

Les insectes ingénieurs. 1

Par Alain Fraval



En plein désert de Namibie, *Stenocara* sp. (Col. Ténébrionidé) récolte l'eau du brouillard grâce à la texture de ses élytres. Peut-on l'imiter ? - Cliché James Anderson licence CC BY-NC-SA 2.0

Tout au long de leur évolution et de la diversification de leurs habitats et modes de vie, sont apparues chez les insectes des adaptations, qui se sont perfectionnées et spécialisées. Ainsi les uns ou les autres possèdent-ils des structures, des systèmes et des fonctions que les ingénieurs leur envient et tentent – ou tenteront – de copier. Il existe déjà des revêtements antireflets, des systèmes optiques et des algorithmes « entomo-inspirés », sans parler des papier et carton modernes¹. Les insectes sont capables de prouesses notamment en optique et en armes chimiques que l'on est loin d'égaliser.

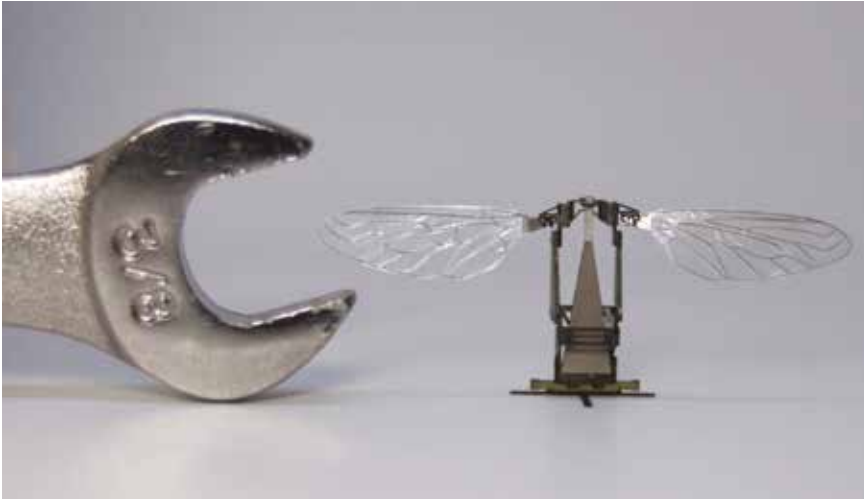
Certains de leurs « inventions » tiennent à la structure ou à la forme de pièces anatomiques (l'iridescence, l'aile...), d'autres à la sécrétion de glandes (cire) ou à la collaboration entre individus chez les insectes sociaux (les ponts de fourmis...). Une série d'articles débute qui exposera des exemples d'adaptations parmi les plus achevées en anatomie, physiologie et comportement, l'occasion de revoir les insectes sous un angle un peu décalé, avec l'œil du chercheur en solutions nouvelles².

■ AILES

Les insectes marchent, volent, nagent... au moyen d'organes faits de cuticule disposée en tubes et plaques épaisses, en « tissu » poreux ou en protrusions en relief. Leurs appendices les associent de façon à équilibrer avec précision la masse, l'élasticité, la transmission de forces et la dépense physiologique pour les construire ; ceci pour leur faire remplir leur fonction parfaitement. On a déjà construit un analogue

1. Voir : Insectes et papier, *Insectes* n°190, 2018(3).

2. Ce sujet a été traité par T.B.H. Schroeder, J. Houghtaling, B.D. Wilts et Michael Mayer en 2018 sous le titre « It's Not a Bug, It's a Feature: Functional Materials in Insects » dans *Advanced Materials*. 1705322, article dont je me suis fortement inspiré. DOI: 10.1002/adma.201705322



Robobee - Cliché Wyss Institute at Harvard University



Ailes du Bourdon terrestre *Bombus terrestris* (Hym. Apidé)
Cliché Jean-Yves Bernoux à <http://champignon.champyves.free.fr/>

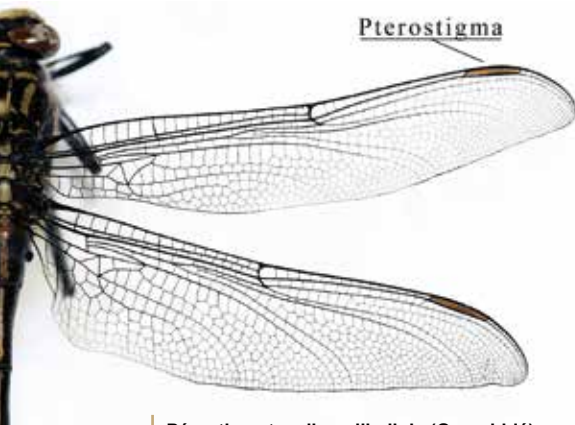
mécanique à l'insecte volant : c'est Robobee, un minidrone³. L'engin n'est pas un avion ou un hélicoptère miniaturisé, qui volent selon des principes qui ne sont pas applicables à petite échelle. Il se meut grâce à une aile vibrante, analogue à celle des insectes. Il ne dispose que de très peu d'énergie et sa

