

Physique et lancer

Franck Celestini⁽¹⁾ et Christophe Raufaste^(1, 2) (Christophe.Raufaste@univ-cotedazur.fr)

(1) Institut de Physique de Nice (Université Côte d'Azur et CNRS), 17 rue Julien Lauprêtre, 06200 Nice

(2) Institut Universitaire de France, 103 Boulevard Saint-Michel, 75005 Paris

La capacité de lancer à main nue avec précision et vitesse est étroitement liée à notre évolution darwinienne. Cet article explore la physique et la biomécanique de cette aptitude, mettant en lumière les mécanismes qui permettent la transmission efficace de l'énergie cinétique du lanceur au projectile. Nous examinons les implications de ces mécanismes dans les performances sportives, les records associés, la compréhension de la nature, et les applications potentielles en robotique et en ingénierie.

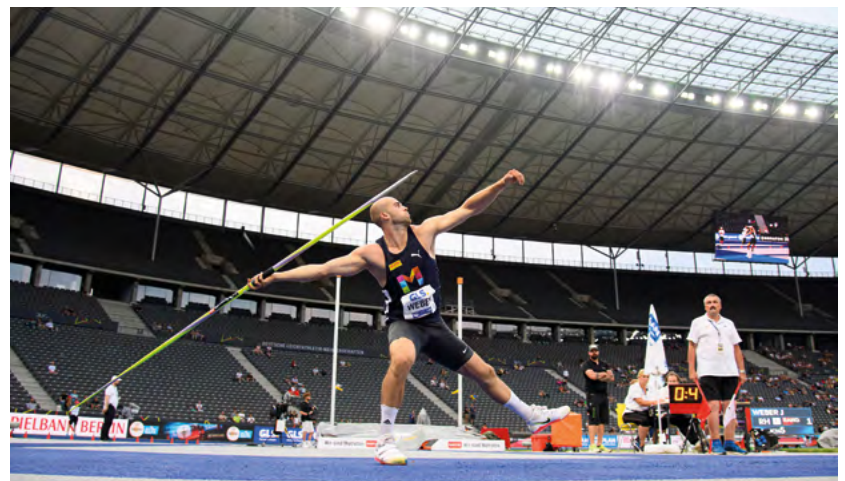
Comprendre la science derrière le lancer offre des perspectives fascinantes sur les capacités humaines et met en lumière des enjeux en lien avec de nombreux domaines.

Introduction : évolution de l'homme et lancer

Le lancer : une capacité propre à l'homme

L'aptitude à effectuer un lancer avec précision et vitesse est vraisemblablement apparue il y a deux millions d'années chez nos ancêtres du genre *Homo*. Cela leur procura un avantage évolutif permettant de chasser à distance, plus efficacement et avec moins de risques. Cet attribut leur permit de pallier le fait que l'homme moderne et ses ancêtres ne sont pas pourvus d'armes naturelles comme des griffes ou des crocs, et ne sont pas spécialement rapides à la course ni habiles pour grimper aux arbres, pour attaquer ou se défendre.

Les preuves s'accumulent sur l'importance du lancer et des armes dès la préhistoire : la première apparition d'un bâton de jet semble dater de trois cent mille ans, attestant des évolutions techniques chez les chasseurs-cueilleurs au cours du paléolithique [1], alors que la première preuve attestée d'un équipement à assistance mécanique tel que l'arc date d'il y a 54 000 ans, coïncidant avec les premières migrations de l'homme moderne dans les territoires occupés alors par l'homme de Néandertal [2]. La maîtrise d'armes



Julian Weber, champion d'Europe, au lancer du javelot lors du championnat d'athlétisme d'Allemagne à Berlin en 2022.

plus sophistiquées aurait ainsi joué un rôle déterminant pour la survie d'une espèce au détriment d'une autre. À partir de l'Antiquité, l'homme fait évoluer cette aptitude vers la fabrication et l'utilisation de machines de guerre telles que les catapultes, trébuchets et canons, qui ont joué ensuite un rôle important dans l'histoire.

