

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

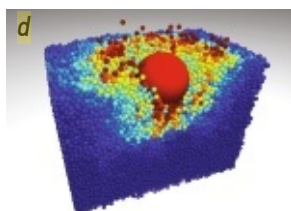
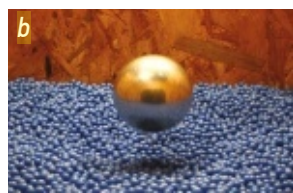
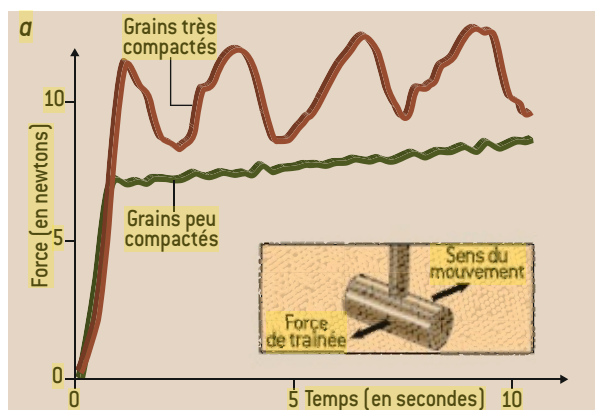
Les lois physiques qui régissent les interactions avec les milieux granulaires peuvent être très complexes. En voici deux exemples. Dans le premier (a), un même milieu réagit différemment à une perturbation selon sa compacité : la force de traînée (force de frottement qui s'oppose au mouvement) qui s'exerce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

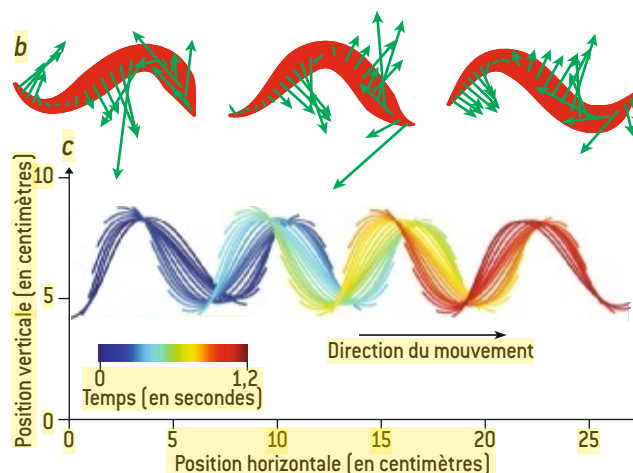
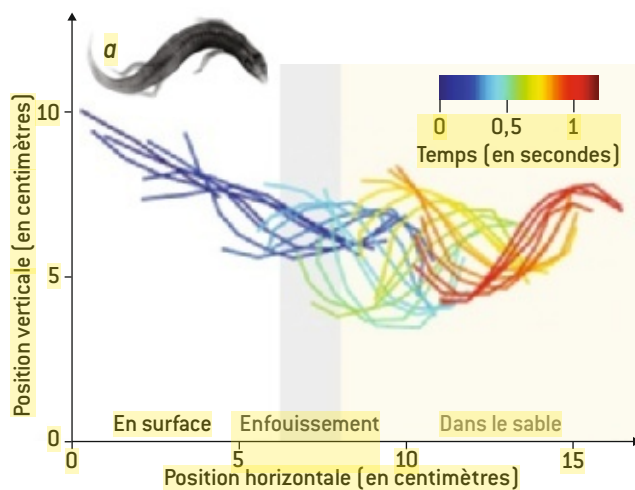
centimètres de long) tirée à une vitesse d'un centimètre par seconde n'est pas la même dans un milieu de perles de verre de 0,3 millimètre faiblement (en vert) ou fortement (en marron) compactées. Avec des particules peu tassées, la force est constante, après une augmentation initiale transitoire, quand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

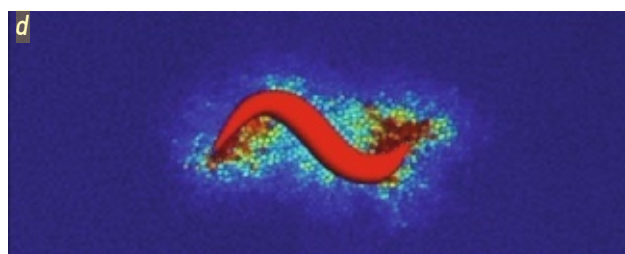
Dans le second exemple, un récipient rempli de grains (des sphères en plastique de six millimètres) reste solide jusqu'à ce qu'une boule

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.





