

façon dont les réseaux neuronaux récurrents traitent leurs entrées présente une certaine ressemblance avec la façon de fonctionner du cerveau. Les signaux qui se propagent parmi les neurones changent constamment à mesure que les entrées sensorielles sont traitées.

Un traitement dynamique

Les réseaux récurrents parviennent à prédire quel sera le mot suivant dans une phrase et peuvent ainsi produire une nouvelle séquence de mots, l'un après l'autre. Ils peuvent aussi s'atteler à des tâches plus complexes. Après avoir « lu » tous les mots d'une phrase, le réseau est à même de deviner le sens de la phrase entière. Un réseau récurrent distinct peut alors utiliser le traitement sémantique du premier réseau pour traduire la phrase dans une autre langue.

La recherche sur les réseaux neuronaux récurrents a connu sa propre période de stagnation à la fin des années 1990 et au début des années 2000. Mes propres travaux théoriques suggéraient qu'ils rencontreraient

des difficultés à apprendre à récupérer de l'information du passé lointain, à savoir les premiers éléments de la séquence en cours de traitement (un peu comme si vous essayiez de réciter les premières phrases d'un livre alors que vous venez d'atteindre la dernière page). Mais certains de ces problèmes ont été résolus grâce à des techniques consistant à stocker l'information de façon à ce qu'elle persiste durablement. Ces réseaux neuronaux utilisent la mémoire temporaire (mémoire cache) d'un ordinateur pour traiter des informations multiples et dispersées, comme des idées contenues dans différentes phrases réparties au fil d'un document.

Le retour en force des réseaux neuronaux à apprentissage profond après le long sommeil de l'intelligence artificielle n'est pas uniquement un triomphe technique. C'est aussi une leçon de sociologie des sciences. En particulier, il souligne la nécessité de soutenir des idées qui font fi du *statu quo* technologique et d'encourager la tenue d'un portefeuille de recherches diversifié, laissant de la place à des champs provisoirement passés de mode. ■

BIBLIOGRAPHIE

Y. LeCun *et al.*, **Deep learning**, *Nature*, vol. 521, pp. 436-444, 2015.

Y. Bengio *et al.*, **Representation learning: A review and new perspectives**, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 35(8), pp. 1798-1828, 2013.

A. Krizhevsky *et al.*, **ImageNet classification with deep convolutional neural networks**, *26th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2012)*, 2012.

SUR LE WEB

Cours de Yann LeCun au Collège de France, 2015-2016 : <https://www.college-de-france.fr/site/yann-lecun/index.htm>

PARTEZ EN CROISIÈRE DANS LES MERS DU MÉSOZOÏQUE

avec le 2^e hors-série *Espèces*

En kiosque mi-juillet 2016



À la lumière des dernières découvertes, les plus grands spécialistes vous proposent d'aller à la rencontre des contemporains marins des dinosaures. Découvrez la faune extraordinaire qui a régné pendant 185 millions d'années sur les océans du Trias, Jurassique et Crétacé.

Sous la direction de Nathalie Bardet et Peggy Vincent (MNHN), reconstitutions de Camille Renversade.

Revue trimestrielle dédiée
aux sciences de la Vie et de la Terre

www.especcs.org

84 pages – 8,90 €

Vente par correspondance www.bopresse.fr/especcs.htm

Tél. 05 65 81 54 86 / contact@bopresse.fr

Également disponible par abonnement, en PDF
et application smartphone/tablette

[f revue.Especcs](https://www.facebook.com/revue.Especcs)

<http://especcs-revue.blogspot.fr>

La frappe éclair



LES SQUILLES, OU CREVETTES-MANTES, sont des crustacés dotés d'appendices « ravisseurs », c'est-à-dire spécialisés pour la capture de proies. Cette squille multicolore (*Odontodactylus scyllarus*) arbore une paire d'appendices en marteau au moyen desquels elle brise les coquilles d'escargots marins.

de la crevette-mante

Sheila Patek

Dans le monde vivant, ce ne sont pas les guépards ou les poissons qui détiennent les records de vitesse ou d'accélération. Les crevettes-mantes, les cellules urticantes des méduses ou les mandibules de certaines fourmis font bien mieux. Parfois sans muscles !

