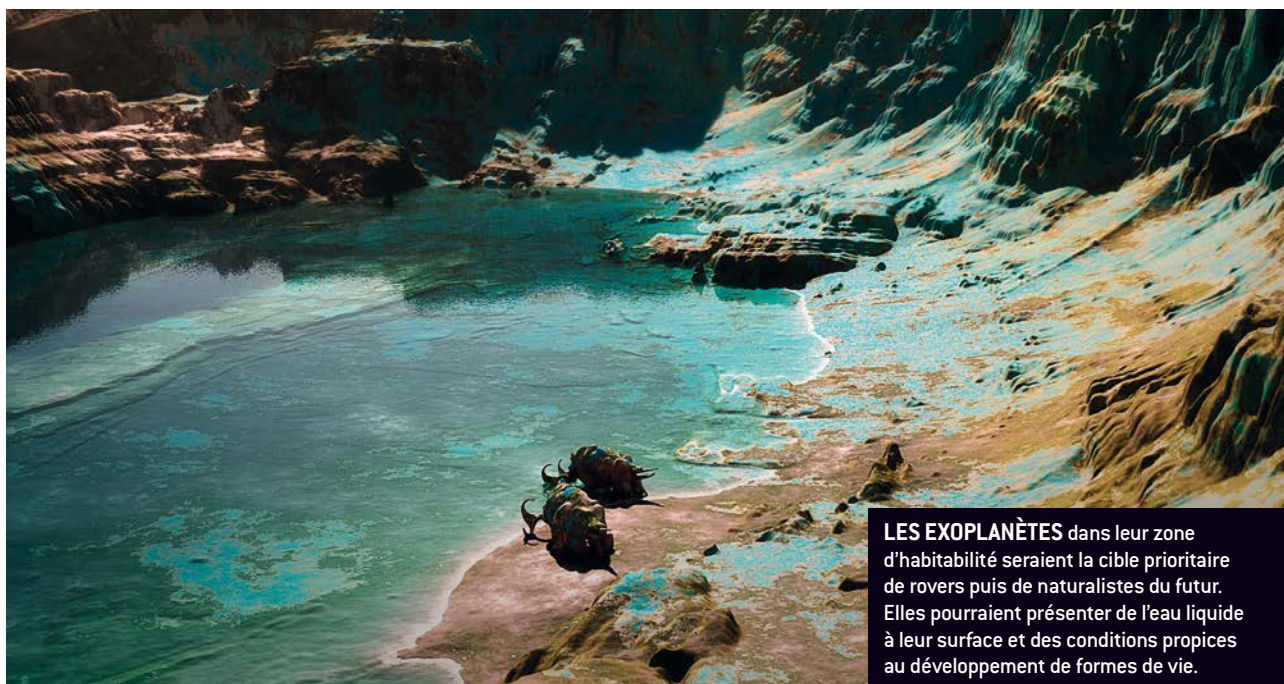




LES EXOPLANÈTES dans leur zone d'habitabilité seraient la cible prioritaire de rovers puis de naturalistes du futur. Elles pourraient présenter de l'eau liquide à leur surface et des conditions propices au développement de formes de vie.

organisme mosaïque où se résume l'inouïe diversité de l'Univers. » Cette impressionnante station héberge en effet des espèces très variées comme les Rours, sortes de limaces intelligentes mais toxiques, ou les Zools, humanoïdes bleus aux oreilles pointues, chargés de la maintenance. Point Central étant censé regrouper toutes les civilisations présentes dans l'Univers, c'est le lieu idéal pour en faire le recensement. D'ailleurs, au fil des 46 pages de l'album, les auteurs n'illustrent pas moins de 72 espèces différentes (humains compris), représentées par environ 400 individus ; un réel travail encyclopédique.

