

Le gecko, un formidable pouvoir d'adhésion

Grimper sur des surfaces plus ou moins lisses a de tout temps intrigué l'homme : déjà, au IV^e siècle av. J.-C., Aristote avait observé la capacité de certains lézards de la famille des geckos à monter et descendre le long d'un arbre, y compris la tête en bas. De cette fascination est même né un super-héros, Spiderman, qui, sautant de tour en tour en propulsant des fils, peut également monter sur des murs lisses et même des vitres. Mais comment ?

Pour la plupart, les personnes diront que cette étonnante capacité est due aux ventouses que les geckos possèdent à l'extrémité de leurs pattes... Le gecko des murs, ou tarente, *Tarentola mauritanica*, est un petit reptile de la famille des Gekkonidae, insectivore très commun dans le Bassin méditerranéen qui, outre le fait de pousser des petits cris la nuit et de déposer des crottes typiques portant un dépôt blanc d'acide urique sur l'un des apex – une adaptation aux environnements arides correspondant à une réabsorption d'eau –, possède en réalité non pas des ventouses, mais, sous chacun de ses doigts spatulés, des lamelles. Cette structure existe chez d'autres espèces de Gekkonidae, telle *Gecko gecko*.

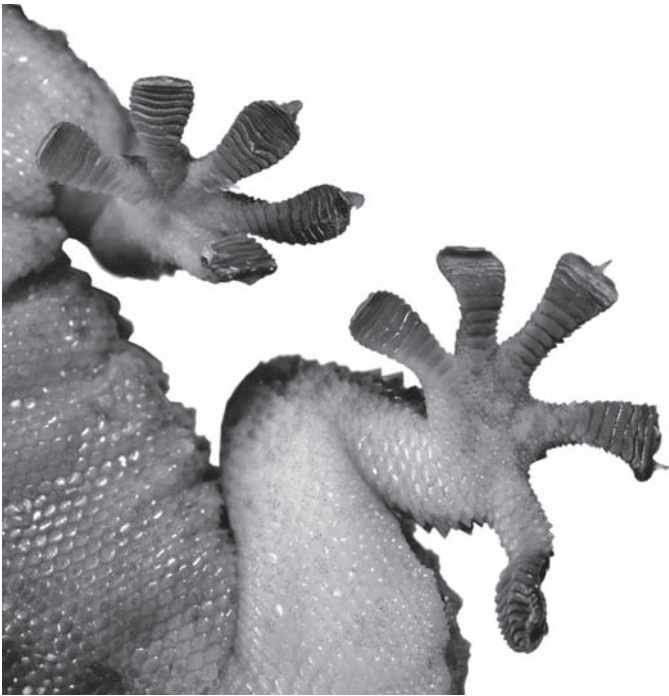
Si l'on observe une de ces pattes en changeant progressivement d'échelle depuis l'angle macroscopique jusqu'au niveau microscopique (voire nanométrique), nous constatons d'abord que chaque doigt, outre la présence d'une griffe apicale, porte une dizaine de bandes parallèles.

Comment colle-t-il ? (et d'abord colle-t-il ?)

Le coussinet d'un doigt de gecko est constitué d'une série de lamelles sèches, appelées *scansor**, couvertes de fibres souples, des sétules (ou setæ), à une densité de 14 400 par millimètre carré. Ceux d'un gecko mesurent environ 110 µm de longueur et 4,2 µm de largeur. Ces sétules, composés de kératine associée à des b-protéines de faible poids moléculaire (8-22 kDa) et à des a-kératines de 45-60 kDa, se ramifient eux-mêmes en centaines de branches, chacune se terminant par une mince spatule. L'extrémité mesure environ 0,2 µm de longueur et autant de largeur.