manœuvrabilité est très inférieure à celle des insectes. Le DragonFly de Techject, engin plus gros et à capacité d'emport, à 4 ailes battantes inspiré de la libellule, n'a jamais été mis au point et la startup a coulé. Les insectes sont bien mieux faits et on continuera donc à les étudier pour s'en inspirer.

L'aile est un grand réservoir de ressources : il y a en effet un million d'insectes volants, contre 12 000 espèces de vertébrés. L'aile de l'insecte est une membrane quasi passive dont les mouvements sont

commandés par des muscles intrathoraciques. Grâce à des zones de différentes épaisseur et souplesse, elle peut changer de forme. D'un point de vue mécanique, l'aile agit comme un levier (transmettant la force exercée par les muscles), comme une lame oscillante (qui produit des tourbillons sustentateurs) et comme une poutre en porte-à-faux (qui se déforme sous l'effet de diverses forces). Pour les spécialistes de la résistance des matériaux, la membrane de l'aile de l'insecte est un cas délicat et il leur a fallu inventer des appareillages *ad hoc*, pour déterminer son module de Young. Qui est de 2 à 5 GPa⁴, équivalent à celui du nylon.

Les ailes sont insérées sur le deuxième et troisième segment thoracique et font partie de l'exosquelette de l'insecte. L'aile est plus ou moins épaisse ; elle peut varier de 500 nm chez la Mouche du vinaigre à 1 mm pour l'élytre des Coléoptères. Elle est constituée d'une double couche de cuticule, parcourue de nervures qui sont des tubes creux. Les plus gros sont remplis d'hémolymphe⁵ et sont parcourus par des fibres nerveuses et des trachées. Les nervures tiennent la membrane tendue, tout en permettant des déformations par leur souplesse ou leur moindre densité locales. L'aile des premiers insectes est celle des Odonates (libellules et demoiselles) avec un fin réseau de nervures, et qui ne se replie pas sur l'abdomen. Avec les Néoptères, cette possibilité apparaît, ainsi que chez certains la présence de lignes souples, indépendantes des nervures, permettant leur pliage⁶. Les plis transversaux augmentent la déformabilité de l'aile et



Pérostigmates d'une libellule (Gomphidé) - Cliché IronChris, licence CC BY-SA 3.0

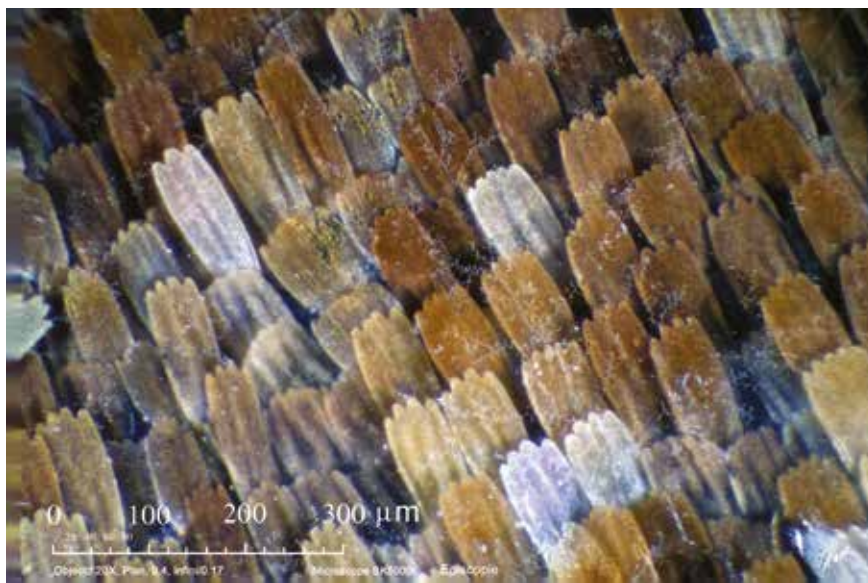
3. À (re)lire : Hydrabeille, Épingle de 2017, en ligne à www7.inra.fr/opie-insectes/epingle17.htm
4. Un milliard de pascals, unité de pression.
5. À (re)lire : Le système circulatoire, par Alain Fraval. *Insectes* n° 166, 2012(3). En ligne à pdf/i166fraval2.pdf. Ainsi que Comment plier une aile, Épingle de 2017, en ligne à epingle17.htm#pli
6. À (re)lire : Anatomie de l'aile, par Benoît Gilles, *Insectes* n° 177, 2015(2). En ligne à pdf/i177-gilles.pdf

agissent comme une charnière à un sens, aidant l'aile à reprendre sa forme après une descente. D'autres, comme chez le bourdon qui se cogne contre les obstacles 500 000 fois dans sa vie de butineur, sont là pour amortir les chocs.

