

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.

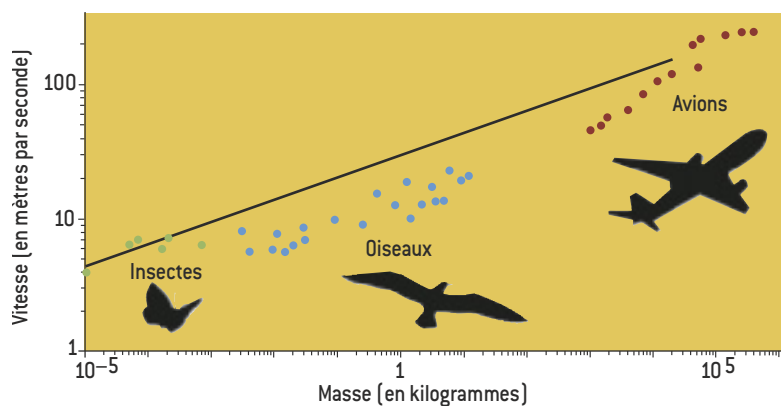
Tous les exposants qui apparaissent dans les lois d'échelle que nous avons obtenues en fonction de la masse reposent sur une hypothèse de similitude géométrique : nous caractérisons la taille d'un animal par une seule longueur, ce qui revient à supposer que l'animal est approximativement de forme sphérique.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



des supervolcans

Tous les 100 000 ans en moyenne, des éruptions colossales dévastent tout sur des milliers de kilomètres à la ronde. De nouveaux indices minéralogiques aident les géologues à comprendre et à prévoir ces catastrophes.

Ilya Bindeman

Enfouis sous la Californie et le Wyoming, deux volcans en hibernation pourraient un jour se réveiller dans une fureur difficile à imaginer. S'ils entraient en activité, ils enseveliraient sans doute la moitié Ouest des États-Unis sous une couche de cendres de deux mètres d'épaisseur en quelques heures. Cela s'est déjà produit au moins à quatre reprises lors des deux derniers millions d'années. Ces volcans dévastateurs sont qualifiés de supervolcans.

L'éruption d'un supervolcan libère une énergie de l'ordre d'un milliard de tonnes de TNT, l'équivalent de celle dégagée par l'impact d'un astéroïde de plus de 300 mètres de diamètre sur Terre, et elle survient plus souvent – ce qui fait potentiellement d'une telle explosion l'une des catastrophes naturelles les plus dangereuses pour l'humanité. Outre une destruction immédiate due à la libération de cendres brûlantes, les supervolcans perturbent considérablement le climat global durant des années à cause des gaz qu'ils émettent.

Les géologues aimeraient comprendre ce qui déclenche l'explosion des supervolcans, pouvoir prédire leur réveil, et évaluer les conséquences d'un tel événement. L'analyse de cristaux microscopiques dans les dépôts de cendres d'anciennes éruptions a apporté récemment de nouveaux éléments de réponse. Associés à une amélioration de la surveillance des sites cataclysmiques potentiels, ces nouveaux indices confortent l'idée qu'il sera bientôt

1. L'explosion d'un supervolcan entraîne la formation d'un gigantesque anneau de cheminées éruptives qui vomissent des nuages de gaz et de cendres brûlants dévastant le paysage sur des dizaines de kilomètres à la ronde.

possible de repérer les signes précurseurs de la prochaine grande éruption. Des travaux en cours suggèrent cependant qu'à cause des rejets dans l'atmosphère, les mois qui suivraient une superéruption seraient plus critiques qu'on ne l'estimait auparavant.

La majeure partie des volcanologues s'accordent sur le fait que nous avons très peu de chances de vivre une explosion supervolcanique aujourd'hui. Ces éruptions catastrophiques ne surviennent que tous les 100 000 à 500 000 ans environ. Néanmoins, l'impact planétaire de ces événements a alerté les scientifiques depuis les années 1950.

L'une des premières découvertes des géologues, à la fin du XIX^e siècle, fut celle de gigantesques vallées circulaires – de 30 à 60 kilomètres de diamètre et de plusieurs kilomètres de profondeur – ressemblant en tout point aux caldeiras en forme de bol qui surmontent de nombreux volcans. Les caldeiras se forment lorsque la chambre magmatique (des roches en fusion) située sous une cheminée volcanique se vide et provoque l'effondrement du sol en surface. Ayant remarqué que ces vallées en forme de caldeiras se trouvent près de certains des plus grands dépôts de roches volcaniques formés d'un seul jet, les chercheurs en ont conclu qu'il s'agissait des vestiges de volcans plusieurs milliers de fois plus grands qu'un volcan tel que le célèbre mont Saint Helens, dans l'État de Washington. Les dimensions de ces caldeiras et le volume estimé de matériau rejeté indiquent également que les chambres magmatiques situées en profondeur devaient être monstrueuses.