Dans l'univers *Star Wars*, notre enquêteur se rendrait tout naturellement à la cantina de Mos Eisley, sur la planète Tatooine. Cet établissement peu fréquentable est le lieu de passage obligé de nombreux pilotes, mais aussi de trafiquants, bandits de grands chemins et autres chasseurs de primes venus des quatre coins de la galaxie. Ainsi, tout lieu de rencontre serait propice à cette étude : la taverne interstellaire de Maz Kanata, vieille amie de Yoda installée sur la planète Takodana, ou le très officiel sénat galactique, sur la planète Coruscant. Mais il faut garder à l'esprit que cette concentration d'espèces différentes n'est pas forcément représentative de la diversité locale. Par exemple, les habitants de la planète Naboo, représentés par la reine Amidala, ne sont pas tous des humanoïdes intelligents. Dans les études sur la biodiversité terrienne, le choix du lieu

d'investigation est important et oriente les résultats : dans les mers, le nombre de groupes d'espèces est plus grand que dans les environnements terrestres et n'est donc pas représentatif de la biodiversité totale.

La biodiversité terrienne est sans égale

Toujours dans l'univers *Star Wars*, le travail de notre naturaliste est facilité grâce aux diverses bases de données participatives qui recensent et classifient les engins spatiaux, planètes, civilisations, systèmes politiques et les extraterrestres de la saga. C'est le cas de la Wookieepedia, un Wikipédia dédié à cet univers, créé en 2005 par deux fans, Chad Barbry et Steven Greenwood, et qui compte plus de 130 000 entrées. Si ces chiffres donnent le vertige, il convient cependant de les relativiser : étrangement, sur près de 20 millions d'espèces affichées dans toute la galaxie *Star Wars*, les fans n'ont décrit qu'environ 2 000 espèces. C'est très peu si l'on considère les estimations effectuées pour notre seule planète, laquelle hébergerait entre 5 et 10 millions d'espèces actuelles, dont seulement 1 à 2 millions sont déjà connues : la biodiversité starwarsienne n'est donc finalement pas très riche.

Mais estimer la biodiversité, qu'elle soit réelle ou imaginaire, se résume-t-il à compter le nombre d'espèces ? Sa définition le plus souvent admise recommande de prendre aussi en compte la diversité écologique et

la diversité génétique. La première permet d'éviter de compter deux fois une même espèce occupant deux environnements différents : c'est le cas de certains amphibiens qui se rencontrent aussi bien dans l'eau (sous forme larvaire) que sur terre (sous forme adulte) et de nombreuses autres espèces (vers, insectes, etc.) présentant un cycle de vie complexe. Pour mesurer la seconde, sur Terre, l'ADN et l'ARN demeurent des éléments de comparaison utiles. Mais qu'en est-il sur les autres planètes où l'information génétique des organismes ne serait pas forcément codée de la même façon ? Les auteurs de la saga *Star Trek* ont pensé à tout : ils ont imaginé un appareil portable capable notamment de scanner des formes de vie afin de les identifier. Le *tricordeur* remplit à merveille ses fonctions puisque les membres de l'organisation Starfleet ont pour mission d'« explorer de nouveaux mondes étranges, découvrir de nouvelles vies, d'autres civilisations et, au mépris du danger, avancer vers l'inconnu ».

Nul doute qu'Enrico Fermi connaissait les romans et magazines de science-fiction de son époque. Mais s'il avait pu lire « Valérian », voir *Star Wars* ou *Star Trek*, il aurait peut-être été soufflé par l'extrême diversité des extraterrestres imaginés. Aurait-il trouvé leur existence paradoxale ? ■

J.-S. STEYER est paléontologue au CNRS-MNHN, à Paris. R. LEHOUCQ est astrophysicien au CEA, à Saclay.
M. BOULAY est sculpteur numérique.

La science-fiction passée au crible de la science !



PAR LES
CHRONIQUEURS
DE LA RUBRIQUE
SCIENCE & FICTION
DE POUR LA **SCIENCE**

Un ouvrage idéal pour
découvrir les sciences
qui gouvernent notre
monde... en compagnie
de Godzilla, Superman
et des extraterrestres !