L'ESSENTIEL

- Certains crustacés assènent avec leurs appendices des coups fulgurants, assez puissants pour fracasser des escargots marins.
- Ces frappes ultrarapides mettent en œuvre l'accumulation relativement lente d'énergie élastique, puis son relâchement brusque.
- De tels mécanismes se rencontrent chez quelques autres organismes.
- Des limitations qui leur sont inhérentes expliquent pourquoi ils ne sont pas plus répandus.

© Shin Okamoto/Shutterstock.com

Il y a une dizaine d'années, quand j'étais postdoctorante dans le laboratoire de Roy Caldwell, à l'université de Californie à Berkeley, j'ai commencé à étudier la squille multicolore (*Odontodactylus scyllarus*), nommée aussi crevette-mante paon. C'est un crustacé prédateur qui fracasse les escargots marins au moyen d'un appendice en forme de marteau.

Son comportement était fascinant à observer. La squille palpe l'escargot, le fait tourner en tous sens et le met en position. Juste avant de lui porter un coup, elle touche la surface de sa coquille avec ses antennules, peut-être pour se faire une idée de la position et de la surface de sa cible. Après ce qui pourrait se comparer chez les humains à une grande inspiration avant un plongeon, la crevette-mante frappe. Le coup lui-même est trop rapide pour être distingué à l'œil nu, mais on entend un fort claquement, et des débris de coquille apparaissent sur le substrat.

Et le cycle recommence : palpation, manipulation, positionnement, toucher, « inspiration », et un autre coup invisible mais bien audible. Quand le mollusque est dépouillé de sa coquille et que la crevette-mante peut enfin le déguster, le silence s'installe dans l'aquarium.

En fait, j'étais témoin de l'un des mouvements les plus rapides du monde vivant. Après une difficile quête pour accéder à un système d'imagerie rapide, j'ai enfin pu filmer au ralenti les coups de la squille. Les images étaient si extraordinaires que j'ai immédiatement su que nous étions tombés un peu par hasard sur un phénomène tout à fait hors norme. Les mouvements s'étendaient sur quelques images seulement, alors que

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

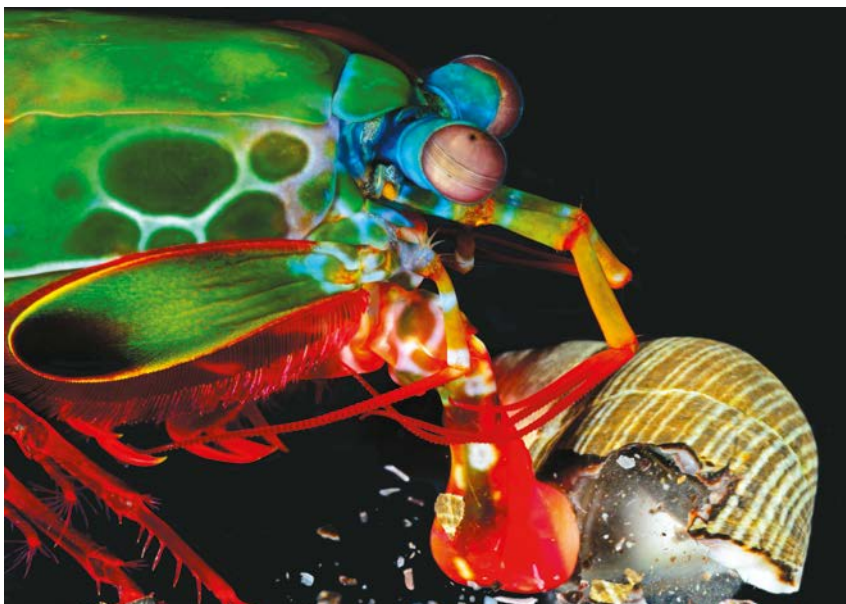
■ L'AUTEURE



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 ravisseurs 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 ravisseur. 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



