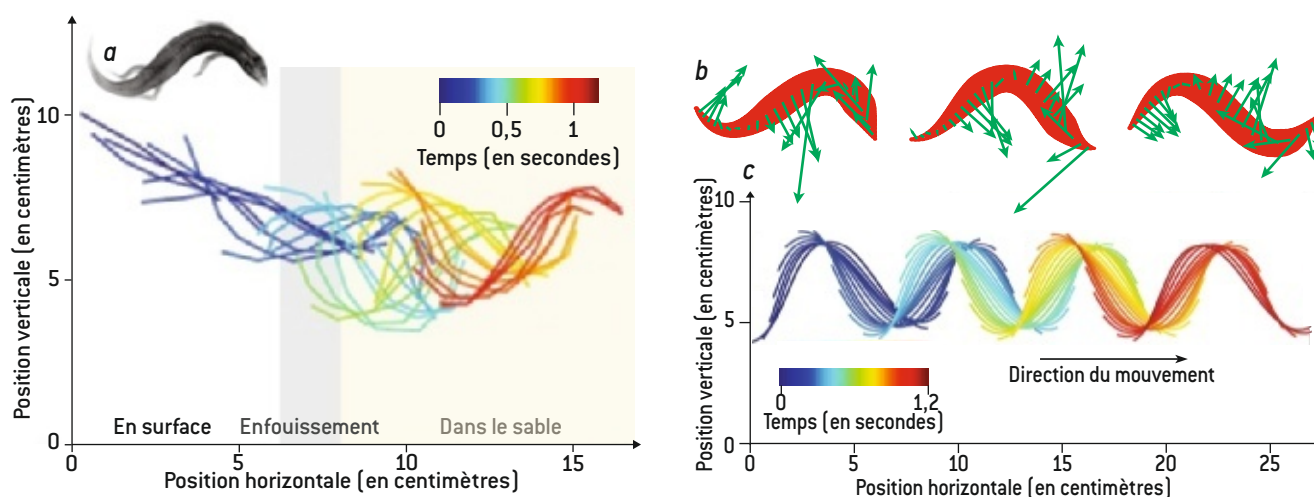




6. LES MOUVEMENTS DU DOS D'UN POISSON DES SABLES filmé à l'aide d'une caméra rapide à rayons X (a) et de son homologue virtuel (b-d). Après un déplacement très rapide en surface, le reptile s'enfouit tout aussi vite, puis commence à onduler sous le sable en ralentissant (a). Le mouvement d'un lézard 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.