Belin:

Inscrivez-vous à la newsletter sciences sur editions-belin.com

IDÉES DE PHYSIQUE

La merveilleuse langue du caméléon

Avec sa langue télescopique, le caméléon capture une proie en un clin d'œil. Une prouesse qui tient notamment au stockage d'énergie élastique et au phénomène d'adhésion visqueuse.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Projecter une langue près de deux fois plus longue que sa propre taille en un $1/25^{\text{e}}$ de seconde, saisir fermement une proie qui peut atteindre le tiers de sa propre masse et la ramener dans sa bouche en l'espace d'une demi-seconde : telle est la prouesse du caméléon. Cet exploit n'a pas cessé d'intriguer les chercheurs, qui ont peu à peu compris quels sont les mécanismes physiques mis en œuvre.

Catapulte télescopique

Tout part d'un paradoxe anatomique. Pour atteindre sa vitesse, de l'ordre de 6 mètres par seconde, l'extrémité de la langue du caméléon doit subir une accélération environ 50 fois supérieure à celle de la pesanteur. La puissance requise est de 3 watts par gramme de muscle employé, beaucoup plus que celle déployée par les autres animaux vertébrés. Un mécanisme plus subtil que la simple contraction musculaire est donc nécessaire. En 2004, des chercheurs néerlandais ont suggéré que la langue du caméléon se comporte comme une catapulte, où l'énergie est progressivement stockée avant d'être rapidement libérée.

Première particularité du caméléon, sa langue est constituée de tissus mous qui s'appuient sur une structure osseuse articulée. Avant la projection de la langue, cette structure pivote et fait sortir de la bouche le « processus entoglosse », un os

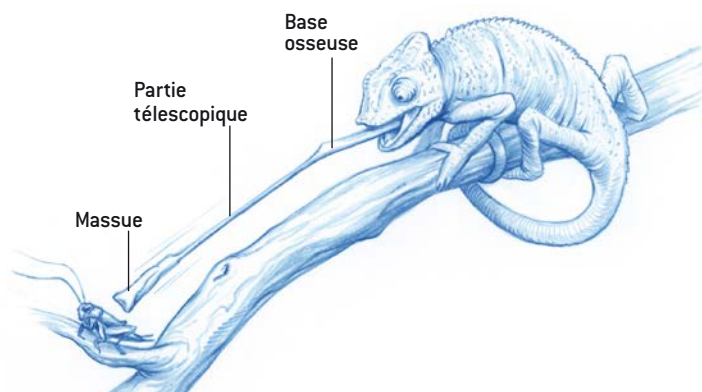
de la taille d'une allumette sur lequel la langue est enfilée comme une chaussette.

La langue elle-même est un organe complexe. Son extrémité comporte une série de gaines emboîtées, en fibres de collagène, et capables de glisser les unes sur les autres pour se déployer de façon télescopique. Ces gaines sont entourées par le muscle accélérateur et rattachées au muscle rétracteur, situé en amont et enfilé lui aussi sur l'os (voir la figure page 88, en haut).

Que se passe-t-il lorsque le muscle accélérateur se comprime autour de l'os ? Comme le muscle rétracteur l'empêche de glisser vers l'arrière, il s'allonge vers l'extrémité de l'os au bout de la langue. Ce faisant,

il entraîne avec lui les gaines de fibres de collagène et les met sous tension. Le travail de contraction du muscle est ainsi converti en énergie élastique dans les fibres. Lorsque l'extension longitudinale du muscle atteint le bout effilé de l'entoglosse, les tissus de collagène se mettent à glisser dessus et, en l'absence d'os central, se détendent radialement. Leur énergie élastique est alors convertie en énergie cinétique.

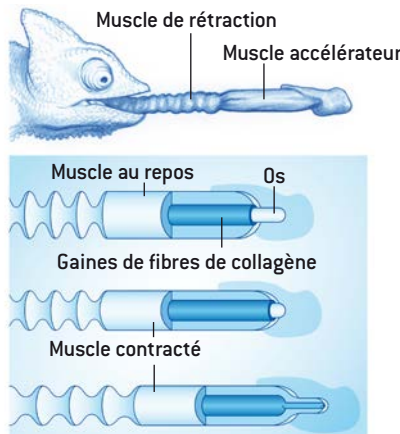
Au niveau de l'extrémité effilée et conique de l'os, cette brutale détente crée une poussée longitudinale, responsable de l'accélération des tissus de la langue. Celle-ci est alors propulsée en avant et l'accordéon du muscle rétracteur, totalement relâché, se déploie complètement. Les



