

Les 4 types de soies adhésives chez le Doryphore. En bas, détails des pointes. De A à C et de E à F : à la fois chez les mâles et les femelles. D et H : chez les mâles uniquement - Peinture de Christian Corraze, d'après des prises de vue en microscopie électronique (les couleurs sont imaginaires).

Les insectes ingénieurs. 2

Par Alain Fraval

Il sera question de soies et de microstructures du tégument, associées à des sécrétions, qui donnent aux insectes des pouvoirs adhésifs enviables. Ils leur permettent de marcher ou de grimper sans glisser même sur des surfaces mouillées, de tenir sur leur partenaire sexuel, de constituer et transporter un amas de débris protecteur, d'assurer leur tête ou leurs ailes au repos, de fixer leurs œufs, ou encore d'attraper une proie.

Les dispositifs permettant aux animaux – moules, bernacles, rainettes... – de se coller à leur support mouillé, glissant, abrupt ont été examinés depuis des centaines d'années par les zoologistes et pour certains imités par les ingénieurs. Les insectes affrontent également des pentes raides et des surfaces glissantes et, dans leur extraordinaire diversité, ont développé une grande variété de mécanismes d'adhésion, qui ont reçu jusque-là une attention bien moindre.

Ces mécanismes sont de deux sortes. L'adhérence physique (de nature électrique) est celle qui fait

que le gecko¹ adhère à une vitre et marche au plafond grâce à des fibres de kératine souples, les sétules, contenant des filaments terminés par des structures en spatule, qui s'accrochent au support par la force de Van der Waals. Aucun insecte n'adhère uniquement de cette manière. Il y a toujours en complément ou uniquement des phénomènes chimiques : liaisons moléculaires, capillarité et viscosité.

Dans la plupart des cas, la force de leur attachement ne vaut pas celle d'un adhésif fabriqué mais ils sont meilleurs quand il s'agit de se coller et se décrocher rapidement sur des

surfaces très diverses et d'éliminer les contaminants (poussières) rencontrés.

■ DISPOSITIFS PHYSIQUES

La cuticule des insectes, qui constitue leur exosquelette, se prête à toutes sortes de mise en forme de sa surface. La première catégorie de microstructures qui concourent à l'adhésion est constituée de soies fines à l'extrémité pointue (« brin d'herbe »), aplatie évasée (« spatule »), aplatie en disque « cuiller ». Celles-ci sont flexibles et se plaquent contre les reliefs du substrat, leurs extrémités s'insérant dans les plis et les saillies les plus petits, où jouent les forces de Van der Waals. On les rencontre essentiellement chez les Diptères et les Coléoptères.

La seconde catégorie consiste en une cuticule souple, déformable, armée de bâtonnets perpendiculaires à la surface, censée renforcer les forces d'adhésion. Elle est présente chez les phasmes, les fourmis et les blattes.

1. Des systèmes de « adhérence sèche » bioinspirés du gecko sont développés pour les travailleurs du vide intersidéral où la ventouse ne fonctionne pas.

Le dimorphisme sexuel adhésif du Doryphore

Les mâles comme les femelles de *Leptinotarsa decemlineata* (Col. Chrysomélidé) possèdent à l'extrémité des tarsi des soies de type brin d'herbe et spatule ; seuls les mâles ont en plus des soies cuiller. Celles-ci leur permettent de tenir le temps qu'il faut, lors de l'accouplement, sur le dos – les élytres lisses – de la femelle. Lorsque les insectes sont présents sur les végétaux, les mâles adhèrent mieux sur les cuticules lisses, tandis que les femelles font deux fois mieux sur celles qui sont rugueuses. Ces observations confirment le partage des rôles entre les trois conformations des extrémités des soies.