Lancers et records

Si, de nos jours, les aptitudes humaines au lancer n'ont plus le rôle primordial qu'elles eurent tout au long de l'évolution de l'homme, elles n'en restent pas moins un sujet de fascination comme l'attestent les nombreux records, environ 13 000 à l'heure actuelle, associés au mot "throw"

(« lancer » en anglais) dans le *Livre Guinness des records* [3]. Ceux-ci sont principalement associés à des exploits de distance, de précision et/ou encore de fréquence de répétition. En ce qui concerne le sport, les épreuves de lancer à main nue sont désormais omniprésentes et multiformes. Si les épreuves furent restreintes au lancer individuel (javelot et disque) dans les jeux antiques, le lancer fait désormais partie des actions essentielles dans de nombreux sports collectifs comme le baseball, le cricket, le football américain, le water-polo ou encore le handball. Malgré cette diversité de disciplines, un constat surprenant émerge lorsque l'on examine les records de vitesse associés aux différents

>>>

>>>

projectiles utilisés. Bien que la masse des projectiles varie sur deux ordres de grandeur, de la centaine de grammes pour une balle de baseball à près de 10 kg pour le poids, la différence de vitesse entre les deux extrêmes n'est que d'un facteur 5, allant typiquement de 50 m/s pour la balle de baseball lancée à la main à 10 m/s pour le poids (fig. 1).

Analyse énergétique

Bien que les petits projectiles soient généralement lancés à des vitesses plus élevées, une analyse énergétique révèle une tendance inverse. En utilisant la masse et la vitesse du projectile, nous pouvons calculer son énergie cinétique au moment du lâcher. De plus, si l'on considère que l'énergie du lancer est fournie par les muscles, dont la masse est globalement proportionnelle à celle de la personne, nous pouvons réévaluer l'énergie cinétique du projectile en la ramenant à un lanceur de cent kilos à l'aide d'une simple règle de proportionnalité. Ce réajustement prend en compte la spécificité de chaque sport à travers la masse du lanceur uniquement. Ceci peut sembler réducteur et est valable au premier ordre seulement, surtout que la correction est faible étant donné qu'il n'y a typiquement qu'un

facteur 2 entre les masses des lanceurs de balles de baseball et de poids. Néanmoins, il permet de faire ressortir que l'énergie cinétique du projectile ainsi recalculée augmente globalement avec sa masse et semble atteindre un plateau autour de 600 J pour des masses supérieures au kilogramme (fig. 1). Seulement 150 J peuvent être fournis dans des sports tels que le baseball et le water-polo, alors que le lanceur de poids peut en transmettre jusqu'à quatre fois plus !

Biomécanique du lancer

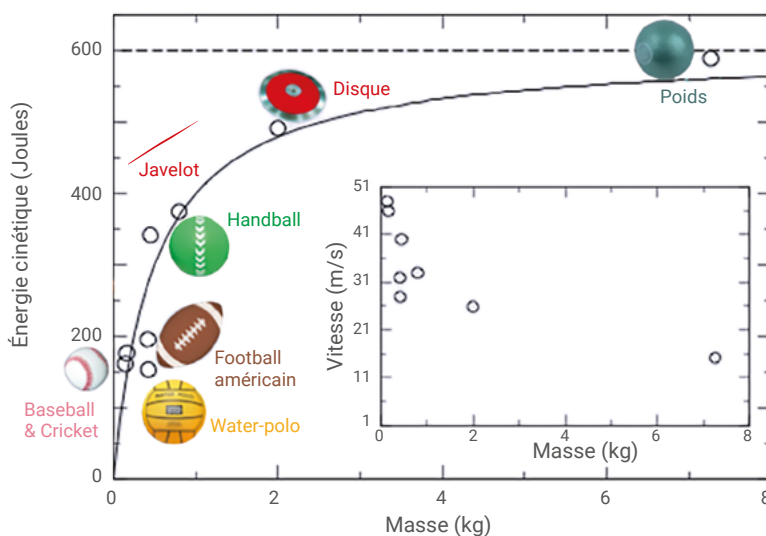
Activation séquentielle des articulations et rôle de l'élasticité des tendons