LA LANGUE DU CAMÉLÉON SE PROJETTE À GRANDE VITESSE sur la proie, dont la distance a été préalablement évaluée par le reptile grâce à ses deux yeux orientables indépendamment. Anatomiquement complexe, cette langue comporte une base osseuse, enveloppée par des tissus mous formés notamment de muscles et de gaines télescopiques de collagène.

Dessins de Bruno Vacaro

LA PROJECTION DE LA LANGUE commence par la contraction du muscle accélérateur, qui met en tension les gaines de fibres de collagène entourant l'os. Quand, sous l'effet de la contraction, ce système s'est allongé au point d'atteindre l'extrémité conique de l'os, l'énergie élastique emmagasinée par les gaines de collagène se relâche d'un coup en direction de l'axe central, ce qui pousse fortement les gaines vers l'avant.



accélérations de la langue sont telles que la pesanteur ne joue pas de rôle : la langue s'allonge tout droit, jusqu'à frapper sa cible avant que celle-ci ne s'aperçoive de quoi que ce soit.

■ LES AUTEURS



Jean-Michel COURT
et Édouard KIERLIK
sont professeurs
de physique à l'université
Pierre-et-Marie-Curie, à Paris.
Leur blog : [www.scilogs.fr/
idees-de-physique](http://www.scilogs.fr/idees-de-physique)

Une langue bien gluante

Atteindre la proie n'est pas tout, il faut aussi la ramener vers la bouche. Comment ? Le caméléon doit, avant d'actionner le muscle rétracteur, bien saisir l'insecte avec le bout de sa langue. Lorsque l'axe central, tendu et ferme, de la langue atteint la cible, cette partie cesse immédiatement de progresser tandis que les tissus mous qui l'entourent continuent à avancer et enveloppent en par-

tie la proie. La surface de contact entre cette dernière et la langue est ainsi optimisée.

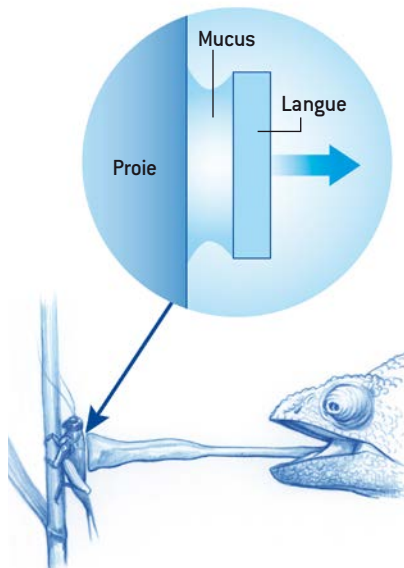
Mais qu'est-ce qui assure la prise ? On invoque différents mécanismes. Le premier relève d'un simple effet velcro. La langue est recouverte de papilles qui lui confèrent de la rugosité : elle épouse ainsi les irrégularités de la surface de la proie et la rétraction de la langue verrouille ces accroches. Le deuxième mécanisme s'apparente plutôt à l'effet ventouse. Lorsque le caméléon propulse sa langue, la massue qui termine celle-ci est convexe, mais on a découvert que pendant le trajet et juste avant l'impact, les muscles du centre de la langue se rétractent, de sorte que la massue devient concave et crée ainsi une dépression.

Pour quantifier la succion qui en résulte, des chercheurs ont étudié en 2000 la force qu'exerçait un caméléon endormi, mais dont la langue était stimulée électriquement, sur une paille de verre, selon que cette dernière était ouverte ou fermée à l'autre extrémité. Ils ont mis en évidence une force nettement plus importante sur la paille fermée, où la pression à l'intérieur peut diminuer comme dans une ventouse, que sur la paille ouverte, à pression atmosphérique.