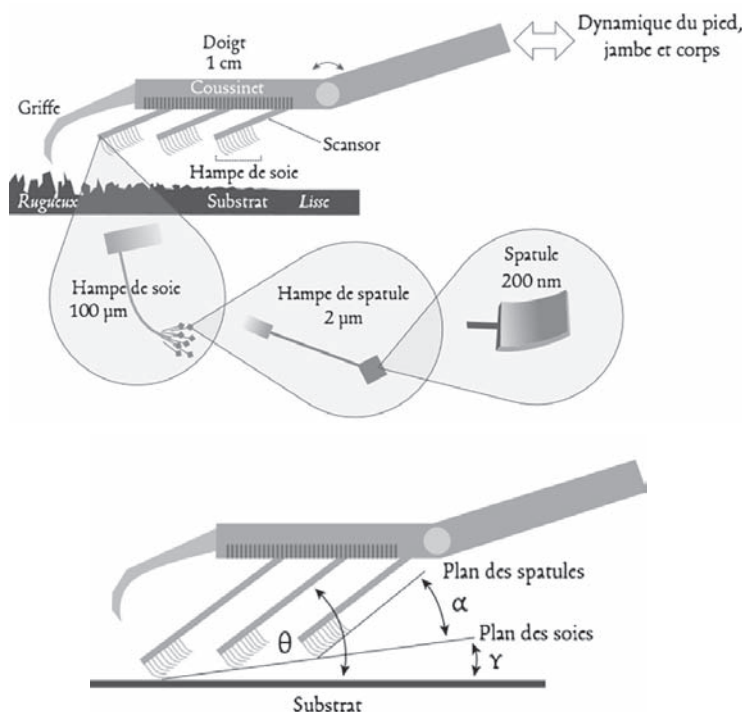
Depuis le début des années 2000, les chercheurs de plusieurs universités – Cambridge (Royaume-Uni), Bologne (Italie), Calgary (Canada), Tsinghua (Chine), Akron, Stanford, Massachusetts Institute of Technology et Berkeley (États-Unis), etc. – ont publié près d'une trentaine de travaux sur l'« adhésion gecko ». Comme l'ont démontré K. Autumn et A. M. Peattie, ce sont les forces de van der Waals – forces électriques de faible intensité et de très courte portée résultant d'interactions interatomiques –, très faibles (de l'ordre de 10 µN) au niveau de chacune des soies, qui rendent cette adhésion possible. L'accumulation des soies sur une surface réduite permet pourtant la production d'une force d'attraction importante. Cependant, le problème des forces de van der Waals est qu'elles ne fonctionnent qu'à très petite

distance, environ un nanomètre ! Et c'est manifestement le rôle des microscopiques spatules du gecko que d'aller épouser de si près la surface pour que ces forces puissent agir et créer ce type d'adhésion, qualifiée d'adhésion sèche. Les études de cinématique montrent que les geckos attachent et détachent leurs doigts en quelques millisecondes, un exploit qu'aucun adhésif classique ne peut égaler. En outre, à l'inverse des autres adhésifs, les doigts des geckos ne se dégradent pas et ne se salissent pas.

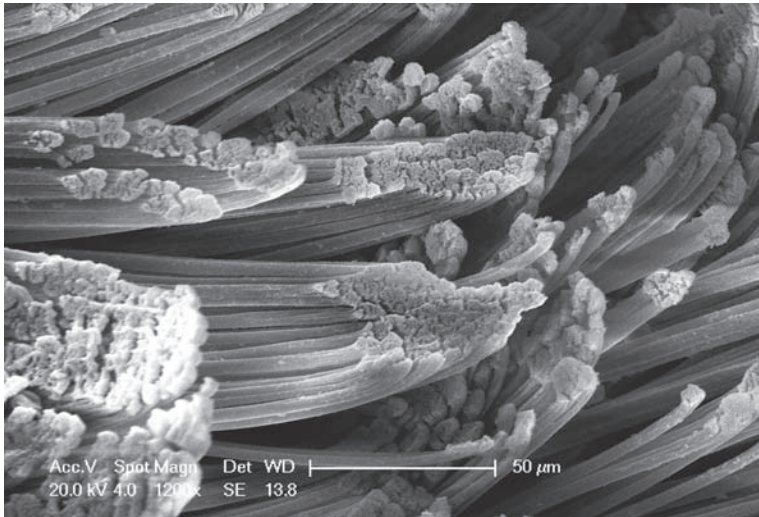


*Vue de dessous d'un gecko marchant sur une vitre.
Détail des doigts d'une patte avec les très nombreuses micro-lamelles*

Chaque sétude, composé d'un millier de spatules, résiste à une force de 200 μN . Des calculs de mécanique théorique, basés sur le potentiel d'interaction entre ces deux plans et la force surfacique d'attraction qui en découle, ont permis de calculer la surface de contact nécessaire entre le plafond et le gecko pour que celui-ci y reste « collé ». À l'équilibre et en appliquant la première loi de Newton, pour un gecko d'une masse de 10 g, on trouve une surface de contact de l'ordre



Schémas de la position des structures adhérentes d'un doigt de gecko sur le substrat et position des contacts de ce doigt sur une surface (d'après K. Autumn et alii, 2006 et Y. Tian et alii, 2013).