L'épaisseur de la membrane peut varier localement sur l'aile. Le ptérostigma est une zone épaissie, située contre le bord d'attaque. Il est présent chez les libellules, par exemple, où par sa masse il porte en avant le centre de gravité de l'aile, assurant une meilleure maîtrise du tangage et augmentant l'asymétrie des mouvements vers le haut et vers le bas.

La résiline est une protéine qui est présente dans l'aile des Dermaptères et des Coléoptères. L'extraordinaire élasticité de cette protéine facilite le pliage des ailes et améliore leur capacité de vol. On n'imagine pas des ailes d'avion gaufrées, recouvertes de picots ou de tuiles. Pourtant les ailes de nombreux insectes sont rugueuses ou texturées. Ainsi les libellules volent-elles fort bien avec des ailes portant une résille de nervures – on n'a pas établi pourquoi – et les papillons se jouent de la traînée due à la présence d'écailles sur les ailes.

Les Mymaridés (Hyménoptères) ont des ailes ciliées. Ces parasitoïdes oophages sont parmi les plus petits insectes connus : 0,158 mm pour la femelle *Kikiki huna*, qui vole parfaitement⁷. À cette échelle, cette conformation particulière facilite l'accroissement de la séparation électrostatique, le pliage des ailes, de bonnes mécanosensations et rend le vol plus efficace. Ces insectes sont sans doute capables de contrôler l'angle d'attaque et l'espacement des soies afin d'avoir la meilleure portance tout en dépensant le moins



Écailles d'ailes de papillon - Cliché pris en épiscopie par Thierry Hatt



Tinkerbella nana (Hym. Mymaridé), autre champion de la petitesse avec 0,170 mm de long - Cliché Jennifer Read

d'énergie possible. De plus, des mesures réalisées chez *Thrips physapus* (Thysanoptère) montrent que la résistance pour séparer les ailes est bien moindre lorsque celles-ci se touchent lors du battement vers le haut. Les insectoïdes volants subminiatures (à réaliser...) devront certainement avoir des ailes ciliées ou frangées pour consommer le moins d'énergie possible.

■ ORGANES NATATOIRES

On évalue à 200 000 le nombre d'insectes aquatiques, répartis dans 14 ordres, dont 5 principaux. Ils ont

développé des adaptations particulières pour se nourrir, respirer, assurer leur osmorégulation et se déplacer. Les larves et les nymphes de *Chaoborus crystallinus* (Dip. Chaoboridés)⁸ nagent grâce à un propulseur arrière constitué de 26 filaments très fins, composés en partie de résiline. Pour avancer la larve se tord, et déploie le panache de filaments qui était rétracté ; son dernier segment abdominal quintuple de surface et fait comme une godille. La larve du moustique *Culex pipiens* (Dip. Culicidé) nage grâce à sa « moustache » (ou brosse buccale) d'un millier de filaments réunis en une bonne vingtaine de faisceaux qu'elle fait vibrer à la fréquence de 11 Hz. Elle avance ainsi sans créer de remous qui perturberaient

7. À (re)lire : Micro-insectes, par Alain Fraval. *Insectes* n° 176, 2015(1). En ligne à pdf/i176-fraval.pdf

8. Elle se tient entre deux eaux, se nourrissant de daphnies qu'elle ramène à la bouche avec ses antennes.



Larve aquatique de Diptère Chaoboridé et son "propulseur" arrière
Cliché Jan Hamrsky à lifeinfreshwater.net

sa vue et sa perception des vibrations. Une solution originale qui maximise l'efficacité énergétique. Les pattes des punaises aquatiques (Hémiptères) possèdent des adaptations au mouvement dans et sur l'eau.

Les patineurs, alias ciseaux, (Gerri-dés) marchent, courent ou glissent sur l'eau grâce à des soies de quelque 50 nm de long implantées à 25° sur les tarsi. Ils adoptent la marche tripode pour avancer ou ramment de leurs deux pattes médianes, lesquelles actionnées avec force les font patiner. Selon l'angle d'attaque de ces soies par rapport au courant, ils prennent leur appui ou glissent. On a déjà réalisé des micro- et des nano-régulateurs de débit de fluide avec des micro-poils orientables ; de tels dispositifs passifs attendent d'être implantés sur des structures plus grosses comme des coques de bateau.

