît. L'énergie totale investie atteint donc un minimum pour une certaine valeur de la vitesse, qui correspond aussi à une certaine fréquence de coups d'ailes.

Les calculs fondés sur ces considérations prédisent que la vitesse de vol devrait être proportionnelle à la masse corporelle élevée à la puissance $1/6$, et la fréquence de battement d'ailes devrait être proportionnelle à la masse corporelle élevée à la puissance $-1/6$. Les résultats de ces calculs, qui prédisent aussi la valeur approximative des constantes multiplicatives, sont en assez bon accord avec les observations recueillies sur l'ensemble des animaux ou engins volants (voir la figure 6).

Pour obtenir ces relations, il nous a fallu examiner avec soin les relations de proportionnalité entre diverses grandeurs et faire de l'analyse dimensionnelle, c'est-à-dire établir des relations entre grandeurs de même dimension (masses, longueurs, énergies, etc.). De plus, par souci de simplification, nous avons assimilé à l'unité toute constante multiplicative dont l'ordre de grandeur est 1 (autrement dit, on considère que toute constante valant entre 0,1 et 10 est approximativement égale à 1).

Pour donner une idée des méthodes employées, considérons la minimisation de l'énergie dépensée en un cycle de battement d'ailes, rapportée à la distance horizontale parcourue D . Cette distance est égale à la vitesse V multipliée par la durée T de vol ; or cette durée T est égale à la racine carrée de la hauteur de chute H du corps sous l'effet de la gravité, divisée par l'accélération de la pesanteur g (à un facteur constant près, qui vaut à peu près un). Par ailleurs, la hauteur H est également la hauteur acquise par l'animal en un coup d'ailes et est à peu près égale à l'envergure L des ailes. Cette taille L est elle-même approximativement égale à la puissance $1/3$ du volume de l'animal, c'est-à-dire à la masse du corps divisée par sa densité puis élevée à la puissance $1/3$. En effectuant toutes ces substitutions et en considérant que la densité corporelle vaut approximativement un gramme par centimètre cube pour toutes les espèces, on trouve pour l'énergie MgH dépensée pour regagner la hauteur H , et rapportée à la distance parcourue D , une expression où les seules quantités variables sont la vitesse V et la masse M .

Des raisonnements du même type permettent d'exprimer l'énergie dépensée pour avancer horizontalement et vaincre la résistance de l'air sur la distance D . On obtient ainsi l'énergie totale dépensée exprimée en fonction de V et de M , et il s'agit alors de trouver la valeur de la vitesse V (en fonction de la masse M) qui minimise cette énergie. C'est ainsi que nous avons établi que la vitesse optimale est proportionnelle à la masse corporelle, la seule grandeur non constante, élevée à la puissance $1/6$. On peut montrer de façon analogue que la force nette produite par un animal pour voler à la vitesse optimale est un multiple (le double environ) de son poids, un résultat en très bon accord avec les données d'observation (voir l'encadré page 72).

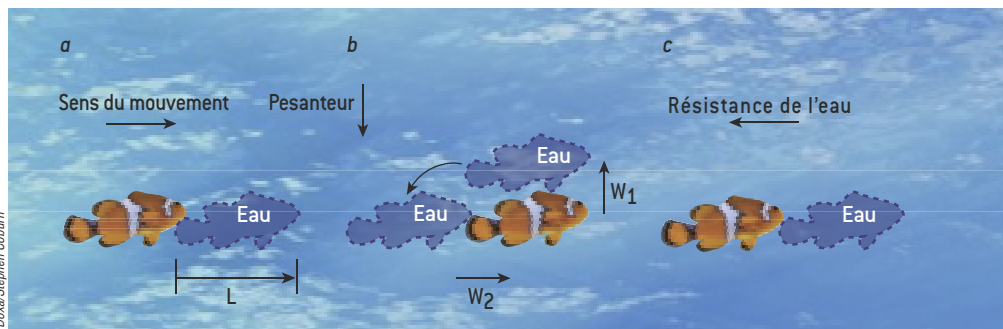
Des résultats robustes

En traitant la course de façon similaire, nous pouvons également prédire les relations auxquelles obéissent les vitesses et fréquences de foulée. La course est une succession de cycles faisant chacun intervenir deux dépenses d'énergie (voir la figure 4). L'une sert à soulever le corps à une hauteur correspondant approximativement à la longueur des membres. Ce travail est de l'énergie perdue, car quand le corps retombe, l'énergie potentielle acquise lors de la montée se dissipe presque entièrement dans les jambes et dans le sol. La seconde dépense d'énergie est liée au déplacement horizontal : un travail est effectué pour compenser les frottements avec le sol, avec l'air ambiant et à l'intérieur du corps (pour simplifier, nous négligeons cette friction interne, mal connue qui plus est).

