

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.

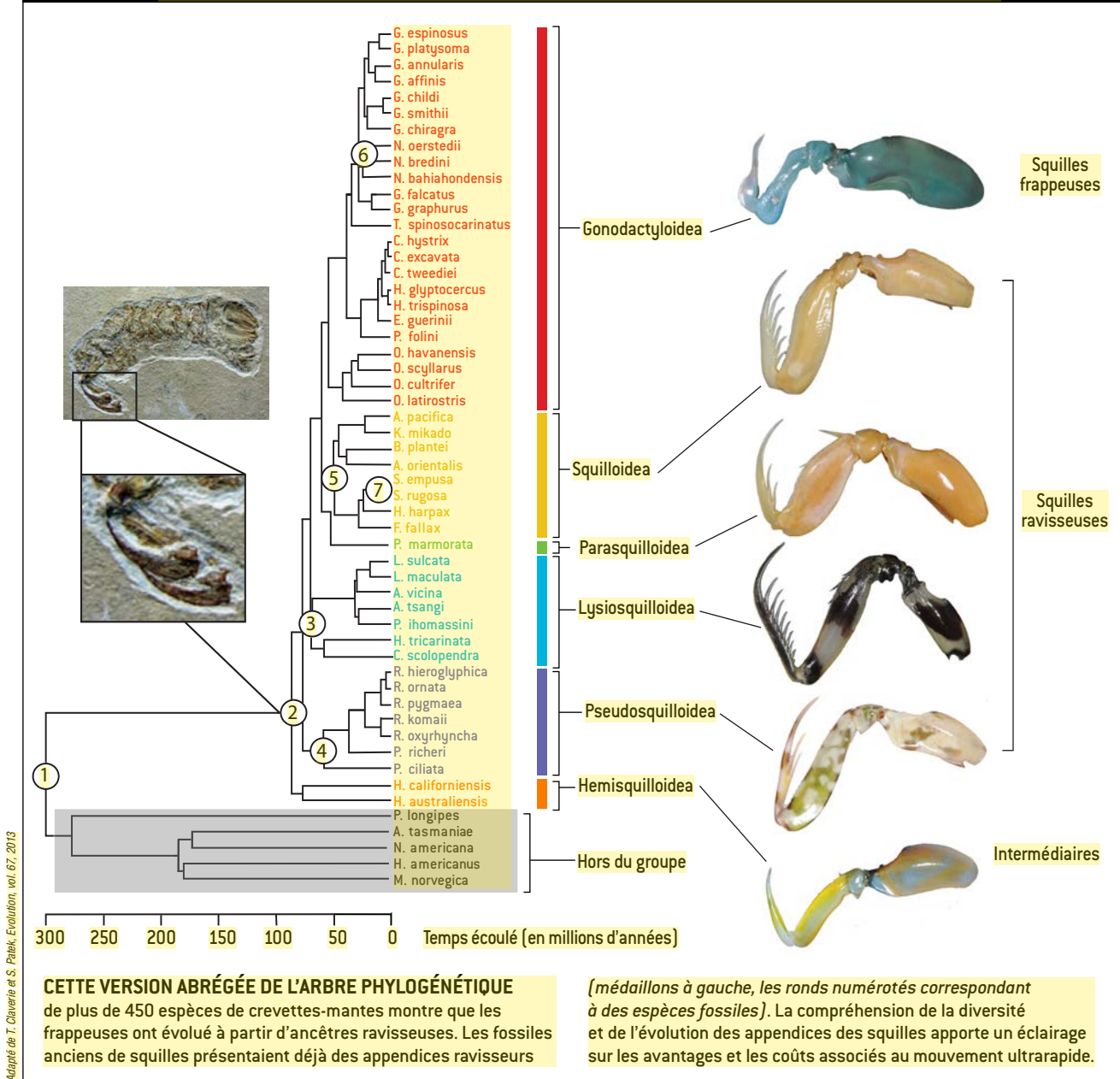
Nous avons constaté que, ravisceuses ou frappeuses, les squilles avaient toutes des sarcomères longs (une dizaine de micromètres, contre environ 3 micromètres dans le muscle du poignet humain) dans le muscle qui arme les ressorts. Cependant, les squilles ravisceuses, qui chassent des proies fuyantes, 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.