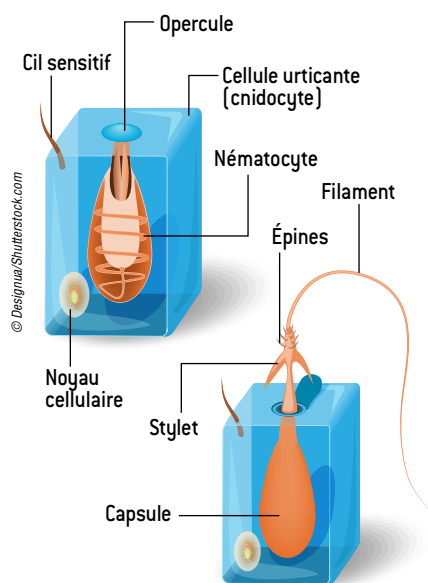
ont montré une autre caractéristique remarquable : la formation d'une grosse bulle entre le marteau de la squille et sa proie, puis son implosion. C'est la source première des bruits secs entendus au laboratoire. Il s'agit du phénomène dit de cavitation, qui se produit lors de mouvements très rapides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



et celles engendrées par l'implosion de la bulle de cavitation. Nous avons ainsi mis en évidence que chaque coup de marteau de la squille est double: il y a d'une part l'impact mécanique, d'autre part l'impact des ondes de pression dues à l'implosion de la bulle de cavitation. Les forces atteignent 400 à 1 500 newtons pour l'impact mécanique, et les forces de cavitation 500 newtons.

Un appendice qui tient le choc

Les puissants assauts de la squille contre les coquillages marins sont associés à un risque non négligeable pour le crustacé d'endommager son propre appendice. De fait, les coquilles d'escargots marins sont considérées comme l'un des matériaux biologiques les plus solides, et pourtant la squille parvient à les briser sans abîmer ses propres appendices.

Intrigués par cette capacité peu commune, David Kisailus, de l'université de Californie à Riverside, et ses collègues

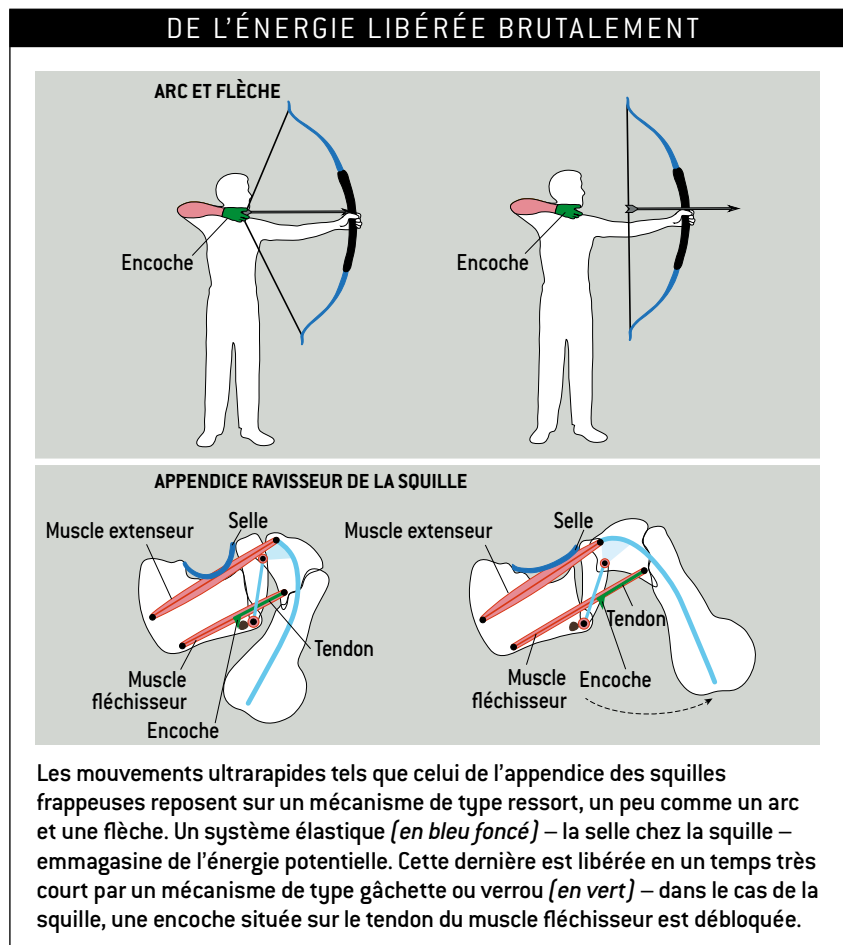
ont révélé la composition matérielle et l'arrangement structural du marteau qui rend possible cette remarquable performance. Ces chercheurs ont découvert que la couche externe du marteau est très dure et fortement minéralisée, principalement composée de phosphore concentré (par exemple du phosphate de calcium) et du matériau habituel des crustacés, le carbonate de calcium. Au sein du marteau, les matériaux sont disposés en couches successives, dont l'orientation tourne, architecture qui a pour effet de dissiper l'énergie et de concentrer les microfissures à l'intérieur de la structure plutôt qu'à sa surface.