En réalisant des calculs similaires à ceux utilisés pour le vol, on trouve que la course est à nouveau caractérisée par une vitesse proportionnelle à $M^{1/6}$ et une fréquence de foulée proportionnelle à $M^{-1/6}$, où M est la masse de l'animal. Les prédictions relatives à la course sont robustes, que la dépense d'énergie horizontale soit dominée par des frottements secs sur une surface dure, par la déformation permanente d'un sol mou comme du sable, de la boue ou de la neige, ou bien par la résistance de l'air. Tous ces effets jouent sur la vitesse et la fréquence, mais à peu près de la même façon. Si la résistance de l'air est le facteur dominant dans les pertes d'énergie associées au mouvement horizontal, la vitesse et la fréquence ne s'écartent que de dix pour cent des valeurs qu'elles



J. Maréchal



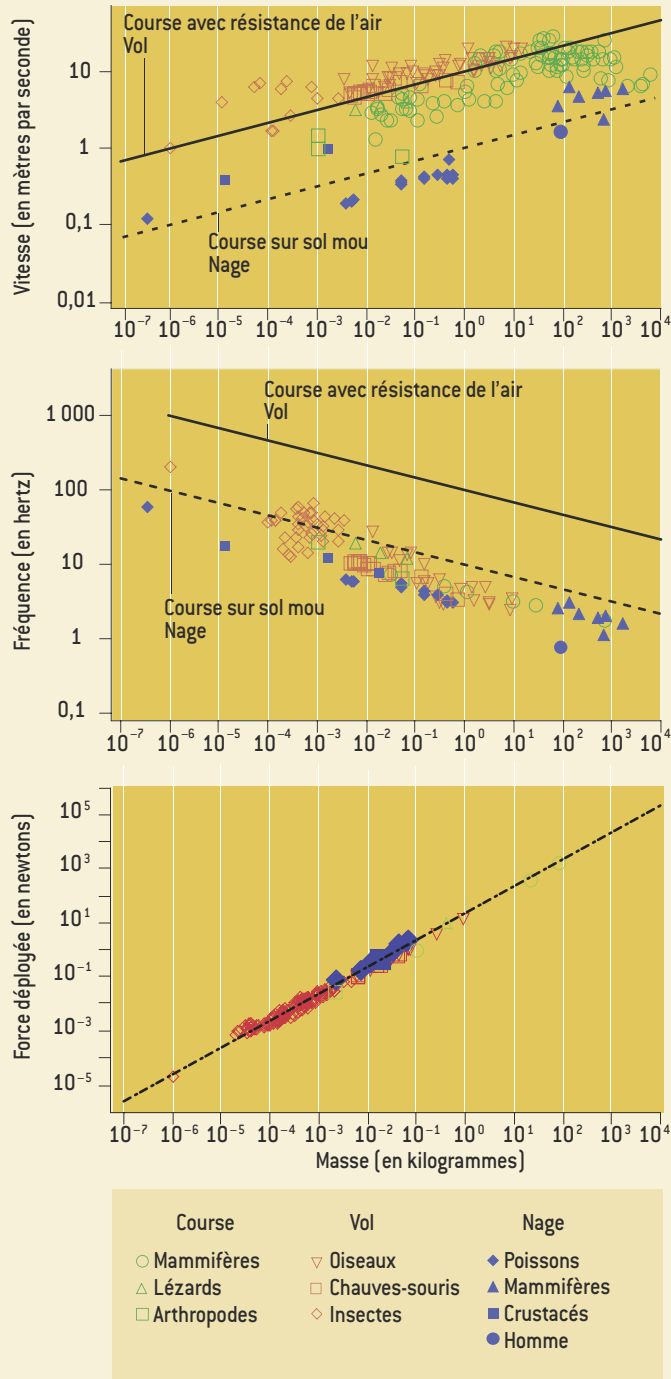
Doxa/Stephen Coburn

5. Pour avancer, un poisson doit écarter l'eau de son passage. Or *in fine*, la seule direction dans laquelle l'eau peut aller est vers le haut, où se trouve la seule surface libre de se déformer. Ce déplacement net d'eau vers le haut est perceptible lorsque le poisson nage à faible profondeur (voir la photographie). Pour se déplacer de la longueur de son corps, un poisson de masse M doit déplacer une masse d'eau M' correspondant au même volume (a). Tout se passe comme si cette masse d'eau était sou-

levée pour se retrouver au-dessus du poisson, avant de redescendre et d'occuper l'espace libéré par l'animal qui a avancé (b). Puis un nouveau cycle commence (c). Le travail W_1 nécessaire pour soulever la masse d'eau est approximativement égal au produit de la masse M par la taille L du poisson et par l'accélération g de la pesanteur. En même temps, le poisson doit effectuer un travail W_2 pour se déplacer horizontalement ; ce travail est le produit de la force de résistance de l'eau par la distance parcourue L .

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 augmentent 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.

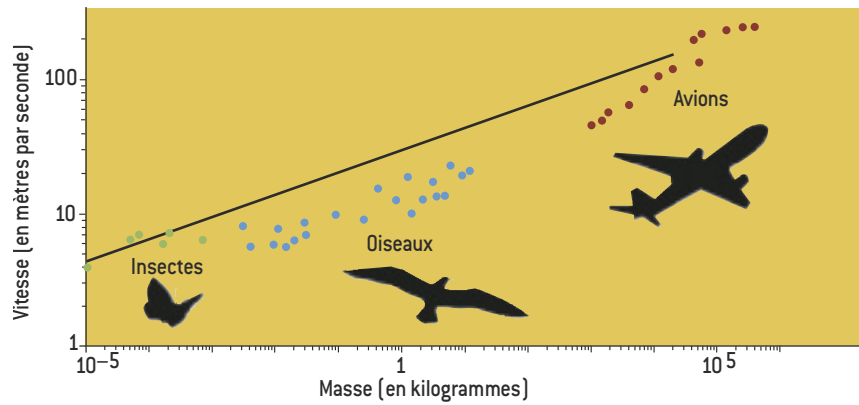
Tous les exposants qui apparaissent dans les lois d'échelle que nous avons obtenues en fonction de la masse reposent sur une hypothèse de similitude géométrique : nous caractérisons la taille d'un animal par une seule longueur, ce qui revient à supposer que l'animal est approximativement de forme sphérique. 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 concordait 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. 238-249, 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/>