Pour comprendre ces observations, il faut se pencher sur la biomécanique du lancer. Un bon lancer sollicite la majeure partie des membres de notre corps et active l'ensemble des muscles, des jambes jusqu'aux bras [4]. Cette activation est séquentielle, commençant par les membres inférieurs et se propageant jusqu'aux membres supérieurs, tandis que l'énergie est accumulée par le travail des muscles successifs et est transmise d'un membre à l'autre par un mouvement de rotation au niveau des articulations (fig. 2).

Il est crucial de noter que ce mécanisme de transmission découle d'un long processus d'évolution biologique et repose sur le rôle essentiel des tendons, qui agissent comme des ressorts pour stocker transitoirement l'énergie sous forme élastique. Prenons l'exemple de l'articulation de l'épaule : son élasticité permet d'emmagasiner l'énergie fournie par le torse pour la restituer sous forme de couple moteur au bras. En termes d'ordre de grandeur, l'épaule peut atteindre en quelques dizaines de millisecondes seulement une vitesse de rotation typique de 10 000 degrés par seconde, soit une valeur comparable aux vitesses observées dans les ventilateurs d'ordinateur ou les machines à laver les plus rapides ! Ces capacités uniques ne se retrouvent pas chez les autres primates, en particulier chez nos proches cousins les chimpanzés, car elles sont liées aux propriétés particulières de rotation de l'épaule et de flexion du coude que l'homme a développées au fil de son évolution biologique. Ces particularités rendent possible une transmission et une amplification fluides de l'énergie, ainsi qu'un mouvement quasi rectiligne, lui permettant de lancer avec force et précision. C'est le cas notamment dans des sports tels que le baseball, le cricket, le football américain, le water-polo et le handball. En revanche, dans le cas des lancers du disque et du poids pour lesquels la précision n'est pas aussi critique, le projectile est soumis à une trajectoire moins rectiligne lors de son accélération.

Modèle simple de lanceur

Pour expliquer la tendance observée en fonction de la masse du projectile, nous considérons un modèle simple du lanceur [5]. En première approximation, nous considérons que notre corps peut mobiliser une énergie E_0 , et qu'au moment du lâcher, toutes les articulations ont appliqué successivement leur couple moteur, laissant seulement le coude en action. Ainsi, le lanceur peut être représenté par un actionneur mécanique ayant une masse interne M_0 qui se déplace à la même vitesse que le projectile au moment du lâcher. Lorsque le projectile de masse m et de vitesse V est libéré, les deux masses sont en mouvement et seule une fraction



1. Vitesse du projectile et son énergie cinétique réévaluée pour un lanceur de 100 kg, en fonction de la masse du projectile. Les points concernent les records de vitesse enregistrés pour les sports suivants : baseball, cricket, football américain, water-polo, handball, lancer de javelot, lancer du disque et lancer du poids. La ligne continue correspond au modèle des pages 8 et 9, avec $E_0 = 600$ J et $M_0 = 0,5$ kg.



© Erik Lesser/The New York Times-REDUX-REA

2. Décomposition du mouvement d'un lanceur au baseball illustrant l'activation séquentielle des articulations.

$E_c(m) = E_0 [m/(m+M_0)]$ de l'énergie est transférée au projectile, le reste étant emmagasiné sous forme d'énergie cinétique de la masse interne. En ajustant les données des records, nous constatons que ce modèle simple reproduit la tendance observée, avec des valeurs approximatives de E_0 autour de 600 J et de M_0 autour du kilogramme, que nous pouvons attribuer à l'avant-bras qui se déplace avec le projectile au moment du lâcher. Sachant que l'activation séquentielle des articulations dure environ 200 ms, un athlète peut ainsi fournir une puissance mécanique moyenne de l'ordre de 3 kW pendant son effort.

