

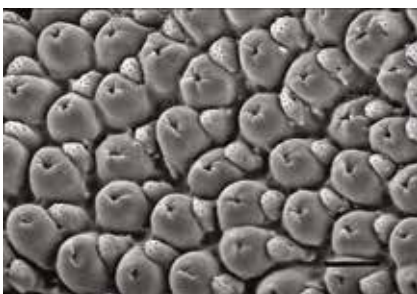
Les insectes ingénieurs. 4

Par Alain Fraval

Ressentir le chaud et le froid et réagir quand ceux-ci perturbent leur métabolisme et leurs mouvements est indispensable aux insectes, animaux ectothermes. Certains affrontent des conditions particulières de température, interne comme externe, et disposent de mécanismes propres leur permettant de ne pas en subir les conséquences. Les ingénieurs en quête d'antigels plus efficaces s'intéressent aux mécanismes permettant aux insectes de résister aux très grands froids.



Emplacement des sensilles thermosensibles (flèche) chez le Dendroctone du pin noir - Cliché © Helmut Schmitz/Uni Bonn



Microscopie électronique à balayage des sensilles thermosensibles de *Melanophila acuminata* dans une fossette (lamelles de cire enlevées) - Cliché © Helmut Schmitz/Uni Bonn

■ PERCEPTION DE LA TEMPÉRATURE

Les très rares insectes xylophages pyrophiles¹, qui recherchent les arbres calcinés pour y pondre, ont particulièrement retenu l'attention. Les femelles du Bupreste pyromètre *Melanophila acuminata* et de *M. picta* (Col. Buprestidés), se dirigent vers les troncs de conifères brûlés ou léchés par les flammes, où ses larves pourront se développer. Par contre, les larves de ces buprestes ne peuvent se développer dans le tronc d'un arbre sain car elles ne peuvent pas contourner les réactions de défense des arbres (production de résines).

Les sensilles thermosensibles des imagos sont groupées dans une fossette de chaque côté du thorax, près de l'insertion des pattes médianes. Chacune est constituée d'une structure cuticulaire sphérique, de 12 à 16 nm de diamètre, avec une cavité centrale reliée à l'extrémité distale

d'un nerf. Une glande y est accolée qui sécrète des lamelles de cire qui assurent la propreté de l'organe. La lumière infrarouge absorbée se traduit par une pression mécanique qui excite le nerf : ces buprestes entendent en quelque sorte ce rayonnement (longueur d'onde 2 à 4 nm) synonyme de bois encore chaud. Ils sont ainsi capables de détecter un incendie sur 10 ha à 12 km de distance.

Les détecteurs de chaleur industriels fonctionnent selon 2 principes : perception de la lumière ou perception de la chaleur. Les seconds sont plus lents et moins sensibles.

On doit, par exemple, à Chaoyang Jiang et ses collaborateurs² la fabrication d'un détecteur infrarouge basé sur le même principe que ceux des buprestes, la transformation de la chaleur en force mécanique. De résolution 10 fois meilleure que celle des dispositifs existants, il est formé d'une membrane fermant une cavité (80 µm de diamètre), se déformant, par flambage.

■ MAÎTRISE DE LA TEMPÉRATURE

Les insectes, animaux poïkilothermes (= ectothermes), ne maintiennent pas leur température interne à une valeur précise comme le font les oiseaux et les mammifères. Ils tolèrent de larges variations de celle-ci, imposées par leur environnement et par leurs déplacements. Toutefois, au-delà de seuils supérieur et inférieur, leur métabolisme, leurs mouvements sont ralentis puis abolis. L'excès de chaleur entraîne le risque de dessiccation tandis que celui de froid se traduit par le gel.

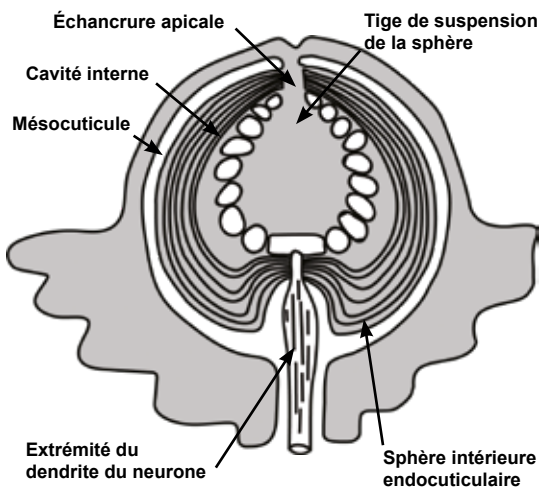


Schéma en coupe transversale d'une sensille (sans les cellules accessoires) - Dessin BD