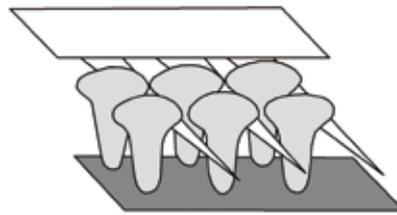


Accouplement chez le Doryphore
Cliché Whitney Granshaw, Colorado State University, Bugwood.org licence CC-A 3.0

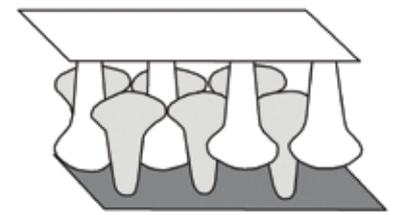
L'adhérence est mauvaise – l'insecte glisse – sur des surfaces dont les microreliefs sont de l'ordre de 5 µm ou moins. Les népentes, plantes carnivores à urne, sécrètent des cristaux de cire épicuticulaires qui diminuent la rugosité de la paroi de l'urne et contaminent les systèmes d'accrochage des insectes capturés.



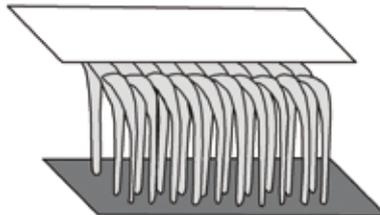
Larve de Chrysope verte (Neur. Chrysopidé)
Cliché Eric Gofreed



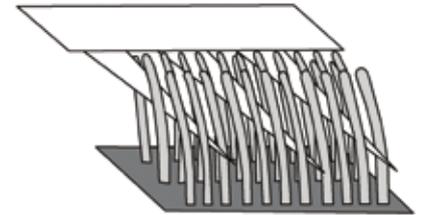
Sympetrum sanguineum



Lestes barbarus



Gomphus flavipes



Aeshna mixta

Différents types de microtriches complémentaires sur les zones de friction au niveau du cou chez 4 espèces d'Odonates.

■ SYSTÈMES ADHÉSIFS DE CAMOUFLAGE

Chez les Chrysopidés, deux types morphoéthologiques se rencontrent chez les larves² : les nues et les camouflées. Les premières se tiennent à l'affût ; les secondes chassent à vue leurs proies, notamment les petits Homoptères. Les matériaux de camouflage sont très variés : flocons de cire de cochenilles, cadavres d'insectes, fils de soie, grains de sable, fragments de feuilles, trichomes..., associés ou non.

La larve les charge sur son « dos » par des mouvements de la tête et du corps très stéréotypés. Ils tiennent en place coincés entre des soies longues terminées en crochet ou barbulées, munies de dispositifs microadhésifs, implantées sur des protubérances dorsales et latérales. À l'arrière du corps, ces soies, longues et flexibles, sont adaptées à des charges volumineuses et légères ; à l'avant, plus courtes et rigides, elles maintiennent surtout des objets tels que des grains de sable.

Leur propriété d'adhésion sélective pourrait être copiée de façon à réaliser des systèmes de tri de matériaux ou de filtrage.

■ LIENS ANATOMIQUES

Pour renforcer certaines articulations, certains insectes usent de dis-

positifs d'accrochage du type velcro (facilement détachables) entre deux pièces anatomiques.

Ainsi la tête des imago des Odonates (libellules et demoiselles) est-elle reliée au thorax par un cou frêle, qui lui permet de tourner en tous sens. Mais la capsule céphalique lourde risque de froisser cette articulation lors de manœuvres aériennes brusques, l'accrochage aux tiges des plantes et l'accouplement. En plus de muscles céphalothoraciques, il y a, face à face, deux couples de surfaces de contact comportant des plages de microtriches (très courtes soies), des sensilles pour contrôler la friction et des cellules glandulaires sécrétant une substance lipidique. Les microtriches ont des formes diverses chez les différents taxons ; lors du contact, ils se déforment, augmentant la surface de contact qui en même temps est garnie de la sécrétion grasse. Tête et thorax adhèrent ainsi fortement l'une avec l'autre – et peuvent se libérer facilement.

Les insectes qui plaquent leurs ailes contre leur corps au repos possèdent aussi des systèmes d'attache à libération instantanée. Chez les Hémiptères aquatiques, deux plages de microtriches, l'une bombée (« bou-

2. Dès le milieu du Crétacé, des ancêtres des chrysope actuelles accumulaient des débris tenus par de long filaments. Voir l'Épingle « Ultra-conservatisme » de 2018 à www7.inra.fr/opie-insectes/epingle18.htm#ult

Les pieds propres des adhérents

Pour une expérience sur les conditions et les limites de l'adhérence, Christofer J. Clemente et son équipe (université de Cambridge, Royaume-Uni), ont recruté le Phasme morose, *Carausius morosus* (Phasm. Diaphéroméridé) et la Chrysomèle de l'oseille, *Gastrophysa viridula* (Col. Chrysomélidé).

