

à-dire du volume relatif que les grains occupent. Bien que la fourchette de compacité d'un milieu du type du sable du désert soit restreinte (entre 58 et 63 pour cent), un tel milieu se comporte très différemment selon sa compacité : en réaction à une perturbation, des grains peu tassés s'écoulent comme un liquide, tandis que des grains très tassés s'écoulent par à-coups quand un objet se fraye un passage entre eux.

La modélisation d'un tel comportement constitue un défi, car on ne connaît pas de loi physique décrivant un écoulement où coexistent un état solide et un état liquide. Une méthode fructueuse – la dynamique moléculaire – consiste à suivre par ordinateur le mouvement et les interactions de millions de grains individuels soumis aux lois de la collision et de la gravité. Une fois validés, ces modèles donnent une idée des écoulements de particules, fonctionnant comme un microscope virtuel à l'intérieur du matériau.

Sans les pattes

Comment un poisson des sables se déplace-t-il dans son milieu ? L'animal utilise-t-il ses membres pour pagayer ou frétillait-il comme une anguille ? Comment se comporte le sable quand la tête y a pénétré ? Reste-t-il fluide ou se solidifie-t-il sous la perturbation ? Quelle fluidité présente-t-il lorsque la suite du corps s'enfouit ? Des changements de compacité du matériau modifient-ils le mouvement du poisson des sables ? Pour étudier ces questions, l'un de nos doctorants, Ryan Maladen, a utilisé une combinaison de techniques d'imagerie à rayons X pour visualiser les mouvements du reptile sous le sable.

Pour contrôler la compacité du sable, les grains sont placés dans un bac à fond poreux. Un flux d'air traversant ce fond les pousse vers le haut. Lorsque son intensité est suffisante, les grains s'agitent comme un fluide et, une fois le flux d'air arrêté, s'arrangent dans un état de faible compacité. Différents degrés de compacité sont ensuite provoqués par des jets d'air ou des vibrations contrôlées. Le poisson des sables est placé dans un enclos relié au bac. Quand on soulève la porte de l'enclos, l'animal se précipite vers le sable, le dos raide, en utilisant ses membres pour se propulser. Une caméra rapide révèle qu'il s'y enfouit en combinant les mouvements de son corps et la poussée



4. UN SERPENT DES BLÉS glissant sur de la gélatine photo-élastique illuminée par dessous et filmé entre des filtres à polarisation croisée. Initialement, l'orientation des filtres empêche la lumière polarisée de parvenir à la caméra, mais quand le serpent appuie sur la gélatine, il y a rotation de la polarisation de la lumière, ce qui permet à la caméra de la détecter (les zones lumineuses sous le serpent). Cette technique visualise les points de contact du serpent avec le sol.



5. LE POISSON DES SABLES, qui vit dans les déserts d'Afrique du Nord, utilise son groin en forme de pelle (a), sa peau lisse et son puissant corps se tortillant dans le sable. Il avance ainsi à une vitesse atteignant deux longueurs de corps par seconde. Le reptile, long de dix centimètres, peut s'enfouir en moins d'une seconde (b). En surface, il utilise ses membres pour se déplacer, mais sous le sable, il se déplace uniquement en propageant une onde sinusoïdale le long de son corps (c, observé aux rayons X).

de ses membres. Très bref, le temps d'enfouissement ne dépend pas de la compacité du sable.

Le déplacement du reptile dans le matériau est suivi à l'aide d'une caméra rapide à rayons X. Le sable (et le lézard) est placé entre une source de rayons X et une matière scintillante qui convertit les photons X en électrons ; ces derniers frappent une autre surface qui émet alors de la lumière visible, laquelle est ensuite captée par une caméra conventionnelle à grande vitesse.

La première fois que nous avons observé le déplacement du poisson des sables sous la surface, nous avons constaté qu'il avançait à une vitesse d'environ deux longueurs de corps par seconde, en se tortillant et sans se servir de ses pattes, se déplaçant plus vite que des serpents de lait sur un sol plat. Le lézard nageait jusqu'à une profondeur d'environ quatre centimètres, puis s'arrêtait, se sentant probablement en sécurité. Il avançait en propageant une onde sinusoïdale de déplacement de la tête vers la queue à une fréquence donnée (plus la fréquence était élevée, plus il allait vite). Dans un milieu très compacté, l'animal utilisait des fréquences allant jusqu'à quatre ondulations par seconde.

En augmentant la compacité, nous nous attendions à ce que l'animal ralentisse. Des mesures effectuées sur de petites tiges dans des milieux granulaires avaient montré que la force de traînée (la composante du frottement qui s'oppose au mouvement) dans du sable très tassé est presque le double de celle mesurée dans un sable peu compact (voir l'encadré page 73). À notre grande surprise, la compacité n'avait aucun

effet sur la vitesse pour une fréquence donnée de l'onde. De plus, les mouvements de l'animal étaient les mêmes dans les milieux de faible et de forte compacité. Plus étrange encore, en moyenne, le poisson des sables nageait plus vite dans le matériau très tassé que dans celui de faible compacité. Comment ? En augmentant sa fréquence d'ondulation.