1. À (re)lire : « Pyrophiles, ces insectes qui aiment le feu », par Bruno Didier. *Insectes* n°156, 2010(1), en ligne à www7.inra.fr/opie-insectes/pdf/i156didier.pdf, et « Le bupreste méfiant », Épingle de 2018 à epingle18.htm#bup
2. [//doi.org/10.1021/cm060416x](https://doi.org/10.1021/cm060416x)

TRPA1 et Gr28b : le chaud a un sale goût

La Mouche du vinaigre adulte répond à des changements de température en se plaçant là où celle-ci est proche de son préférendum. Le mécanisme est double. Le déclencheur interne est le canal récepteur de potentiel transitoire TRPA1³. Situé dans la tête, il répond à un changement graduel. Face à un brusque coup de chaud, ce seraient des sensilles externes, localisées sur l'arista (antenne), qui réagiraient. Sur ces sensilles se trouve le récepteur Gr28b, connu pour intervenir dans la perception gustative et être impliqué dans le choix de l'hôte par des insectes hématophages.

Avec les récepteurs Gr, que l'on pourrait implanter par génie génétique, on disposerait d'un outil de recherche performant pour, par exemple, activer tel ou tel groupe de neurones par un simple rayon laser.

*Transient receptor potential ankyrin 1. Les TRP sont des canaux ioniques impliqués dans la transmission d'informations du monde extérieur vers le domaine cellulaire et dont certains sont thermosensibles.

Ils disposent de deux types de moyens pour assurer leur thermorégulation, ceux qui agissent sur la production de chaleur interne et ceux qui agissent sur les échanges thermiques avec l'extérieur.

La thermorégulation est intimement liée à la capacité de voler, notamment. Voler en effet entraîne une dépense considérable d'énergie, ce qui suppose un métabolisme élevé ; les muscles alaires déploient une forte puissance, laquelle dégage beaucoup de chaleur. En conditions tempérées celle-ci est évacuée ; au soleil ou dans un endroit plus chaud, un mécanisme de thermorégulation doit intervenir.

La plupart des insectes sont actifs là où cerisque est minime ; certains, pas forcément extrémophiles possèdent des adaptations particulières pour survivre à des températures normalement incompatibles avec la vie.

■ SE REFROIDIR

Les battements à haute fréquence des ailes des papillons de nuit produisent de la chaleur au niveau du thorax. Leur vaisseau dorsal est ainsi disposé qu'il y fait une boucle, qui conduit l'hémolymphe réchauffée dans l'abdomen, qui sert de radiateur et permet d'évacuer la cha-



Une mouche (Dip. Calliphoridae) régurgitant une goutte d'eau - Cliché Philippe Caillon



La fausse-chenille de la tenthrède australienne de l'eucalyptus exsude, par l'anus (flèches), une sécrétion semi-liquide dont elle s'enduit pour diminuer la chaleur de son corps par évaporation. Par la bouche, elle régurgite aussi une goutte jaunâtre qui est en même temps répulsive - Cliché Andrew Allen à www.flickr.com/photos/148646732@N07/

leur. Le bourdon a été bien étudié : l'ouvrière doit produire de la chaleur pour voler par temps froid, et la reine pour couvrir. Il contracte pour ce faire ses muscles thoraciques mais la surchauffe guette. On observe la même disposition que chez les papillons de nuit.

D'autres insectes tirent parti de l'évaporation. Pourtant, la quantité d'eau dans le corps est très faible et doit donc être renouvelée au fur et à mesure des dépenses. Le procédé est utilisé par des insectes qui ont un accès permanent à des sources



Évacuation d'une goutte, mélange de sang et d'urine chez une anophèle - Cliché CDC/William Collins

liquides : sève, sang ou collections d'eau. Les mouches³ et les abeilles en surchauffe du fait de la température extérieure ou d'un vol intense régurgitent du liquide, en

3. À (re)lire : Knuth en fait baver aux mouches, par Alain Fraval. *Insectes* n°171, 2013(4), en ligne à www7.inra.fr/opie-insectes/pdf/1171fraval2.pdf. On sait maintenant que la goutte liquide émise par les Calliphoridae est une sorte de radiateur.

entretenant une goutte à l'extrémité de leurs pièces buccales. Chez les anophèles (Dip. Culicidés) c'est de l'anus que sourd une goutte formée de sang et d'urine. À partir de 37 °C, les fausses-chenilles de la tenthrède australienne de l'eucalyptus *Perga dorsalis* (Hym. Symphytes) s'enduisent d'une matière semi liquide issue de leur anus et parviennent ainsi à abaisser de 7°C leur température quand l'air est à plus de 42°C, température létale pour eux.

