

nous filmions à 5 000 images par seconde, ce qui témoignait de vitesses et d'accélération extrêmes. Et j'ai vite compris que dans le monde vivant, les mouvements les plus rapides ne sont pas la course des guépards, le clignement des yeux ou la fuite des poissons. On les trouve chez de petites créatures méconnues qui ont maîtrisé l'un des grands défis de la physique et de l'ingénierie : la production d'une puissance extrême.

Au fil des années suivantes que j'ai consacrées aux systèmes biologiques ultrarapides, ce domaine de recherche émergeant a livré de nombreuses et surprenantes informations à l'interface de la biologie, de la physique et de l'ingénierie. Le monde du vivant ultrarapide est peuplé d'organismes extraordinaires tels que des fourmis à mandibules-pièges (du genre *Odontomachus*), des champignons à spores autopropulsées, des termites à mandibules balistiques (*Termes panamensis*), des méduses urticantes...

L'organisme ultrarapide le plus étudié

La crevette-mante est dans ce domaine l'organisme qui a été le plus étudié. Elle constitue aujourd'hui un modèle clé pour explorer l'histoire évolutive de l'armement extrême, les compromis mécaniques et évolutifs accompagnant les mouvements extrêmes, et les applications techniques de ces découvertes biologiques.

L'analyse des premières images à grande vitesse de la crevette-mante en

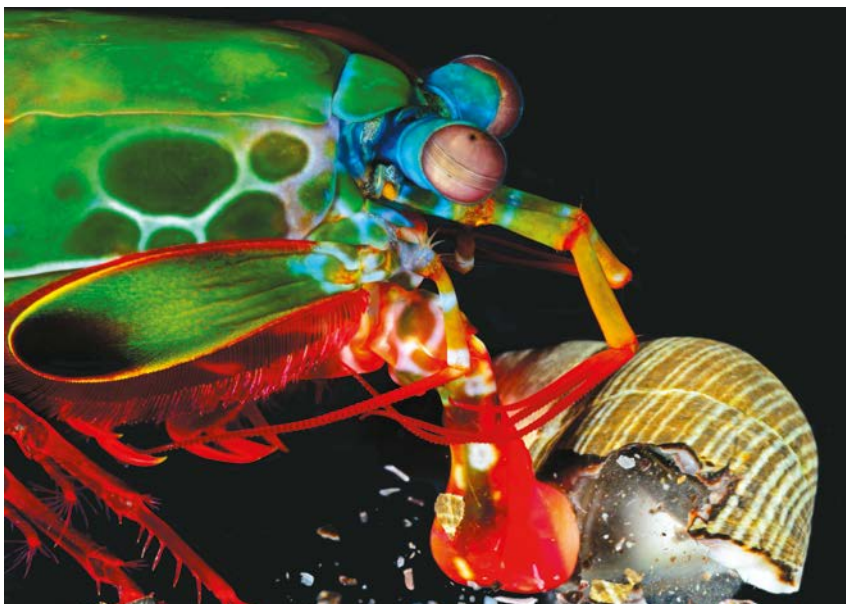
■ L'AUTEURE



Sheila N. PATEK est maître de conférences au département de biologie de l'université Duke, aux États-Unis. Ses recherches sont à l'interface de la physique et de la théorie de l'évolution (systèmes ultrarapides et acoustique des invertébrés).

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *American Scientist*.

LORSQU'UNE SQUILLE FRAPPE un escargot marin à l'aide d'un de ses appendices en forme de marteau, le mouvement est si rapide qu'il est invisible à l'œil nu. Le coup ne dure que quelques millièmes de seconde.



© Avec l'aimable autorisation de Roy Caldwell

train d'écraser le malheureux escargot a montré que les mouvements étaient beaucoup plus rapides que tout ce que nous avons pu imaginer. Les pièces buccales en forme de marteau de ces crustacés, nommées appendices ravisseurs, subissent une accélération semblable à celle d'une balle de fusil (100 000 mètres par seconde carrée) et atteignent des vitesses de 31 mètres par seconde, soit plus de 110 kilomètres par heure.

Le coup est si bref qu'il pourrait y en avoir plus d'une centaine dans l'intervalle de temps que dure un clin d'œil. Un humain aurait besoin d'un solide marteau pour casser les mêmes escargots, alors que ces crustacés longs de quelques centimètres les brisent avec des appendices ravisseurs plus petits que le doigt d'un bébé.

Une question de puissance, pas d'énergie

Dès qu'il est question de mouvement animal, le rôle des muscles vient à l'esprit. Or ces organes ne suffisent pas pour expliquer les coups de la crevette-mante. Une analogie simple permet de comprendre pourquoi.