Le phasme, que l'on nourrit de lierre, est très connu dans les terrariums. Il a beaucoup servi aux entomologistes pour étudier la parthénogenèse et l'autotomie : il perd patte très facilement. Pourtant il ne perd jamais pied, même sur une surface lisse et verticale car il a des pelotes lisses à l'extrémité du tarse, en contact avec le support. La chrysomèle se distingue au potager par l'abdomen gonflé de sa femelle ; elle adhère également parfaitement grâce à des pelotes munies de poils.

La manip a consisté à essayer de faire tomber nos cobayes aux tarses recouverts de microbilles (d'1 ou 10 µm de diamètre, simulant la poussière) d'une plaque de verre en la secouant de différentes façons. Résultat : il suffit de quelques pas, à l'un comme à l'autre, pour avoir les pelotes parfaitement propres, sans les toiletter, et adhérer au support.

Un nettoyage automatique qui intéresse beaucoup les créateurs de matériaux.

Épingle publiée dans *Insectes* n°157, 2010(2)



En élevage, ce Phasme morose adhère parfaitement aux parois de verre du terrarium - Clichés Hervé Guyot-OPIE

ton ») sur le mésépimère et l'autre en creux (« douille ») sur la corie viennent en coïncidence, réalisant une attache de type bouton pression qui plaque les hémélytres (ailes antérieures) le long du thorax.

Certains microtriches sont creux et déposent un adhésif.

■ DISPOSITIFS CHIMIQUES

Tous les dispositifs d'adhésion mécaniques décrits ci-dessus sont complétés par des sécrétions épidermiques. Celles-ci sont formées de 3 composants : une phase aqueuse riche en sucres et en acides aminés, des gouttelettes huileuses contenant des sucres et un émulsifiant.

Leur rôle n'est pas clair. Ce ne sont pas des colles au sens courant du terme. Chez la Grande Sauterelle verte *Tettigonia viridissima* (Orth. Tettigoniidé), les pelotes tarsales adhèrent et se détachent quasi instantanément. Elles seraient ca-

pables d'augmenter les forces intermoléculaires au contact du substrat en s'adaptant aux surfaces hydrophobes comme hydrophiles. En plus, leur présence générerait des forces d'adhésion par capillarité ou viscosité. De tels fluides émulsionnés ou riches en colloïdes résistent très bien au cisaillement.

Les insectes marchent sur des surfaces empoussiérées et leur accroche devrait diminuer de pas en pas. Or ils n'accumulent pas de polluants, leurs dispositifs d'adhésion étant autonettoyants. C'est une propriété remarquable que n'ont pas les rubans adhésifs, par exemple. Ils conservent le même pouvoir adhésif toute leur vie et qu'il leur suffit de quelques pas pour se débarrasser des poussières et autres

grains de pollen. Pour ce faire, ils peuvent glisser légèrement de côté pour générer des cisaillements. Les sécrétions jouent leur rôle en lavant les structures en contact avec le substrat.

Les sécrétions d'une mouche bleue *Calliphora vicina* (Dip. Calliphoridé) sont deux fois moins visqueuses que celles de la Coccinelle à 7 points *Coccinella septempunctata* (Col. Coccinellidé) ; la première privilégie la capacité de s'envoler dès la perception d'une menace, la seconde le maintien solide sur la feuille.

Adhérer, c'est vital

Tout le monde a observé que les fourmis grimpent partout – la tête en haut – et redescendent de la même façon – la tête en bas –, à pattes. Lesquelles sont équipées à leur extrémité de coussinets adhésifs et de griffes. Dans la forêt tropicale humide, les fourmis arboricoles grimpent également partout pour récolter leur pitance, progressant sur des écorces rugueuses comme sur des feuilles lisses, dans des conditions d'humidité et de vent variables.