DES SQUILLES FRAPPEUSES APPARUES IL Y A 50 MILLIONS D'ANNÉES



ultrarapide sera confronté à ce nécessaire compromis au cours de la diversification évolutive, ce qui explique que les systèmes biologiques ultrarapides ne soient pas plus répandus.

Nos analyses de l'évolution de la morphologie des diverses espèces de squilles confirment que l'acquisition d'une cinématique extrême a un coût. Avec Thomas Claverie, aujourd'hui au Centre universitaire de formation et de recherche de Mayotte, nous avons établi que la morphologie des appendices des squilles frappeuses a changé plus lentement au fil de l'évolution que chez les autres crevettes-mantes.

En comparaison avec les squilles ravisseuses, on observe, associés à cette vitesse réduite, des changements plus étroitement coordonnés parmi les composants mécaniques des squilles frappeuses. Il est fort possible que les contraintes physiques du mécanisme ultrarapide chez les crevettes frappeuses aient réduit la variabilité inhérente de ces composants, limitant ainsi le potentiel de changements évolutifs. Un potentiel réduit de diversification évolutive représente un coût élevé, et constitue certainement un contrepoint à l'idée quelque peu naïve selon laquelle les systèmes ultrarapides seraient le *nec plus ultra* du design.



© Avec l'aimable autorisation de Roy Caldwell

LES COUPS PORTÉS PAR LES SQUILLES sont si puissants qu'il est dangereux pour elles de se battre. Les mâles et les femelles qui se disputent de la nourriture ou un territoire se frappent mutuellement leur queue cuirassée [leur telson] pour se mesurer. Ces démonstrations de force ritualisées permettent à ces crustacés d'éviter de porter des coups fatals.

■ BIBLIOGRAPHIE

P. S. L. Anderson et al., *Competing influences on morphological modularity in biomechanical systems: A case study in mantis shrimp*, *Evolution & Development*, vol. 18(3), pp. 171-181, 2016.

K. Kagaya et S. N. Patek, *Feed-forward motor control of ultrafast, ballistic movements*, *Journal of Experimental Biology*, vol. 219(3), pp. 319-333, 2016.

S. Cox et al., *A physical model of the extreme mantis shrimp strike: Kinematics and cavitation of Ninjabot*, *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 9, pp. 1-16, 2014.

T. Claverie et S. N. Patek, *Modularity and rates of evolutionary change in a power-amplified prey capture system*, *Evolution*, vol. 67(11), pp. 3191-3207, 2013.

J.-M. Courty et É. Kierlik, *Clac végétal et uppercut de crevette*, *Pour la Science*, n° 346, août 2006.

Le dernier compromis est peut-être le plus radical : les armes ultrarapides étant souvent mortelles, les populations et les espèces qui survivent à long terme sont celles dont les organismes ont développé des stratégies pour éviter ou réduire leur utilisation contre leurs congénères.

Là encore, notre modèle, la squille, apporte quelques leçons. Les squilles sont pour l'essentiel des organismes au corps mou, à l'exception de leurs appendices ravisseurs et de leur telson (leur queue aplatie et cuirassée), si bien qu'un coup bien dirigé a toutes les chances d'être létal.

Cependant, les squilles frappeuses règlent leurs conflits par un comportement ritualisé, où l'une frappe le telson de l'autre. Jennifer Taylor, actuellement à l'institut Scripps d'océanographie, a constaté que le marteau frappeur et le telson qui reçoit ses coups interagissent selon une dynamique semblable à celle d'une batte en frêne qui frappe une balle de baseball, et que l'énergie renvoyée au marteau dépend de la taille de l'animal visé. Il est donc possible que les squilles évaluent leurs tailles respectives grâce à ces duels ritualisés.

Depuis que nous avons obtenu les premières images des coups portés par la squille et commencé à mettre au jour les originalités des organismes ultrarapides, ce nouveau champ de la biologie est devenu un domaine pluridisciplinaire et particulièrement pertinent pour les systèmes humains et la conception technique.

Tandis que les recherches se poursuivent en espérant de nouvelles découvertes d'organismes ultrarapides, l'histoire évolutive de ces derniers éclaire des principes de conception technologique. En évoluant sur des millions d'années et en laissant derrière elles des vestiges fossiles qui documentent directement la diversification des appendices au fil du temps, les squilles offrent une expérience naturelle en conception de systèmes dans un large éventail de conditions historiques et actuelles, dans des habitats aussi divers que la boue, le sable et les coraux vivants, depuis les zones de balancement des marées jusqu'aux profondeurs océaniques.