Détail des soies spatulées à leur extrémité en microscopie électronique à balayage

de $5,10^{-4} \text{ mm}^2$, ce qui est extrêmement petit. D'un point de vue pratique, si l'on se base sur la surface de chaque sétule, on en déduit que la surface de contact réelle entre un sétule et le plafond est de 10^{-12} m^2 . Il suffirait donc, en théorie, de huit spatules sur les milliers que compte un sétule pour assurer l'adhésion de chaque 10 mg de « bête ». Ainsi, avec ses 14 400 sétules par millimètre carré et par patte, le gecko peut soutenir une force de 288 μN , ce qui correspond à une masse de 30 grammes.

Pour souligner ce caractère idéal, les calculs ont montré qu'une surface de contact idéalement plane (ce qui est rarement le cas) de 4 mm^2 suffirait théoriquement à soutenir un homme de 80 kg.

Les geckos ont-ils tout inventé ?

Nous retrouvons ce système d'adhésion temporaire chez des arthropodes, tel *Evarcha arcuata*, petites araignées sauteuses, de la famille des Salticidae. Comme les geckos, elles sont capables de se mouvoir sur des surfaces lisses et de se tenir tête en bas sans tomber, pouvant même suspendre jusqu'à 173 fois leur poids. Selon les travaux d'A. Martin et A. B. Kesel, biomécaniciens de l'Institut de zoologie, techniques biologiques et de bionique de Saarland (Allemagne), qui ont examiné sous microscope électronique à balayage les pattes de cette petite araignée sauteuse, chacune des faces ventrales des tarsi est recouverte d'une multitude de petites soies d'un diamètre de l'ordre du micromètre (environ 78 000 par patte). Pour d'autres espèces de la même famille, on en compte plusieurs centaines de milliers, voire un million par patte. Ces soies minuscules composées de chitine* assurent l'adhérence de l'animal sur les surfaces les plus lisses. Ce mécanisme d'adhésion sèche, assuré par des bouquets de soies chitineuses, a également été étudié en 2006 par Federle sur *Clytus arietis*, le clyte béliet. Cet insecte xylophage, coléoptère de la famille des Longicornes, est nommé en France la « fausse guêpe », en référence à son mimétisme batésien*.

Un adhésif inspiré par le gecko

Ce système adhésif est donc commun à plusieurs familles (vertébrés, arthropodes, etc.) par l'effet d'une convergence évolutive. Son observation a donné aux biophysiciens l'idée de créer des adhésifs inusables sans recours à la colle – qui sèche et se salit –, mais avec de très fines et nombreuses microlamelles. On pourrait par exemple imaginer des Post-it

réutilisables à l'infini. Plusieurs groupes industriels dans le monde ont déjà créé de tels matériaux, comme à l'université de Kiel ou encore au Gecko Lab de Kellar Autumn, l'un des chercheurs qui a le plus travaillé sur le sujet, comme en témoignent ses nombreuses publications. Les chercheurs de BAE Systems, utilisant une technique photolithographique (gravure de motifs en trois dimensions à l'aide de la lumière), ont synthétisé des films à base de polyimide*. Ces tiges de polyimide présentent des extrémités évasées – ressemblant fortement aux têtes en spatule des poils des geckos –, atteignant 100 nm de diamètre et collant à presque toutes les surfaces, même si elles sont sales. Malgré ses bonnes performances (un mètre carré de ce film devrait suffire à coller un éléphant au plafond), ce matériau n'égale pas encore les capacités des pattes du gecko. En effet, le lézard pouvant s'attacher et se détacher d'une surface plus de quinze fois par seconde, la façon dont il contrôle son adhésion reste encore à comprendre pour pouvoir la reproduire. Parmi les applications envisagées, on note des pièces de réparation pour des structures perforées (par exemple des réservoirs de carburant ou des revêtements d'avions), des panneaux d'accès sans attache ou même la fixation rapide de panneaux de blindage.

Des chercheurs de l'université d'Akron (États-Unis) fabriquent des adhésifs « gecko-inspirés » autonettoyants, composés de nanoparticules de carbone de 200-500 µm de long, synthétisés à 750 °C à base d'éthylène et d'hydrogène. L'idée de créer des gants adhérent aux surfaces lisses a également germé et des chercheurs américains de l'UMass Amherst ont créé des « gants geckos » (*Geckskin's adhesive pads*) à base de polydiméthylsiloxane. Il s'agit de sortes de peaux adhésives sèches, robustes, bon marché et résis-

tantes dans le temps. Selon les calculs, de tels gants seraient capables de permettre à un homme de 80 kg de se hisser sur une surface vitrée sans risque de chute. Des prototypes sont à l'essai à l'université Cornell, tels ces gants utilisés dans le film *Mission Impossible 4*. Petit clin d'œil : ces gants sont serrés au niveau du poignet par des Velcro, structure également issue de la bionique, mais c'est une autre histoire...