Ces découvertes des principes structuraux de l'atténuation des fractures d'impact dans les appendices de la squille ont déjà inspiré de nouveaux matériaux résistants aux impacts. Toujours dans l'équipe de David Kisailus, des chercheurs ont utilisé de petits morceaux de matériaux à base de fibres de carbone et époxy et les ont façonnés en un arrangement hélicoïdal semblable à l'architecture du marteau de la squille. Ils ont alors testé la résistance à l'impact et à la fatigue du nouveau matériau, comparé au marteau de la squille à des échelles de taille similaires. À terme, on pourrait utiliser les matériaux inspirés par les squilles dans des systèmes de protection alliant légèreté et résistance à des impacts d'objets rapides.

Le coup de marteau a un coût

En toute logique, tous les organismes auraient intérêt à avoir des capacités cinématiques extrêmes. Pourtant, les scientifiques ne connaissent qu'une poignée d'organismes ultrarapides. Une première explication à cela est tout bonnement que nous ne les avons pas encore tous découverts, entre autres parce que les mouvements ultrarapides sont invisibles à l'œil nu. Avant de filmer les squilles à l'aide de caméras à haute vitesse, nous n'avions aucune idée de leur rapidité réelle.

Les découvertes réalisées sur la squille nous ont poussés à rechercher d'autres organismes ultrarapides, ce qui a conduit aux études sur les fourmis à mâchoires-pièges, ainsi que sur le lancement quasi invisible de spores par certains champignons. Mais il est également probable qu'un ensemble de compromis guident et limitent la diversification