■ STRUCTURES EN RAPPORT AVEC L'EAU ET LES POUSSIÈRES

Les insectes vivent dans toutes sortes de milieux où ils ont affaire à une forte humidité ou à l'eau liquide, sous forme de gouttes ou en masse. Leurs adaptations sont, par exemple, les systèmes anti-pluie et anti-poussières des ailes des Odonates et des cigales. Il y a deux types d'adaptation à l'eau : la présence de struc-

tures cuticulaires à l'interface air-eau-cuticule modifiant la mouillabilité du tégument et le maintien de leurs pressions osmotique et/ou hydrostatique spécifiques vis-à-vis du milieu environnant.

Les progrès de la fabrication des matériaux ont permis de comprendre le rôle hydrophobe des micro- et nanostructures des surfaces, de leur forme, leur taille et leur densité. Des aspérités plus petites et plus serrées, et en forme de cônes, empêchent mieux le dépôt des gouttelettes du brouillard et la condensation de la vapeur d'eau. Pour aller plus loin, il faut examiner ce que les insectes ont réalisé.

Les moustiques, ont une excellente vision et peuvent voler dans un milieu présentant une forte hygrométrie ; ils ne sont gênés ni par la buée ni par les poussières. La surface externe de chaque ommatidie de l'œil composé est recouverte de mamelons de 100 nm environ de diamètre et espacés de 50 nm et disposés en nid d'abeille.

Sur l'œil de la Mouche verte *Lucilia sericata* (Dip. Calliphoridae) ce sont des excroissances sphériques de 100 nm de diamètre disposées en amas compacts qui jouent ce rôle.

L'aile postérieure de la cicadelle australienne *Desudaba danae* (Hém. Fulgoridé) comporte en surface des cônes effilés de 4 à 10 nm de diamètre à la base, hauts de 10 et distants l'un de l'autre de 15 à 30 nm. Un dispositif qui ressemble à celui de la feuille de lotus, non mouillable.

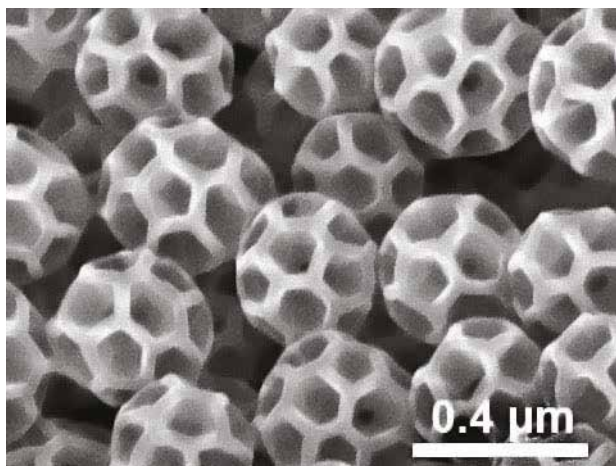
L'hydrophobie de ces structures est expliquée classiquement par la présence de microbulles d'air coincées contre la cuticule et qui se comportent comme des solides non mouillables (modèle de Cassie et Baxter, de 1944).

■ RÉCUPÉRATION DE L'EAU

Vivant dans le désert aride, *Physosterna cribripes* (Col. Ténébrionidé) récupère l'eau de la brume matinale grâce à ses élytres : l'eau qui s'y condense ne sèche pas ni n'est emportée par le vent grâce à la juxtaposition de bosses lisses hydrophiles et de creux hydrophobes texturés de demi-sphères de 10 µm et en plus recouverts de cire. Les gouttes d'eau grossissent sur les bosses puis ruissellent dans leurs intervalles jusque dans la bouche de l'insecte et assurent ses besoins en eau.



Gros plans sur l'extrémité antérieure de la larve du *Culex* - Cliché Michel Blaise à aramel.free.fr/



Brochosomes de cicadelle - Cliché domaine public



Mouche pisseuse, *Homalodisca vitripennis* (Hém. Cicadellidé). Les taches blanches sur ses flancs sont des amas de brochosomes - Cliché Alex Wild, domaine public

Les cicadelles de la famille des Cicadellidés développent une autre stratégie. Elles sont recouvertes (ailes et corps, parfois les œufs) d'une poudre, produit de sécrétion formant de minuscules sphères – en fait des isocaèdres tronqués (exactement comme un ballon de football), les brochosomes, de 200 à 700 nm. Les faces sont sculptées de motifs en hexagone ou pentagone et le centre est creux. Ces corps sont composés de lipides et de protéines dont des dérivés de la tyrosine et de la glycine. Ils sont excrétés, sous forme d'une suspension colloïdale, par les tubes de Malpighi. Après chaque mue, la cicadelle les récupère de son anus et s'en oint soigneusement.