Des robots et des pansements

Un ingénieur mécanicien, Mark Cutkosky (Nova), a créé un « robot gecko » qui, grâce à des pads en élastomère, grimpe sur les vitrages. Des essais de petits robots (4 cm de long) comme le Mecho-Gecko et le Bull-Gecko conçus par iRobot Corporation, capables de monter sur différentes surfaces, sont actuellement testés par K. Autumn et ses collaborateurs. Mais l'une des applications les plus récentes et les plus prometteuses, développée par A. Mahdavi et ses collaborateurs en 2008 puis M. F. Yanik en 2009, est la création, à base d'élastomères, de « pansements geckos », autoadhésifs et biodégradables dont la surface de contact avec la plaie est couverte d'une multitude de micropiliers synthétiques (1 à 2 μm de hauteur) qui, par l'effet des forces de van der Waals, se collent et se décollent facilement. Des essais sont en cours pour tester leurs propriétés mécaniques, leur adhésion en conditions humides, avec les forces capillaires*, mais aussi leur possibilité de diffuser des drogues, des facteurs de croissance ou des antibiotiques, tout ceci en minimisant le risque de réponses immunitaires et inflammatoires.

Ce petit animal qu'est le gecko a donc de nombreuses choses à nous apprendre. Son mode d'adhésion spectaculaire n'a pas fini d'inspirer les chercheurs.

La bardane, à l'origine du Velcro



Il est des inventions qui doivent tout à la sérendipité*, c'est-à-dire qu'elles ont été conçues par accident, sans qu'on ait volontairement cherché une solution à un problème précis. Le problème auquel fut confronté l'ingénieur suisse George de Mestral fut d'abord de débarrasser le pelage de son chien des fleurs sèches qui s'y accrochaient. Pour disperser ses graines, la bardane se « sert » en effet de tout poil qui passe à sa portée. Cette « méthode » de dispersion qui consiste pour une plante à accrocher ses graines, spores ou fruits, aux animaux pour se déplacer de génération en génération est appelée « zoochorie ».

Dans le cas de la bardane, originaire des régions tempérées de l'Ancien Monde, la technique s'est révélée suffisamment efficace pour lui permettre de coloniser une bonne partie de la planète dont le sous-continent indien et l'Asie. Aucun doute donc que l'ingénieur ne fut pas le premier à s'être confronté à cette agaçante passagère clandestine. Il fut néanmoins le premier à retourner le problème à son avantage en observant de plus près la plante. Les inflorescences de la bardane sont composées de plusieurs petites fleurs violettes regroupées dans une sorte de coupe, appelée « involucre », armée de crochets. Deux fois par an, à maturité, les fleurs sèchent pour laisser la place à des fruits-graines, tandis que les crochets durcissent. Il est probable qu'à l'origine cette

couronne de crochets servait surtout à protéger les graines, mais l'évolution lui a trouvé une seconde utilité, bien plus profitable.

George de Mestral s'inspira directement de l'architecture de ces inflorescences pour inventer le Velcro. Le système est d'une simplicité déconcertante et nous le connaissons tous : une surface équipée d'une multitude de crochets face une autre formée de petites boucles. Il déposa en 1952 le brevet de son invention dont le nom (et celui de la société qui le produit toujours aujourd'hui) est une compression de « velours à crochet ». À l'origine, il était fabriqué en coton qui, insuffisamment résistant, fut rapidement remplacé par du nylon et du polyester qui permettent d'obtenir une résistance à l'arrachement de 14 kg/cm². Pour une fois, le Velcro est plus efficace que la plante dont il s'inspire. En effet, les crochets de la bardane sont à usage unique, ils se cassent dès qu'on l'arrache, tandis que l'on peut séparer et réunir les deux bandes du Velcro de nombreuses fois. La bardane a cependant d'autres vertus que ne peut égaler l'invention de l'ingénieur, elle est utilisée dans la pharmacopée traditionnelle en Asie et en Europe pour ses propriétés diurétiques, contre les rhumatismes et les maladies de la peau. C'est cette dernière vertu qui lui a d'ailleurs valu le joli surnom d'« herbe aux teigneux ».