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

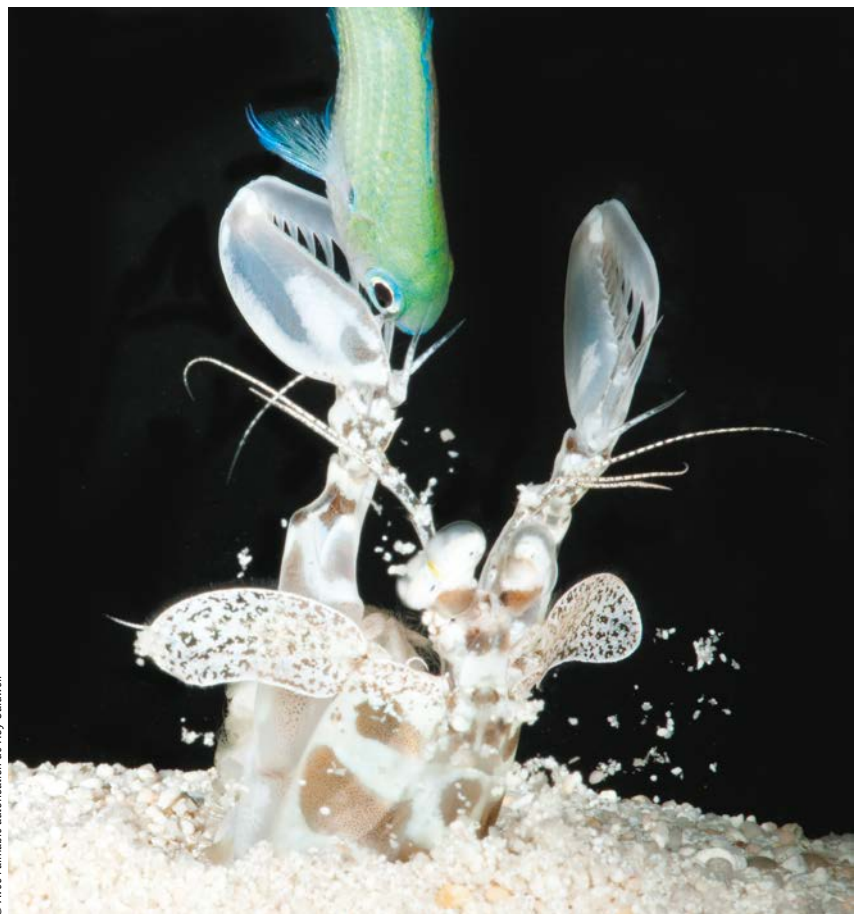
animaux ultrarapides ne chassent-ils pas des proies qui fuient ?

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'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 ravisseuse • 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 ravisseurs 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.

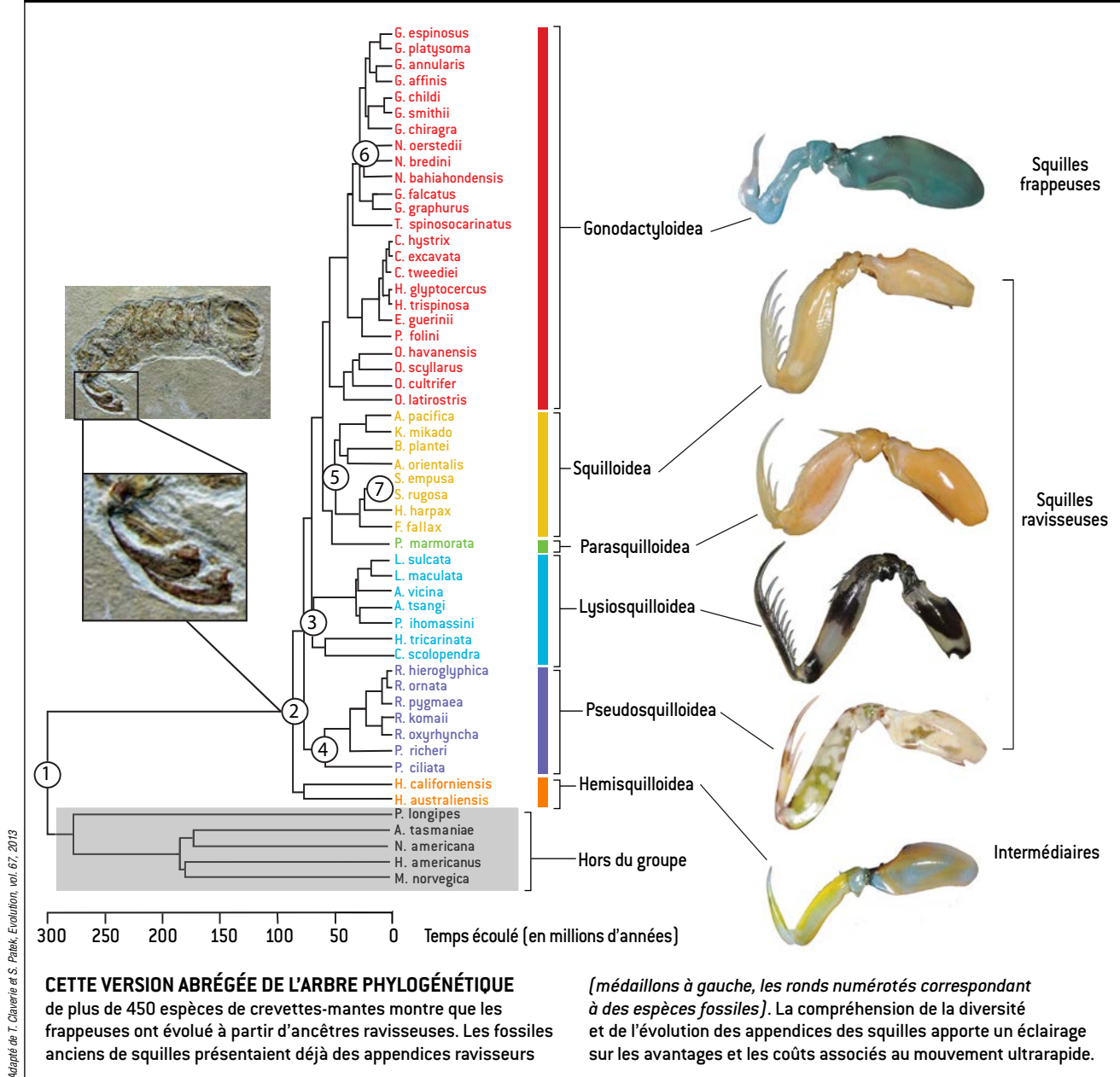
Nous avons constaté que, ravisseuses ou frappeuses, les squilles avaient toutes des sarcomères longs (une dizaine de micromètres, contre environ 3 micromètres dans le muscle du poignet humain) dans le muscle qui arme les ressorts. Cependant, les squilles ravisseuses, qui chassent des proies fuyantes, 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 aplatée et cuirassée), si bien qu'un coup bien dirigé a toutes les chances d'être léthal.