Des cigales du désert de Sonora, du genre *Cacama* ou *Diceroprocta* (Hém. Cicadidés) possèdent un dispositif unique chez les insectes : elles transpirent au travers du tégument. L'eau est amenée aux pores situés sur le thorax par des conduits⁴.

Dans certains cas, la coloration participe à la thermorégulation. Un tégument noir absorbe plus de rayons infra-rouges qu'un clair et de ce fait, chauffe plus ; mais il protège mieux des rayons ultra-violets.

Les individus du Tétrix des clairières *Tetrix undulata* (Orth. Tétrigidé) se posent là où la température du sol est la plus proche de leur température corporelle optimale, mais il peut y avoir conflit entre cette thermorégulation comportementale et la recherche d'un lieu où ils se fondent mieux avec le substrat, pour se protéger contre les prédateurs⁵.

On connaît aussi des insectes « thermomètres » (Orthoptères, Odonates) qui changent de couleur rapidement avec la température externe – cas de *Kosciuscola tristis* (Orth. Acrididé), criquet montagnard aus-



Austrolestes annulosus - Cliché JJ Harrison à www.jjharrison.com.au, CC BY-SA 3.0

tralien qui, réchauffé au soleil du matin, vire de noir à bleu turquoise, ce qui lui permet de s'alimenter aux heures chaudes sans souffrir⁶.

■ SE RÉCHAUFFER

La couleur du leste australien *Austrolestes annulosus* (Odon. Lestidé) change au cours de la journée. En phase sombre, il se place, en vol comme perché, face au soleil (dont il perçoit les rayons avec d'autres organes que les yeux), ce qui peut lui procurer par très beau temps un gain de 15 °C de sa température corporelle ; de quoi gagner 2 heures de chasse le matin⁷.

Les libellules et de nombreux papillons lézardent au soleil – « activité » nommée souvent basking – jusqu'à parvenir à une température suffisante pour s'activer.

En captant les rayons du soleil, qui peuvent être insuffisants ou absents, des insectes augmentent leur température par une mise en action des muscles du thorax, au point fixe, jusqu'à ce que ceux-ci puissent délivrer assez de puissance pour le décollage et l'entretien du vol. Les muscles vibrent imperceptiblement puis de façon plus marquée. Chez les bourdons, le glycogène est le carburant, remplacé durant le vol par le tréhalose puisé dans l'hémolymphe.

■ ÉVITER LE GEL

Il s'agit d'empêcher la formation de cristaux de glace dans les liquides cellulaires, lesquels endommagent les membranes. Les insectes qui résistent à des gels intenses pro-

duisent des antigels au sein de leurs cellules. Si le glycérol⁸, présent aussi chez les poissons des eaux très froides, est l'antigel vedette depuis longtemps, d'autres substances, souvent de nature protéique, sont impliquées. Chez le Ténébrion rugueux *Upis ceramboides* (Col. Ténébrionidé), insecte xylophage des arbres léchés par le feu, qui résiste en Alaska à -60 °C, un autre composé, un xylomanane (à base de

Liqueur antigel

Réaumur, déjà s'était interrogé sur la résistance inégale des chenilles aux grands froids. Il écrit : « Les espèces de sang, les humeurs qui circulent dans les vaisseaux des différentes espèces de chenilles sont donc les unes par rapport aux autres ce qu'est de l'esprit de vin, ou une eau de vie très forte par rapport à une eau de vie extrêmement faible ».

La première restant liquide et la seconde gelant par le même froid. Et ajoute que l'hémolymphe des insectes, qu'il appelle liqueur, « n'est pas aussi simple que nous le ferions juger les épreuves auxquelles nous nous tenons ordinairement pour connaître la nature des liqueurs »*

À sa suite, en 1771, Charles Bonnet** suggérait d'utiliser l'hémolymphe des chenilles résistantes au froid : « Si on pouvait extraire des vaisseaux de l'insecte une certaine quantité de cette liqueur, qui paraît fort aqueuse, et que nos animalcules pussent y vivre, on pourrait ainsi se procurer des résultats qui nous vaudraient de nouvelles connaissances sur l'économie animale ».

D'après « Réaumur et la résistance des insectes à la congélation », par Jean Rostand. *Rev. Hist. Sci.*, 15 (1), 1962.

* *Mémoires pour servir à l'histoire des insectes*, t. II, 1736.