Problématique des projectiles légers

Ce modèle simplifié nous éclaire sur la biomécanique sous-tendant la capacité humaine à lancer. Il met en évidence que l'homme est adapté pour projeter des objets dont la masse est de l'ordre du kilogramme, alliant ainsi force et précision. Les projectiles légers peuvent certes être lancés à des vitesses plus élevées, mais cela se fait au détriment de l'efficacité énergétique et comporte des risques de blessures. En effet, dans le cas des projectiles légers, une part significative de l'énergie est absorbée par la masse interne du lanceur, ce qui peut conduire à des lésions au niveau des muscles et tendons. Il est ainsi déconseillé d'essayer d'établir des

records de vitesse en effectuant un lancer à main nue avec des balles de ping-pong (2,7 g) ou de squash (environ 25 g).

Recours à des instruments

Cependant, l'ingéniosité humaine a permis de contourner ces limitations en développant des instruments capables de transmettre efficacement l'énergie pour des projectiles légers. Le record absolu de vitesse pour un objet lancé a été établi à l'aide d'une *chistera* en utilisant un effet de levier. Celui-ci permet de réduire de manière effective la masse interne en augmentant la distance entre la balle et l'axe de rotation de l'articulation. Une balle pesant entre 125 et 140 g a ainsi été propulsée à près de 85 m/s (306 km/h). En termes d'énergie cinétique, cela correspond à environ trois fois celle du lancer de la balle de baseball qui a une masse équivalente, et à l'ordre de grandeur atteint par les lanceurs de disque. Notez que l'utilisation de cet effet de levier remonte à l'homme préhistorique qui utilisait déjà le propulseur il y a 20 000 ou 30 000 ans pour accroître la vitesse d'objets légers, typiquement la centaine de grammes, tels que des sagaies [6].

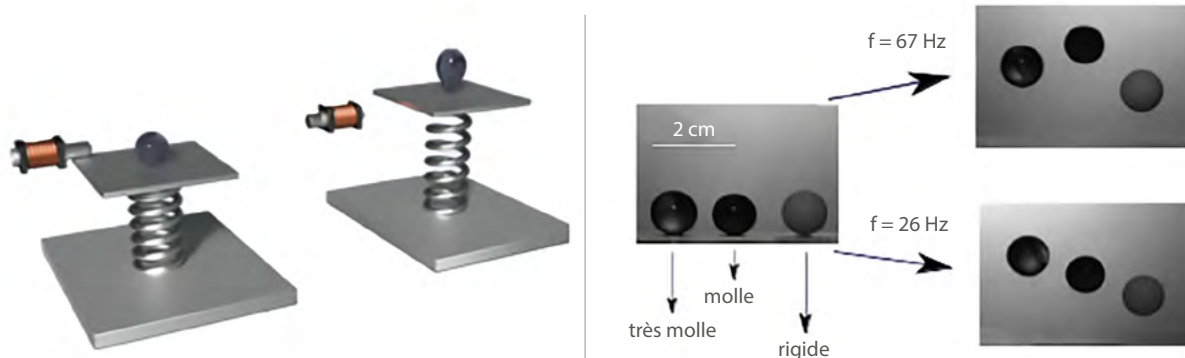
Spécificité de chaque sport

Cette analyse pose les bases physiques et biomécaniques permettant d'évaluer l'ordre de grandeur des performances atteignables pour chaque sport. Cependant, chaque sport possède ses

propres spécificités (en plus de la masse du projectile), telles que la forme et la prise de l'objet, la présence ou non d'une course d'élan, le type d'appui, ainsi que le compromis entre vitesse et précision. Le rôle de la technique et de la préparation physique est crucial, en plus des considérations anatomiques, pour faire la différence, souvent inférieure au pourcent, par rapport aux résultats des concurrents.