Ce n'est pas la fin de l'histoire : en 2016, une équipe franco-belge a revu à la hausse la contribution d'un autre mécanisme, l'adhésion visqueuse, dite encore adhésion de Stefan, du nom du physicien slovène qui l'a identifié en 1874.

Imaginons un film d'eau qui baigne l'interstice entre deux plaques que l'on tente de séparer en tirant dessus, par exemple un objet à base plate sur une surface mouillée. Cette séparation va provoquer un écoulement d'eau dans l'espace interstitiel afin qu'il demeure rempli de liquide. L'eau, soumise à de fortes contraintes, acquiert de la vitesse selon l'axe perpendiculaire aux plaques, mais aussi dans le plan qui leur est parallèle. En raison de la viscosité du liquide, c'est-à-dire de la friction entre ses différentes couches en écoulement, une résistance à la traction apparaît. Cette force d'adhésion visqueuse est directement proportionnelle à la viscosité du liquide et à la vitesse de séparation des plaques.

LA SAISIE DE LA PROIE résulte d'un effet de succion exercé par la langue, mais aussi et surtout d'un phénomène d'adhésion visqueuse. La langue est recouverte d'un mucus très visqueux. Lors de son retrait, la traction exercée sur le film de mucus y engendre des écoulements qui, en raison de la viscosité, créent une résistance à la traction, donc une force d'adhésion.



Pour en revenir au caméléon, les chercheurs ont d'abord établi que sa salive est très visqueuse : avec une viscosité de 4 poises, elle l'est 400 fois plus que la salive humaine. Étant donné l'épaisseur du film de mucus, de l'ordre de 50 micromètres, et la surface de contact, d'environ 15 millimètres carrés, on obtient des forces de l'ordre de 0,1 newton (soit le poids de 10 grammes) pour des vitesses d'étirement de l'ordre du micromètre par millièmètre de seconde.

Ces forces sont considérables, mais elles diminuent fortement quand le film s'épaissit. Or plus la cible est grosse et sa masse importante, plus la force d'adhésion doit être intense pour la mettre en mouvement, ce qui nécessite des vitesses d'étirement du film plus élevées, tous les autres paramètres demeurant identiques. Mais cela conduit à une augmentation plus rapide de

l'épaisseur du film et à une chute brutale de la force d'adhésion avec, *in fine*, un risque de détachement de la proie.

Une étude complète qui tient compte de l'élasticité de la massue de la langue montre qu'il existe une taille limite de proie au-delà de laquelle l'adhésion visqueuse ne permet plus la capture. Cette limite est d'ailleurs supérieure aux tailles des proies habituellement constatées.

En deçà de cette limite, comment s'achève le trajet du repas du caméléon ? Une fois le ressort du bout de la langue détendu, la force d'adhésion s'évanouit d'elle-même, mais la proie a acquis suffisamment de vitesse pour accompagner, grâce à son inertie, le repliement en accordéon de la langue. Elle file alors à vitesse constante jusqu'à la bouche de notre prédateur. Bon appétit ! ■

■ BIBLIOGRAPHIE

F. Brau et al., Dynamics of prey prehension by chameleons through viscous adhesion, *Nature Physics*, vol. 12, pp. 931-935, 2016.

J. H. de Groot et J. L. van Leeuwen, Evidence for an elastic projection mechanism in the chameleon tongue, *Proc. R. Soc. Lond. B*, vol. 271, pp. 761-770, 2004.



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

Toutes les archives



■ Pour la Science
■ Dossier
Pour la Science
depuis
1996

Disponibles sur www.pourlascience.fr*

*Numéros à lire en ligne ou à télécharger au format PDF

QUESTION AUX EXPERTS

Les sols se renouvellent-ils ?

Sous les forêts, oui, même s'ils s'enfoncent peu à peu. Dans les zones cultivées, non, car l'érosion n'est pas compensée par la matière produite par la décomposition des roches.