Alyssa Stark et Stephen Yanoviak de l'université Villanova (Pennsylvanie, États-Unis), ont mesuré les performances d'adhérence sur le verre, le plastique et le bois d'une fourmi du Panama, ceci en conditions sèches ou humides. Des fourmis d'essai se sont retrouvées avec un fil collé sur le dos, fil auquel était appliqué une force croissante jusqu'à faire décoller ou glisser l'insecte. D'autres ont été chronométrées dans leur course. Il faut exercer la même traction sur la fourmi afin de la décoller d'un substrat sec ou humide. Elle résiste moins bien si on la fait glisser sur substrat humide. La fourmi se déplace d'ailleurs plus lentement sur sol trempé. Effectivement, nos chercheurs ont observé sur le terrain, que leur fourmi est inactive quand il pleut. Leur projet : étudier d'autres espèces et leur soumettre de nouvelles conditions (texture du substrat, chaleur...).

Ces études ont un double but. Mieux comprendre l'écologie de la myrmécofaune de la canopée et trouver celles qui présentent les meilleurs systèmes d'adhésion, pour les confier aux ingénieurs en quête d'inspiration afin de mettre au point des adhésifs de synthèse réutilisables plus performants.

Épingle de 2018. Article source : DOI: 10.1098/rsos.181540



Grande Sauterelle verte
Cliché Entomart à www.entomart.be



Chrysomèle polie
Cliché Entomart à www.entomart.be



Œufs et jeunes chenilles (en arrière-plan) d'*Opodiphthera eucalypti*. Les œufs vides peuvent rester très longtemps collés au support après la naissance des chenilles.
Cliché Fir0002 licence CC-A 3.0

Ce système de fixation confère à certains insectes des performances étonnantes. Ainsi faut-il faire souffler un vent de plus de 170 km/h sur un imago de *Chrysomèle polie* *Chrysolina polita* (Col. Chrysomé- lidé) ou le pousser avec une force de 16 fois son poids pour le déloger.

■ ADHÉSIFS PERMANENTS

Ils servent à fixer les œufs sur le substrat, que celui-ci soit hydrophile ou hydrophobe, propre ou sale, recouverte par exemple de cristaux de cire. Selon les taxons,

ils diffèrent beaucoup par leurs propriétés physiques, allant d'hydrogels à des mousses en passant par des colles solubles ou pas dans l'eau. Ce sont en général des protéines, de nature variée.

L'oothèque des mantes est faite d'une mousse à base de protéines qui se solidifie rapidement.

Opodiphthera eucalypti (Lép. Sauturniidé) produit une colle particulièrement forte, contenant plus de 50 % de protéines, avec une sur-représentation de glycine (d'où sa flexibilité) et de sérine (qui multiplie les liaisons hydrogène) ; elle constitue un adhésif biocompatible équivalent aux meilleures colles permanentes de synthèse.

■ COLLE DE CHASSE

Des insectes s'en servent pour attraper leurs proies. Ainsi les Coléoptères Staphilinidés du genre *Stenus* possèdent-ils un labium très allongé, rentré dans un tube membraneux dans la capsule céphalique au repos, qu'ils projettent vivement sur la proie. Le labium porte à son extrémité une paire de paraglosses adhésives grâce à des brosses plus ou moins étendues et aux trichomes plus ou moins ramifiés à leur extrémité selon l'espèce. L'extension de ces organes (apparus au Crétacé) au cours de l'évolution ont permis aux *Stenus* d'élargir leur gamme

de proies accessibles vers de plus grosses et plus agiles.

Ces staphylins capturent ainsi des proies avec des téguments aux propriétés de surface variées. L'adhésion est, comme pour les tarsi des insectes cités plus haut, due à la combinaison de microstructures de la cuticule et d'un liquide visqueux sécrété à l'intérieur du tube. Deux éléments diffèrent : les microstructures sont presque entièrement mouillées par le liquide, d'où l'on déduit que l'adhésion est principalement due à sa viscosité, et la force d'adhésion est indépendante de la rugosité du tégument, du fait sans doute de la rapidité du contact qui fait toutes les anfractuosités sont tout de suite comblées. ■

À suivre...

À (re)lire

Captures et collections : Collés, englués, scotchés..., par Alain Fraval. *Insectes* n°131, 2003(4). En ligne à www7.inra.fr/opie-insectes/pdf/i131fraval.pdf



Extrémité du labium extensible chez *Stenus*
- Dessins BD



Stenus bimaculatus - Cliché Hervé Bouyon