

biologique, et que les systèmes ultrarapides soient en contrepartie soumis à des limitations importantes.

Une première indication des limitations imposées aux systèmes ultrarapides est apparue quand nous avons décidé de filmer un autre type de squilles que les espèces à marteau de nos études initiales. L'arbre phylogénétique des squilles révèle en effet que les espèces frappeuses, munies d'un marteau, sont peu nombreuses. La grande majorité des espèces de squilles sont des ravisseuses : leur appendice ravisseur est allongé, en forme de lance ou de harpon mais dépourvu de marteau, et sert à transpercer de petites proies. D'après les analyses moléculaires et fossiles, les squilles frappeuses sont apparues à partir des squilles ravisseuses il y a environ 50 millions d'années.

Après avoir mesuré les étonnantes vitesses des squilles frappeuses, Maya deVries, aujourd'hui à l'institut d'océanographie Scripps en Californie, et moi pensions que nous allions découvrir une cinématique encore plus impressionnante chez les ravisseuses. Il n'en est rien : les ravisseuses ont des mouvements n'atteignant qu'une fraction des vitesses et accélérations des frappeuses.

La découverte que les crevettes-mantes ravisseuses, qui se nourrissent de petits poissons, ont des mouvements bien plus lents que les frappeuses allait à l'encontre de l'intuition ; nous nous attendions en effet à ce que les animaux dotés des armes les plus rapides soient ceux qui chassent les proies les plus rapides. En réalité, en examinant les habitudes des animaux ultrarapides, nous avons constaté que la plupart ne ciblent pas des proies rapides. Ils visent plutôt des proies bien protégées à coquille dure, qui ne s'échappent généralement pas quand elles sont attaquées. S'ils disposent d'une machinerie biologique capable d'attraper des proies qui sautent ou qui nagent, pourquoi les

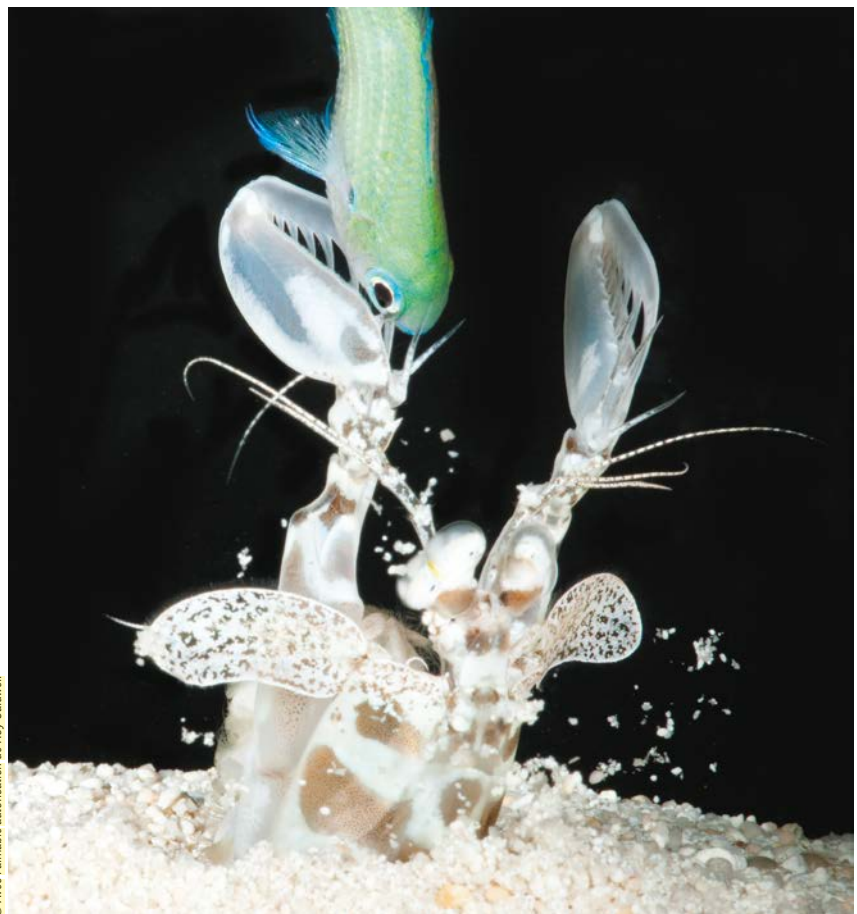
animaux ultrarapides ne chassent-ils pas des proies qui fuient ?

Un inconvénient majeur des systèmes ultrarapides est la perte de contrôle de l'arme une fois que le coup est parti. Par exemple, lorsqu'on se sert d'un arc et de

Inconvénient majeur des systèmes ultrarapides : la perte de contrôle de l'arme une fois le coup parti

flèches pour chasser, la flèche est préparée et pointée, mais une fois qu'elle est décochée, l'archer ne peut plus ajuster sa trajectoire et le projectile n'atteindra sa cible que si la proie est restée immobile. Les animaux ultrarapides vont si vite que leurs neurones ne peuvent ni suivre ni modifier le mouvement une fois qu'il est déclenché.