Les phénomènes engendrant la chaleur nécessaire pour créer des chambres magmatiques aussi massives étant rares, les supervolcans sont eux-mêmes des formations géologiques peu répandues. Durant les deux derniers millions d'années, seules quatre régions ont connu des explosions qui ont libéré en une seule fois plus de 750 kilomètres cubes de débris : le parc national de Yellowstone, dans le Wyoming, la Long Valley, en Californie, le lac Toba, à Sumatra, et Taupo, en Nouvelle-Zélande. La recherche d'éruptions de tailles comparables se poursuit dans d'autres régions où la croûte continentale est suffisamment épaisse pour accueillir des chambres magmatiques géantes, notamment dans l'Ouest de l'Amérique du Sud et dans l'extrême Est de la Russie.

Au milieu des années 1970, des mécanismes susceptibles de créer de vastes chambres magmatiques ont été découverts. À l'aplomb de Yellowstone, la plaque tectonique nord-américaine se déplace au-dessus d'un panache de roche visqueuse remontant à travers le manteau (la couche de 2 900 kilomètres d'épaisseur située sous la mince croûte terrestre). Fonctionnant comme un colossal bec Bunsen, ce « point chaud » a fait fondre une part suffisamment importante de la croûte pour alimenter des éruptions catastrophiques durant les 16 derniers millions d'années. À Toba, l'origine de la chambre est différente. Cette région se trouve au-dessus d'une zone de subduction, où une plaque tectonique glisse sous une autre. Cette convergence produit un échauffement, principalement par le biais de la fusion partielle du manteau surplombant la plaque descendante.

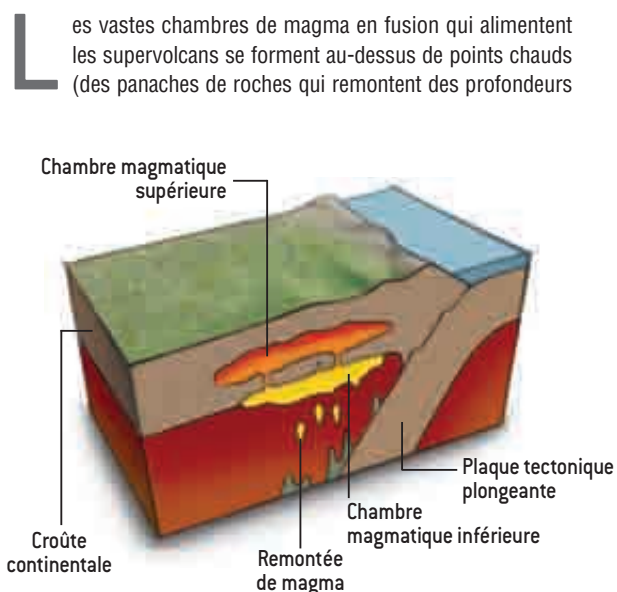
Quelle que soit la source de chaleur, la pression régnant dans une chambre magmatique augmente à mesure que le magma s'accumule sous la masse de roche qui la surplombe. Une superéruption se produit lorsque le magma atteint

une pression telle qu'il soulève la roche qui l'emprisonne et crée des fractures verticales qui courent jusqu'à la surface. Le magma remonte le long de ces failles pour former un anneau de cheminées éruptives. Lorsque ces cheminées fusionnent les unes avec les autres, la portion de sol délimitée par cet anneau n'est plus portée, elle s'effondre alors d'un bloc ou comme un piston, soit par morceaux, dans ce qui reste du magma sous-jacent. Cet effondrement expulse violemment vers l'extérieur, par les bords de l'anneau, un surplus de laves et de gaz (voir l'encadré ci-dessous).

La signature des zircons

Des zones d'ombres entachaient néanmoins ce scénario. En particulier, les chercheurs se sont vite rendu compte que toutes les chambres magmatiques de grandes dimensions ne provoquent pas nécessairement une éruption catastrophique. Yellowstone, par exemple, abrite les caldeiras de trois des plus jeunes supervolcans du monde – formés il y a 2,1 millions d'années, 1,3 million d'années et 640 000 ans, l'un pratiquement au-dessus de l'autre –, mais entre ces événements explosifs, la chambre sous-jacente a libéré lentement et tranquillement des volumes de magma similaires. On ne sait toujours pas avec certitude pourquoi le magma s'écoule parfois lentement vers la surface.

L'examen de minuscules cristaux piégés dans la lave et les cendres rejetées à Yellowstone a offert un regard nou-



1. La chaleur dégagée par la descente de la plaque océanique fait fondre la roche du manteau, créant une remontée de magma qui vient s'accumuler à la base de la croûte continentale. Cette chambre magmatique inférieure agit comme un immense bec Bunsen qui fait fondre les parties de la croûte continentale dont le point de fusion est le moins élevé. Une partie du magma remonte aussi le long de conduits verticaux reliant les deux chambres.