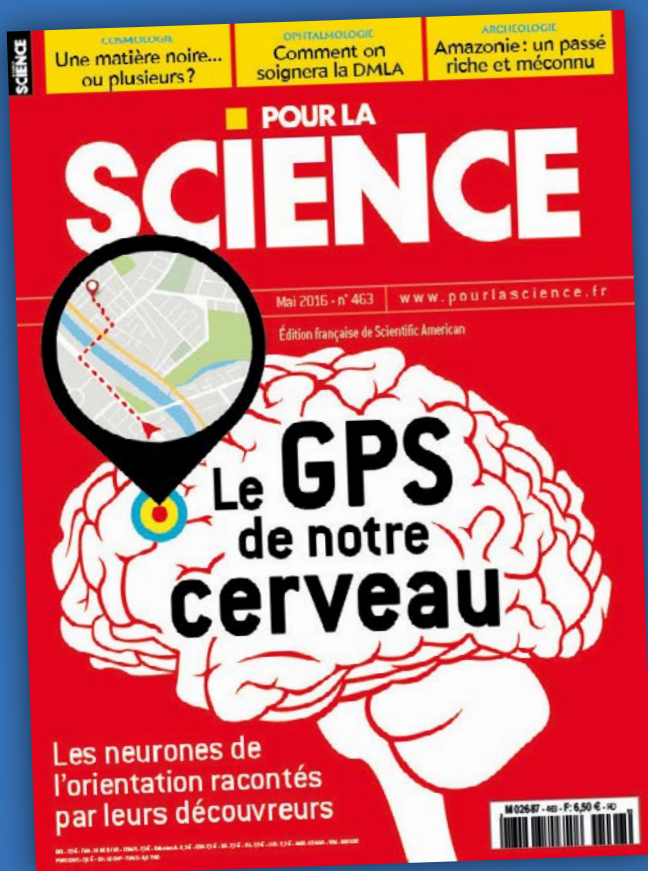
Biologie ultrarapide : une grande diversité

Les fourmis à mâchoires-pièges présentent elles aussi une extraordinaire diversité évolutive ; dans leur cas, au moins quatre origines évolutives indépendantes ont conduit à des mandibules ultrarapides, offrant donc tout un jeu de données qui rassemblent en parallèle les conditions d'apparition des mécanismes ultrarapides. De même, il existe de nombreuses espèces de champignons qui propulsent leurs spores, avec une diversité de formes susceptibles d'inspirer des systèmes artificiels de propulsion par gouttelettes. Et l'on trouve aussi une grande diversité chez les crevettes frappeuses, dans les cellules urticantes de méduses, etc.

De la dynamique comportementale des combats ritualisés à la lutte contre les méfaits du phénomène de cavitation, ces organismes puissants quoique petits ont ouvert de nombreuses fenêtres inattendues sur la physique, l'évolution, l'ingénierie et l'écologie. ■

OFFRE DÉCOUVERTE

ABONNEZ-VOUS À ■ POUR LA SCIENCE



1 AN - 12 N^{OS}
59€

24%
d'économie

2 ANS - 24 N^{OS}
110€

29%
d'économie

3 ANS - 36 N^{OS}
159€

32%
d'économie

BULLETIN D'ABONNEMENT

SCIENCE

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en formule Découverte :**

- ☐ 1 an • 12 numéros • **59€** au lieu de 78,50€ (D1A59E)
- ☐ 2 ans • 24 numéros • **110€** au lieu de 157€ (D2A110E)
- ☐ 3 ans • 36 numéros • **159€** au lieu de 235,50€ (D3A159E)

MES COORDONNÉES

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

Tél. : _____

Pour le suivi client (facultatif)

MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Par carte bancaire

N° _____

Date d'expiration _____ Clé _____

Signature obligatoire



PAS465B

Mon e-mail pour recevoir la newsletter Pour la Science (à remplir en majuscule). _____@_____

Grâce à votre email nous pourrions vous contacter si besoin pour le suivi de votre abonnement. À réception de votre bulletin, comptez 5 semaines pour recevoir votre n° d'abonné. Passé ce délai, merci d'en faire la demande à pourlascience@abopress.fr

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 31/07/16 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science.