L'évolution des performances dans certains sports est également associée à des innovations techniques ou à des ajustements de style. Par exemple, dans le lancer du poids, Parry O'Brien a dominé la discipline dans les années 1950 après avoir inventé la technique en translation dos tourné au butoir. Bien qu'encore utilisée aujourd'hui, elle a été supplantée depuis les années 1990 par la technique de lancer en rotation dans l'établissement des meilleures performances. De même, le lanceur Ryan Crouser a récemment introduit un geste connu sous le nom de "Crouser slide", lui permettant de gagner encore quelques centimètres sur les records précédents. Dans le cas du lancer du javelot, c'est un mouvement en rotation, bien que non homologué, qui a permis à Félix Erausquin en 1956 de lancer un javelot à plus de 100 mètres pour la première fois. Ces exemples soulignent l'importance de la technique et de l'adaptabilité dans la quête de performances exceptionnelles.

>>>



© Bernard Gay-Para/CNRS

3. Éjection de projectiles déformables et élastiques.

À gauche : principe du lanceur artificiel permettant de lancer des objets à la verticale. Varier la raideur du ressort permet de varier la fréquence de sollicitation.

À droite : lancer de balles centimétriques de rigidités différentes – les deux balles de gauche sont faites en hydrogel, dont le degré d'hydratation est ajusté pour varier les propriétés élastiques. La hauteur maximale atteinte, visible sur les photos de droite, renseigne sur le gain propulsif. En variant la fréquence de l'actionneur, on voit que l'on peut sélectionner la balle que l'on veut rendre superpropulsive.

>>>

Applications et biomimétisme

Applications en robotique

L'importance de l'élasticité des tendons chez les animaux vertébrés a été mise en évidence pour comprendre des comportements remarquables tels que le galop des chevaux ou le saut des batraciens. Chez les insectes, d'autres éléments élastiques permettent d'expliquer les sauts disproportionnés observés chez les cicadelles ou certains coléoptères tels que les taupins. En s'inspirant de la locomotion dans le règne animal, on peut concevoir de nouvelles applications en robotique basées sur l'intégration d'éléments élastiques dans la structure mécanique des robots. Certains robots peuvent ainsi reproduire des mouvements dynamiques et agiles, tels que les mouvements ultra-rapides des pinces des crevettes-mantes ou les sauts avec rebonds de certains primates tels que les galagos [7]. Cette approche biomimétique ouvre de nouvelles possibilités pour le développement de robots capables d'effectuer une large gamme de mouvements et d'actions.

