



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.

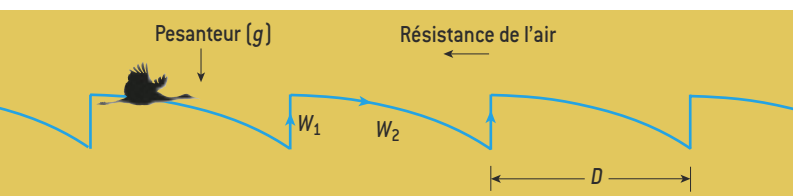


Pete Atkinson/NHPA

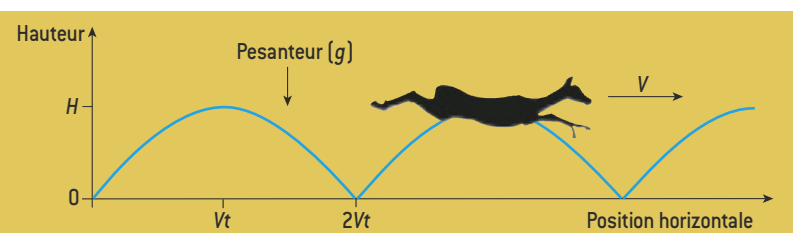


MASA, Landsat Project Science Office et USGS National Center for EOS

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