6. LES MOUVEMENTS DU DOS D'UN POISSON DES SABLES filmé à l'aide d'une caméra rapide à rayons X (a) et de son homologue virtuel (b-d). Après un déplacement très rapide en surface, le reptile s'enfouit tout aussi vite, puis commence à onduler sous le sable en ralentissant (a). Le mouvement d'un lézard simulé dans un bac contenant environ 150 000 perles de verre de trois millimètres de diamètre ressemble à celui d'un animal réel (c). Les forces de frottement (b, en vert) sont principalement perpendiculaires à l'axe du corps : ce sont elles qui propulsent le reptile. Le milieu est quant à lui solide (d, en bleu foncé), sauf dans une petite zone autour du lézard (particules plus rouges).



et la prédiction d'une nage optimale tentante. Toutefois, ne concluons pas trop vite. L'approche choisie présente quelques inconvénients. D'une part, changer les paramètres du modèle, tels que la taille des grains de sable, nécessite à chaque fois de nouvelles mesures empiriques. D'autre part, rien ne prouve que nos hypothèses (comme celle selon laquelle les différents segments du lézard n'influencent pas les uns sur les autres) sont judicieuses, de sorte que la concordance n'est peut-être que fortuite.

Des reptiles virtuels aux robots

Nous avons donc adopté une autre approche utilisant les techniques de dynamique moléculaire décrites plus haut. Après avoir montré que ce modèle présentait une bonne capacité prédictive du comportement du sable pour tout un éventail de conditions expérimentales, nous avons créé un poisson des sables virtuel qui combinait les caractéristiques de déplacement expérimentales et les forces de frottement calculées dans le modèle de dynamique moléculaire.

Nous avons trouvé une bonne concordance avec l'efficacité de l'onde expérimentale et celle prédite dans notre premier modèle : la dynamique moléculaire confirme l'existence d'une nage optimale du poisson des sables. De plus, elle donne accès à des

informations à l'échelle de la particule : nous avons visualisé l'écoulement des particules autour du poisson des sables et estimé la force s'exerçant sur différents éléments. Des travaux complémentaires avec ce modèle nous permettront d'étudier en détail les lois physiques qui déterminent la poussée et la traînée pour lesquelles l'efficacité de l'onde et la compacité deviennent indépendantes.

Test ultime, nous avons conçu, à l'aide des données de la dynamique moléculaire, un modèle physique du poisson des sables, un robot qui nage dans un matériau granulaire. Ce robot est une chaîne de sept segments de cinq centimètres de long, chacun contenant un servomoteur dont l'oscillation est ajustée pour que l'ensemble se déplace en ondulant. Nous avons aussi augmenté la taille des particules granulaires à six millimètres, pour éviter qu'elles pénètrent dans les moteurs et simplifier la modélisation (le poisson des sables se déplace par ailleurs avec la même efficacité d'onde dans des particules plus grosses, et les simulations obtiennent aussi le même résultat). Nous avons obtenu un bon accord entre l'expérience avec le robot et sa simulation. Lui aussi présente une efficacité optimale de l'onde, tant dans la simulation que dans l'expérience, mais de 0,3 et non 0,5 comme le poisson des sables. Ce résultat est probablement dû au nombre fini de segments du robot : dans la simulation, quand on aug-

mente le nombre de segments de façon à ce que le corps soit presque lisse, l'efficacité optimale de l'onde avoisine 0,5.

Nous avons étudié deux environnements distincts où la locomotion par ondulation est efficace. Chez les serpents se déplaçant sur le sol, un frottement anisotrope du ventre engendre une poussée qui surpasse la traînée, alors que dans le sable, l'animal engendre une poussée en exploitant avec ses flancs les frottements de type liquide des milieux granulaires. Bien que les lois de traînée soient différentes dans ces deux régimes, les techniques de modélisation de la force de résistance, issues de l'hydrodynamique, s'appliquent avec succès dans les deux cas.

Ces travaux soulèvent plusieurs questions : d'abord, nous n'avons exploré les mouvements que dans deux dimensions. Qu'apporte la troisième ? Ensuite, que se passe-t-il si la forme de l'animal ou de l'onde change ? Quelles sont les limites métaboliques et musculaires des animaux étudiés ? Que se passe-t-il dans un matériau mouillé ? Avec des modèles améliorés des environnements et des organismes, ainsi que de leurs interactions, notre approche aiderait à trouver des conceptions de dispositifs robotiques sans membres, capables de se déplacer sur un terrain complexe plus vite et plus efficacement que leurs homologues naturels. ■