Superpropulsion de projectiles déformables restituant l'énergie mécanique

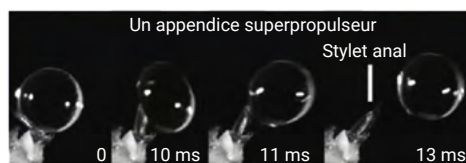
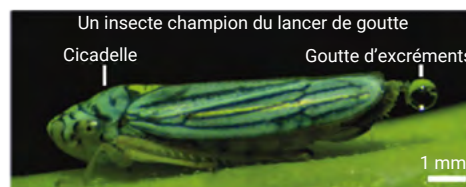
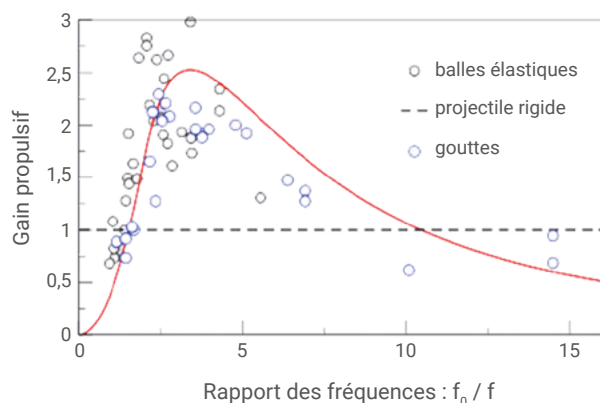
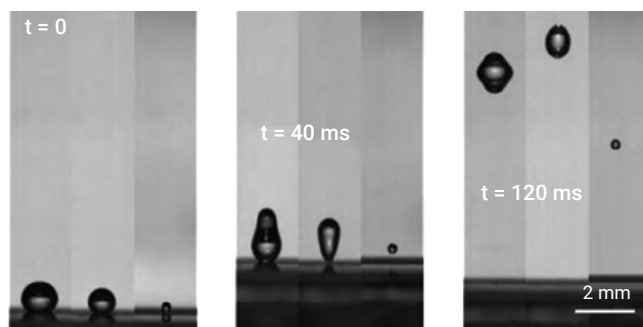
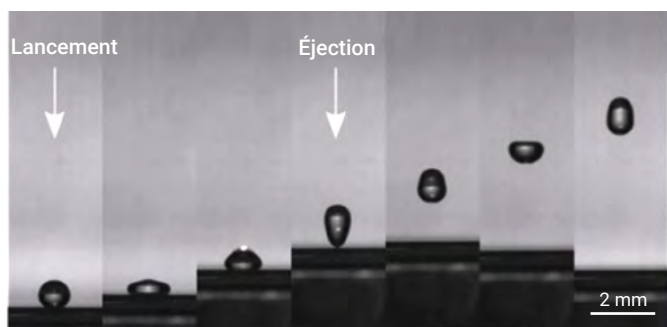
Revenons au lancer chez l'homme. Il est possible de s'inspirer du rôle

déterminant de l'élasticité dans la transmission de l'énergie mécanique pour pallier le problème rencontré lors du lancer à main nue des objets de petite masse. L'idée est de modifier la structure même du projectile pour le rendre déformable. Ceci lui permet d'emmagasiner transitoirement une quantité importante d'énergie sous forme élastique, avant qu'elle ne soit restituée sous forme d'énergie cinétique du centre de masse juste avant l'éjection. On réalise ainsi l'adaptation d'impédance mécanique qui fait défaut.

À l'Institut de Physique de Nice, un lanceur artificiel fut conçu pour tester les propriétés d'éjection de projectiles déformables et élastiques, comme des balles d'hydrogel (fig. 3). De façon remarquable, ces projectiles peuvent repartir avec un gain propulsif de l'ordre de 250 %, soit environ 2,5 fois l'énergie cinétique d'un projectile rigide équivalent de même masse [8]. Pour obtenir cette superpropulsion, le projectile doit être sollicité avec une fréquence caractéristique de l'ordre de sa fréquence propre de déformation, correspondant à une résonance « à un seul coup ». Cet effet peut se transposer à d'autres systèmes, en accordant les fréquences caractéristiques du lanceur et du projectile. De plus, l'ajout d'une couche élastique à un projectile initialement rigide permet d'obtenir cet accord et les performances qui en découlent.

Les insectes champions de lancer de gouttes

Cet effet peut *a priori* s'appliquer à tout projectile capable d'emmagasiner de l'énergie mécanique pour la restituer sous forme d'énergie cinétique. Même les gouttes d'eau millimétriques ou submillimétriques peuvent en bénéficier car, à leur échelle, les phénomènes de capillarité associés à la tension de surface leur permettent de se déformer en emmagasinant de l'énergie sans dissipation significative. Les gouttes présentent ainsi des propriétés de déformation proches des solides élastiques : elles ont des modes propres de déformation ou alors peuvent rebondir sur des substrats superhydrophobes qui limitent l'adhésion et la dissipation au niveau du contact. Le lancer de gouttes avec un lanceur couvert d'une surface superhydrophobe permet de reproduire ce phénomène, pourvu que la fréquence propre caractéristique de la déformation des gouttes soit accordée avec celle du lanceur (fig. 4). De façon remarquable, la nature a su exploiter cet effet et certaines cicadelles l'utilisent pour évacuer leur énorme quantité d'urine, plusieurs centaines de fois leur masse par jour, sous forme de gouttelettes éjectées grâce à un appendice anal qui sert de catapulte [9]. Ces insectes minimisent l'énergie nécessaire à cette tâche fastidieuse en accordant la taille des gouttelettes et