Les matériaux des brochosomes ne sont guère hydrophobes ; c'est leur arrangement qui crée une structure évitant l'accumulation d'eau et de contaminants. Ces insectes ne vivent pas dans les milieux humides mais rejettent l'excès de liquide de leur alimentation sous forme de miellat, un milieu de culture dangereux, source d'infections pour eux. On attend de la mise au point de tels corpuscules artificiels la création de revêtements de cuves et de canalisations évitant la formation de biofilms. Les moustiques sont dépourvus de dispositifs hydrophobes à la surface de leurs ailes. Celles-ci risquent donc de se trouver collées par les forces de capillarité de l'eau en

cas de pluie, ce qui clouerait l'insecte au sol⁹. Ils échappent à ce risque en passant du régime normal de battement à 285 Hz à une vibration d'amplitude un tiers et une fréquence triple de la normale. Touchés en plein vol par une goutte d'eau, ils pratiquent l'atterrissage

9. En vidéo à haute fréquence, on a vu des moustiques arrosés embarquer partiellement immergés dans une goutte d'eau et la quitter juste avant qu'elle ne s'écrase au sol.



Soumis à une pluie artificielle, le moustique se colle à une goutte et la quitte juste avant qu'elle ne s'écrase au sol - Cliché Andrew K. Dickerson et al.



Larves de moustiques Culicidés - Cliché CDC - James Gathany - Domaine public



Corixa punctata (Hém. Corixidé) emportant sa bulle d'air sous l'eau
Cliché Jan Hamrsky à lifeinfreshwater.net



Aphelocheirus aestivalis - Cliché Patrick Verasdonck

en catastrophe, tombant 4 fois plus vite que l'individu anesthésié ; en touchant le sol, ils perdent les trois quarts de l'eau embarquée et redécollent en vibrant des ailes pour se sécher.

Ce principe de chasser l'eau par inertie peut s'appliquer à des structures volantes grandes et petites.

■ RESPIRATION AQUATIQUE

Les larves des moustiques *Aedes* (Dip. Culiciné) sont aquatiques ;

elles se tiennent sous la surface, perpendiculairement à celle-ci, pour respirer par un siphon situé à l'extrémité de l'abdomen et relié au système trachéen. Cet organe est constitué de 5 lobes, arrangés en cône, qu'une couche de cire rend hydrophobe et dont les bases convergent vers l'unique stigmat, entrée du tronc trachéen. Il est maintenu en place par la tension superficielle : l'eau ne peut y pénétrer. Quand la larve doit plonger pour

éviter un prédateur, la pression hydrostatique rapproche les lobes, qui ferment le stigmat.

Le système trouve des applications dans les valves des microactionneurs hydrauliques ou pneumatiques.

Les « branchies physiques » sont des bulles accrochées au tégument où se font les échanges gazeux. L'azote en excès et le gaz carbonique expiré se dissolvent dans l'eau. Au bout d'un moment, l'insecte doit émerger pour renouveler les bulles, car elles sont écrasées par la pression. C'est le cas des corises, alias bateliers, (Hém. Corixidés) qui plongent avec une bulle coincée entre le dos et les ailes.

Les plastrons sont des structures hydrophobes du tégument qui retiennent les bulles indéfiniment, celles-ci ne s'écrasant pas. La pression partielle d'azote ne diminue pas et l'oxygène est capté depuis l'eau.

L'imago d'*Aphelocheirus aestivalis* (Hém. Aphélochériidé)¹⁰ est une punaise plate d'1 cm de long, rarement vue car elle demeure au fond des rivières bien oxygénées, où elle peut respirer en continu par son plastron. La recouvrant entièrement (surface 95 mm²), celui-ci est constitué de soies de 0,4 µm de diamètre, longues de 3 µm, espacées de 0,5 µm, et emmagasine un volume d'air presque égal au 1/10 de celui de l'insecte.

La technologie des puces à cellules pourrait tirer parti d'un tel dispositif pour maîtriser le flux gazeux dans les études sur la respiration. ■

À suivre...



10. À (re)lire : Les punaises aquatiques, par Jean-Louis Dommanget. *Insectes* n°108, 1998(1). En ligne à pdf/i108-dommanget.pdf