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.

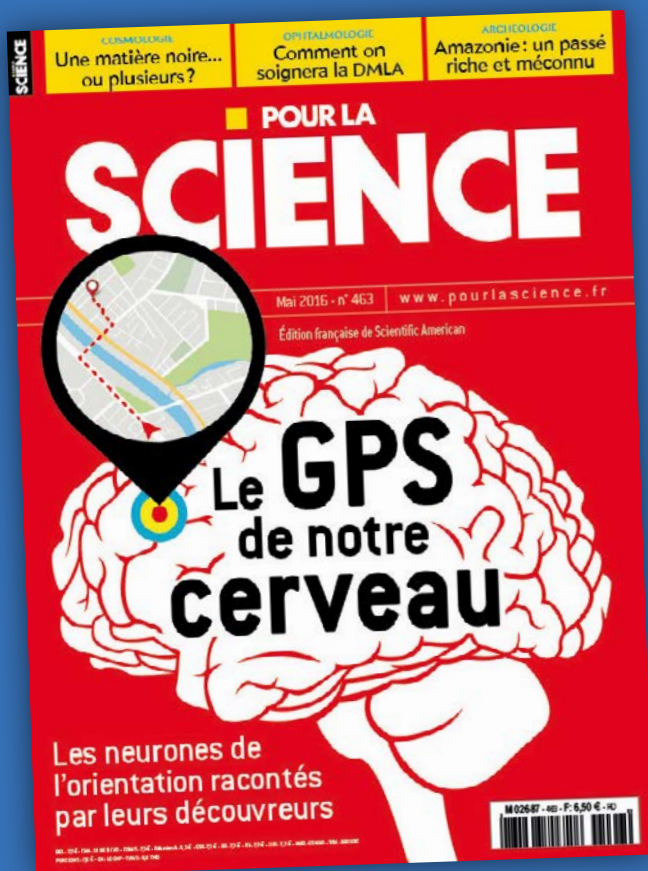
Biologie ultrarapide : une grande diversité

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

POUR LA 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.