© Elio J. Challita/Bhamia Lab

4. Lancer de gouttes. En haut : séquence d'images montrant l'accélération d'une goutte par un dispositif à surface superhydrophobe [8] ; accélération, déformation et hauteur maximale de trois gouttes de tailles différentes, la fréquence propre d'une goutte diminuant avec son rayon. En bas à gauche : le gain propulsif dépend du rapport entre la fréquence propre de la goutte et celle de l'actionneur ; à droite, certaines cicadelles exploitent l'effet superpropulsif pour éliminer efficacement leurs excréments, éjectés sous forme de gouttelettes par un appendice spécifique [9].

le mouvement de l'appendice d'après le critère de superpropulsion, garantissant ainsi une éjection optimale des gouttelettes.

Vers de nouveaux records

Si les cicadelles peuvent réaliser de telles prouesses avec des gouttelettes, il est légitime de se demander si cet effet peut être transposé au sport. On pourrait ainsi imaginer des balles de baseball superpropulsives qui compliqueraient la tâche des batteurs. Dans ce contexte, il serait naturel de s'interroger sur l'intérêt d'une telle modification et sur les conséquences d'une augmentation significative de la vitesse dans chaque sport de lancer. Dans de nombreux sports, les fédérations internationales fixent des contraintes pour éviter que les évolutions technologiques n'aient un effet prépondérant sur les performances humaines. Ce fut le cas ces dernières années avec les réglementations sur

les chaussures de course, dont les caractéristiques de la semelle, notamment l'épaisseur, sont désormais strictement encadrées.

Conclusion

En conclusion, le lancer est une capacité humaine intimement liée à notre évolution. Sa compréhension nous offre un aperçu fascinant des capacités physiques et de l'histoire de l'homme. L'étude de la physique et de la biomécanique du lancer révèle des mécanismes subtils qui ont des implications profondes dans les performances sportives, les records, la compréhension de la nature, et les applications en ingénierie et en robotique. Le simple geste de lancer est non seulement l'aboutissement de millions d'années d'évolution, mais il continue également d'alimenter notre curiosité, notre créativité et notre admiration. ■

Nous tenons à remercier Bernard Gay-Para pour la photo du lanceur artificiel, ainsi que Elio Challita et Saad Bhamla pour les photos des cicadelles et de la superpropulsion chez les insectes.



- 1• https://cutt.ly/nature_articles
<https://cutt.ly/science-et-vie-baton-archeologie>
- 2• <https://cutt.ly/science-org-doi-10-1126>
<https://cutt.ly/phys-org-news-2023-02>
- 3• www.guinnessworldrecords.com/
- 4• www.nature.com/articles/nature12267
<https://cutt.ly/sciencedaily-2013-06>
- 5• <https://doi.org/10.1119/1.1634964>
- 6• <https://cutt.ly/science-et-vie-arme-egalitaire>
<https://cutt.ly/science-et-vie-sport-prehistoire>
- 7• <https://cutt.ly/science-scirobotics>
<https://cutt.ly/futura-sciences-salto-petit-robot>
- 8• <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.108001>
et <https://cutt.ly/physics-aps> ou
<https://cutt.ly/science-vie-gouttes-superpropulsion>
- 9• www.nature.com/articles/s41467-023-36376-5
et <https://cutt.ly/super-fast-insect-urination> ou
<https://cutt.ly/sciencesetavenir-catapulte-a-urine>