Jean-Paul LEGROS



Les montagnes s'aplanissent en quelques centaines de millions d'années. Sous l'effet de l'érosion par les vents, les pluies, etc. ? Pas seulement : en fait, l'usure des reliefs découle surtout d'un phénomène insidieux : l'altération chimique de la couche la plus superficielle des roches. C'est ainsi que se forme le sol, sorte de peau largement minérale, qui joue un rôle essentiel sur Terre. Elle est en effet le support de la végétation qui, directement ou indirectement, est indispensable à la vie animale, donc à la nôtre.

Dans la couche supérieure de la roche mère présente initialement, deux mécanismes principaux conduisent à la formation du sol : d'une part, l'eau des pluies dissout les ions constitutifs de la roche et les évacue (solubilisation) ; d'autre part, les particules solides sont entraînées par la gravité vers les rivières (transport). Dans une coupe du sol, on distingue ainsi des strates superposées sur la roche mère, dont chacune correspond à une étape de la déconstruction de la roche (voir l'image du haut).

Dans les régions forestières, l'Amazonie par exemple, on postule que le sol perd autant de matière par solubilisation/transport qu'il en gagne par déconstruction de la roche mère. Le système est alors en équilibre, c'est-à-dire que le sol se reconstitue à sa base aussi vite qu'il s'use à son sommet. Il s'enfonce donc dans le paysage sans changer d'épaisseur.

La limite entre le sol et la roche saine sous-jacente est nommée front d'altéra-

tion. On a cherché à mesurer la vitesse à laquelle ce front s'abaisse. Toutes sortes de méthodes ont été utilisées pour ce faire : bilans chimiques, datations, mesures géologiques... On obtient des valeurs dont l'ordre de grandeur est de 10 ou 100 mètres par million d'années, c'est-à-dire quelques centimètres par millier d'années. La quantité de matière que le sol doit gagner pour garder une épaisseur constante est donc assez faible.

Que se passe-t-il sur un sol cultivé ? Comme le travail mécanique de la terre renforce l'érosion, le système n'est plus en équilibre. Le sommet du sol descend donc plus vite que sa base. Résultat : le sol s'amincit. Cela explique d'étranges choses.

Des paysans qui cultivaient la roche ?

Ainsi, dans l'Hérault, on trouve les traces de villages néolithiques dans des garrigues où la roche affleure partout, de sorte que la terre de culture est totalement absente. Comment est-ce possible ? Si, il y a plus de 6 000 ans, des paysans se sont installés là, c'est bien qu'ils y ont trouvé des sols fertiles, qui ont disparu ensuite, ce qui a entraîné le départ des populations... Ce phénomène s'est répété de nombreuses fois : des civilisations entières ont périclité après avoir érodé les sols qui les nourrissaient.

Aujourd'hui, même en Europe, l'érosion est préoccupante. On estime les pertes moyennes à 7 tonnes par hectare et par

an, tous milieux confondus. En partant d'un sol mesurant 1 mètre d'épaisseur, ce qui représente au plus un stock de 15 000 tonnes de terre par hectare, il faudra seulement un peu plus de 2 100 ans pour que cette précieuse couche d'altération ait entièrement disparu.

Avec nos tracteurs surpuissants et nos engins qui pulvérisent la terre et la diminution des restitutions organiques par suite de la disparition des animaux de trait, l'agriculture moderne protège moins les sols que celle que pratiquaient nos ancêtres avec leurs houes servant à égratigner la surface. On ne peut donc pas continuer sur le rythme actuel, d'autant plus que l'urbanisation et l'artificialisation des surfaces réduisent l'étendue des terres agricoles.

Alors que la population mondiale augmente et que les ressources en sols diminuent, où va-t-on ? Certains imaginent des fermes verticales, sortes d'immeubles à produire de la matière verte sur du béton. Bonne idée, certes, mais il faudra alors beaucoup d'éclairage artificiel. Or seules de grandes surfaces horizontales permettent de récupérer une des rares énergies gratuites : celle du Soleil.

À l'échelle humaine, sinon à l'échelle des temps géologiques, le sol est une réserve non renouvelable. Il faut le protéger. ■

Jean-Paul LEGROS, ancien directeur de recherche à l'Inra, est aussi l'ancien président de l'Association française pour l'étude du sol.