Dans une analyse de l'activité musculaire précédant le mouvement ultrarapide, l'un de mes postdoctorants, Katsushi Kagaya (aujourd'hui au laboratoire Seto de biologie marine, au Japon), a montré que la squille fait varier sa vitesse de frappe en modifiant



LES SQUILLES RAVISSEUSES,

ici *Lysiosquilla sulcata*, sont des prédateurs qui harponnent des poissons au déplacement rapide. Bien que leurs proies soient plus rapides que les escargots, leurs appendices bougent à une vitesse et avec une accélération très inférieures à celles des crevettes-mantes briseuses d'escargots. Cela traduit le nécessaire compromis entre la rapidité de la préparation du coup et sa puissance.

© Avec l'aimable autorisation de Roy Caldwell

APERÇU DE L'ULTRARAPIDITÉ DANS LE MONDE VIVANT

Les organismes ultrarapides, telles les squilles et les fourmis à mâchoires-pièges, exécutent des mouvements bien plus rapides qu'un clignement d'œil ou que la course d'un guépard. Les cellules urticantes des méduses, ou cnidocytes, occupent la première place au palmarès de la brièveté et de l'accélération.

DURÉE	VITESSE	ACCÉLÉRATION (ordre de grandeur)
0,7 microseconde (μs) • Cnidocytes (cellules urticantes des méduses)	67 mètres par seconde (m/s) • Mandibules des fourmis à mâchoires-pièges • Mâchoires de termite	10^7 mètres par seconde carrée (m/s^2) • Cnidocytes
10 μs • Spores fongiques		$10^6 m/s^2$ • Mandibules des fourmis à mâchoires-pièges
25 μs • Mâchoires de termite	58 m/s • Plongeon du faucon gerfaut	$10^5 m/s^2$ • Squille frappeuse • Spores fongiques
100-300 μs • Mandibules des fourmis à mâchoires-pièges • Fermeture du piège des utriculaires (plantes carnivores souvent aquatiques)	37 m/s • Cnidocytes	$10^3 m/s^2$ • Squille ravisceuse • Aspiration exercée par le piège de l'utriculaire
1 à 6 millisecondes • Frappe d'une squille	31 m/s • Squille frappeuse	$10^2 m/s^2$ • Poisson en fuite • Coup de calmar • Saut de criquet
10 millisecondes • Saut de criquet	25-26 m/s • Course de guépard • Jet d'eau de crevette-pistolet	$10 m/s^2$ • Course de guépard • Saut de grenouille
0,1 seconde • Saut de grenouille	Environ 10 m/s • Coureur (humain) le plus rapide • Expulsion des spores de fougères	
0,3 seconde • Clignement d'œil	2-3 m/s • Spores fongiques • Saut de grenouille • Saut de criquet	

L'élément de base des muscles striés, le sarcomère, contient des filaments de myosine et d'actine (des protéines) qui, en se liant, engendrent la contraction. Avec des sarcomères plus longs, davantage de liaisons myosine-actine peuvent se former à un instant donné, et la force globale du muscle augmente. Cependant, le taux de formation de liaisons diminue. En effet, pour que chacune se fasse et que les myosines se déforment afin de réaliser la contraction, il faut de l'énergie, fournie par d'autres molécules. Par conséquent, plus les liaisons sont nombreuses, plus il faut renouveler ces molécules, ce qui prend du temps et se traduit par une contraction musculaire plus lente. En résumé, les sarcomères plus longs donnent lieu à une force musculaire plus importante, mais au prix d'une contraction plus lente.

Un compromis entre vitesse de réaction et vitesse de mouvement

Mettant à profit la diversité des appendices ravisceurs dans l'arbre de l'évolution des squilles, Marco Mendoza Blanco (un ancien étudiant) et moi avons montré comment le compromis universel entre force et vitesse de contraction d'un muscle se manifeste dans les systèmes ultrarapides.

Nous avons constaté que, ravisceuses ou frappeuses, les squilles avaient toutes des sarcomères longs (une dizaine de micromètres, contre environ 3 micromètres dans le muscle du poignet humain) dans le muscle qui arme les ressorts. Cependant, les squilles ravisceuses, qui chassent des proies fuyantes, ont des sarcomères jusqu'à 50 % plus courts que ceux des frappeuses. Bien que les données comportementales restent à recueillir, il semble que les frappeuses aient développé au fil de l'évolution des sarcomères plus longs, qui leur permettent de comprimer des ressorts plus puissants et donc d'asséner un coup puissant, mais au prix d'un armement plus lent du système.

Ainsi, les animaux les plus rapides ne seraient pas en mesure de charger leurs armes suffisamment vite pour capturer des proies en fuite. Paradoxalement, les prédateurs de proies fuyantes peuvent réagir plus rapidement, mais avec des mouvements plus lents. Dit simplement, cela prend plus longtemps d'être plus rapide, et tout système musculaire

l'activité musculaire pendant l'armement du ressort, mais une fois le coup amorcé, le mouvement est trop rapide pour que le système nerveux puisse l'ajuster.

Un autre compromis spécifique à la biologie pour les systèmes ultrarapides relève presque de la contradiction : il faut beaucoup de temps pour être ultrarapide. Si l'on revient au principe d'amplification extrême, ses caractéristiques essentielles sont l'énergie potentielle stockée (typiquement dans des ressorts) et la libération rapide de l'énergie (au moyen d'une gâchette). Cela signifie que l'énergie est stockée à l'avance et relâchée très rapidement. Pour les systèmes ultrarapides faisant appel à des muscles, ce compromis est flagrant : les muscles ne peuvent pas se contracter à la fois fortement et vite. Expliquons pourquoi.