Imaginez que vous jetez une flèche sur une cible en n'utilisant que les muscles de vos bras. La flèche n'irait ni très loin ni très vite. Mais si vous vous servez des mêmes muscles pour bander un arc, puis que vos doigts libèrent la flèche, celle-ci atteint facilement la cible et la transperce. Or l'énergie investie est la même, que l'on utilise un arc ou non. L'unique différence est la durée sur laquelle l'énergie est libérée. Avec les seuls muscles du bras, l'énergie est libérée en un temps relativement long. Avec l'arc, l'énergie se libère sur une durée extrêmement courte. Il en résulte une amplification de la puissance, clé de tous les mouvements ultrarapides.

La puissance est définie comme le rapport énergie / temps. Si, à énergie constante, la durée diminue, alors la puissance augmente. Comme dans l'exemple de l'arc et de la flèche, les appendices ravisseurs de la squille multicolore contiennent un « ressort » et une « gâchette » grâce auxquels la puissance est fortement amplifiée. Le mécanisme en jeu n'est qu'une amélioration des contractions classiques de muscles antagonistes caractérisant les systèmes moteurs de la plupart des animaux. À l'instar de nos bras ou jambes actionnés par des paires de muscles extenseurs et

fléchisseurs, les appendices ravisateurs de la squille sont déployés par les muscles extenseurs lorsque l'animal frappe, et sont repliés contre le corps par les muscles fléchisseurs pendant qu'il vaque à ses autres activités.

Emmagasiner de l'énergie élastique

Cependant, lorsque la squille doit décocher un coup puissant, elle contracte simultanément les muscles extenseurs et fléchisseurs (comme les contractions des muscles antagonistes des jambes que nous effectuons avant de sauter). Le gros muscle extenseur comprime un système élastique, constitué par une partie en forme de selle de la carapace de l'appendice ravisateur. Quant au minuscule muscle fléchisseur, il tire, en se contractant, une saillie minéralisée de son tendon et coince cette espèce de loquet par-dessus une petite protubérance de l'appendice (voir la figure page suivante).

Ainsi, ces deux contractions mettent le système sous tension élastique et le bloquent. Pour frapper, la crevette-mante relâche le muscle fléchisseur et débloquent sa gâchette. L'énergie élastique emmagasinée se libère alors brusquement et pousse violemment le marteau vers l'avant.

À des degrés divers, c'est l'astuce de tous les systèmes de forte puissance : ils séparent, spatialement et temporellement, l'amorçage lent et le stockage de l'énergie de la libération rapide d'énergie, qui amplifie la puissance.

Ainsi, les fourmis à mâchoires-pièges relâchent de minuscules verrous qui bloquent leurs mandibules préarmées, ce qui leur permet de tuer une proie ou de sauter.

Dans les champignons qui propulsent leurs spores, deux gouttelettes grossissent progressivement jusqu'à ce qu'elles fusionnent brusquement, ce qui fournit la puissance nécessaire au lancement d'une spore.

Chez les méduses, les cellules urticantes – les cnidocytes – se pressurisent lentement, puis, quand leur cil sensitif est stimulé par le contact d'une proie, elles s'ouvrent d'un coup et expulsent leur nématocyste, un organite urticant composé notamment d'un filament épineux et venimeux (voir la figure ci-contre).

Les premières images à grande vitesse des coups portés par la squille multicolore



ont montré une autre caractéristique remarquable : la formation d'une grosse bulle entre le marteau de la squille et sa proie, puis son implosion. C'est la source première des bruits secs entendus au laboratoire. Il s'agit du phénomène dit de cavitation, qui se produit lors de mouvements très rapides dans un fluide.

De tels mouvements créent en effet des zones de basse pression, où se forment des bulles de vapeur. Ces bulles s'effondrent en un temps si court que l'énergie brutalement libérée peut conduire localement à de hautes températures et à l'émission de lumière ou de son. C'est un défi pour les ingénieurs : par exemple, les hélices des bateaux qui tournent très vite s'usent sous l'effet de l'implosion des bulles de cavitation, et les sous-marins en mouvement rapide font beaucoup de bruit, également en raison de l'implosion des bulles, ce qui est bien sûr gênant pour des vaisseaux censés être discrets.

Coup double avec les bulles de cavitation

Les armes fondées sur la cavitation étaient déjà connues des biologistes qui avaient observé la production de bulles par les crevettes-pistolets (de lointaines cousines des crevettes-mantes). Toutefois, les forces de cavitation restaient à mesurer dans ces contextes biologiques. J'ai développé une approche qui utilise des capteurs piézoélectriques opérant à des cadences très élevées. Grâce à elle, nous avons mesuré à la fois les forces produites par l'impact de l'appendice

LA FERMETURE DES MANDIBULES de fourmis à mâchoires-pièges (photographie) et le déclenchement des cellules urticantes des méduses (schémas) sont d'autres exemples de mouvements biologiques ultrarapides.