De fait, la locomotion du poisson des sables est particulièrement efficace. L'efficacité de son onde en milieu granulaire (le rapport de sa vitesse moyenne de nage et de la vitesse de l'onde) est de 0,5, soit plus du double de celle des vers nématodes dans des liquides (environ 0,2) et supérieure à celle des serpents sur une surface rugueuse (environ 0,3). L'efficacité maximale, 1, correspond à un animal qui avance sans glissement dans un milieu statique, et l'efficacité minimale, 0, à un animal cherchant à se déplacer dans le vide.

Pour comprendre ce phénomène, un de nos doctorants, Yang Ding, a modélisé le mouvement du poisson des sables à l'aide de la technique de la force de résistance (voir l'encadré page 68). Cette approche nous semblait applicable, car, d'une part, l'étude aux rayons X a indiqué que le matériau s'écoule au voisinage de l'animal et, d'autre part, les perturbations des

différentes régions du sable n'influent pas les unes sur les autres, de sorte que les forces agissant sur des « tranches » du corps s'ajoutent de façon linéaire.

La modélisation du poisson des sables

Comme avec les serpents, la première étape de la modélisation consiste à décrire les forces de frottement qui s'exercent sur le reptile. À défaut de connaître les lois de la dynamique des milieux granulaires, Y. Ding et Chen Li, un autre doctorant du groupe, ont établi des lois empiriques en mesurant les composantes de la traînée sur un cylindre en acier inoxydable tiré dans le sable sous différents angles par rapport à la direction de déplacement (voir l'encadré ci-dessous). Ils ont observé que la composante perpendiculaire à l'axe du cylindre était accrue par rapport à celle qu'aurait subie le cylindre dans un fluide réel ou sur le sol. L'efficacité de l'onde du poisson des sables était-elle due à l'accroissement de cette composante ?

Oui, a répondu le modèle mathématique dans lequel ces lois empiriques avaient été injectées : le modèle retrouve bien que la vitesse augmente de façon linéaire avec la fréquence. En outre, l'efficacité de l'onde

qu'il prédit est comprise entre 0,4 et 0,7 (il faudrait tenir compte de la forme de la tête pour affiner ce résultat) et est bien indépendante de la compacité. Le modèle a donc montré que l'animal peut « nager » sous le sable sans utiliser ses membres. De plus, il donne une explication plausible de l'indépendance de l'efficacité de l'onde par rapport à la compacité : lorsque la force de résistance augmente dans un matériau très tassé, il en va de même pour les forces de poussée qui peuvent être engendrées.

Notre modèle prédit aussi avec quelle amplitude le poisson des sables doit onduler pour atteindre une vitesse maximale en milieu granulaire : pour accélérer, le reptile augmente l'amplitude de son onde tout en maintenant à peu près constant le nombre d'ondulations par seconde. L'animal ayant une longueur finie, au-delà d'une certaine amplitude d'ondulation, il avance moins loin à chaque ondulation. Notre modèle a trouvé pour cette amplitude limite une valeur d'environ un cinquième de la longueur d'onde. Dans notre dispositif expérimental, l'amplitude d'ondulation des lézards testés se concentrait autour de cette valeur : nos animaux fuyaient donc probablement le plus vite possible dans le sable.

La concordance des données expérimentales avec notre modèle est encourageante,

DÉCRIRE LE COMPORTEMENT DU SABLE

Les lois physiques qui régissent les interactions avec les milieux granulaires peuvent être très complexes. En voici deux exemples. Dans le premier (a), un même milieu réagit différemment à une perturbation selon sa compacité : la force de traînée (force de frottement qui s'oppose au mouvement) qui s'exerce sur une courte tige (deux

centimètres de long) tirée à une vitesse d'un centimètre par seconde n'est pas la même dans un milieu de perles de verre de 0,3 millimètre faiblement (en vert) ou fortement (en marron) compactées. Avec des particules peu tassées, la force est constante, après une augmentation initiale transitoire, quand le matériau s'écoule autour de la tige.

Dans le matériau très compacté, la force présente de grandes oscillations, car le matériau devant la tige cède périodiquement, tandis qu'un bloc de matériau solidifié est poussé vers la surface.

Dans le second exemple, un récipient rempli de grains (des sphères en plastique de six millimètres) reste solide jusqu'à ce qu'une boule

d'aluminium de cinq centimètres de diamètre (b) frappe la surface (c). Le milieu granulaire devient alors fluide autour de la boule. Une fois que la boule s'immobilise, les grains forment à nouveau un solide. Une technique de simulation appelée dynamique moléculaire permet de visualiser les forces et les vitesses appliquées aux grains (d). Les particules bleu foncé se déplacent lentement et se comportent presque comme un solide, alors que les particules plus rouges, autour de l'objet ayant produit l'impact, se déplacent plus vite.