** Sur ce naturaliste genevois : « Charles Bonnet, célèbre à 20 ans ! », par Jacques d'Aguilar. *Insectes* n° 171 (2013-4). En ligne à pdf/i171a-aguilar.pdf

4. À (re)lire : *Rituels de cour chez Cacama dissimilis*, par Alain Fraval. *Insectes* n°186, 2017(3). En ligne à pdf/i186-fraval3.pdf

5. DOI 10.1007/s10682-006-6178-8

6. Voir « Couleurs d'insectes », par Alain Fraval. *Insectes* n°188, 2018(1). En ligne à www7.inra.fr/opie-insectes/pdf/i188-fraval1.pdf

7. DOI: 10.1071/ZO9740457

8. Découverte due à Jean Rostand en 1946.



Ténébrion rugueux - Cliché Stanislav Šnáll, CC BY 3.0



Galle de Cécidomye strobilaire - Cliché Steven Katovich, USDA Forest Service, Bugwood.org, CC-A 3.0

sucre et d'acides gras) a été isolé⁹. L'examen d'insectes nivicoles sous climat tempéré, comme le Borée *Boreus hiemalis* (Méc. Boréidé)¹⁰, la mouche aptère *Chionea sp.* (Dip. Limoniidé), et des larves de Coléoptères Cantharidés, a révélé l'accumulation de tréhalose dans leur hémolymph. Ce sucre est une réserve d'énergie et un anti-stress général, modérant les effets de l'hypoxie, de la dessiccation en plus du froid.

La larve de la Cécidomye strobilaire *Rhabdophaga strobiloides* (Dip. Cécidomyidé), qui hiverne au sein de la galle qu'elle provoque sur le saule est capable de survivre à -56 °C, le glycérol représente la moitié de son poids. La larve du Scolyte rouge *Cucujus clavipes* (Col. Cucujidé) ne subit jamais de froid intense, car elle hiverne sous la neige. Elle détient pourtant le record en survivant à -100 °C en conditions expérimentales¹¹, grâce

à des substances anticongélation et en parvenant à une dessiccation quasi complète. On a identifié chez *Dendroides canadensis* (Col. Pyrochroïdé) 13 protéines antigél – dont 4 sont présentes dans l'hémolymph – agissant avec des activateurs qui sont des substances de faible poids moléculaire comme le glycérol ou des protéines.

Tout récemment (avril 2019), une équipe pluridisciplinaire (institut Max Planck, Allemagne) a repris l'analyse de la structure moléculaire des antigels d'insectes, à partir d'une prospection poussée dans les zones les plus froides du Globe. Les protéines trouvées ont une structure ondulée qui retient l'eau dans ses canaux. Lorsqu'elles touchent la glace, les molécules d'eau ne gèlent pas car elles sont modifiées, acquérant un lien hydrogène différent. Ces protéines sont les plus actives connues comme antigél ; le record d'efficacité est détenu par la Rhagie

9. Signalé par l'Épingle « Antigél » de 2009. En ligne à [epingle09.htm#gél](#)

10. À (re)lire : Découverte de la Puce des neiges en Saône-et-Loire, par Benoît Martha et Georges Clabaud. *Insectes* n° 170, 2013(3). En ligne à [pdf/i170martha-clabeau.pdf](#)

11. Voir « Cryoprotection : l'art de survivre à un froid extrême », par Benoît Gilles. À [//passion-entomologie.fr/cryoprotection-cucujus-clavipes/](#)

La régulation thermique en communauté

En plus de mesure dites passives – le choix du lieu, l'architecture du nid*, l'installation du couvain au meilleur endroit du point de vue thermique – les insectes eusociaux adoptent des comportements individuels – comme la ventilation alaire et le refroidissement par évaporation – dont la somme régule la température du nid, sans aucun système directeur centralisé. Leur succès écologique est dû en grande partie à leurs capacités de « climatiseurs », qui leur permettent de s'affranchir des conditions extérieures, dans une bonne mesure. Le couvain de l'Abeille mellifère, par exemple, est activement maintenu entre 33 et 36°C, qu'il gèle ou que la température atteigne 45 °C au dehors.

Contre le froid, les abeilles adultes (toutes les espèces, autant qu'on sache) s'entassent et produisent de la chaleur par thermogenèse musculaire ; la régulation est basée sur l'effectif d'ouvrières à la tâche. Chez les guêpes Vespines, moins étudiées, le même procédé est mis en œuvre mais, en plus, des ouvrières soufflent de l'air chaud par leurs stigmates sur les nymphes ; on soupçonne aussi les larves des frelons de participer au chauffage en contractant leurs muscles. Les termites produisent aussi de la chaleur métabolique dans leurs nids à l'architecture si bien « pensée ». Si certaines fourmis du genre *Formica* prennent des bains de soleil, l'entassement et le chauffage musculaire suffisent à maintenir 25 à 30 °C au centre du nid par temps de gel ; la pratique est également efficace au sein des bivouacs des fourmis légionnaires.

Par ailleurs, les reines fondatrices des bourdons et des frelons couvent leur toute première progéniture, en y appliquant leur abdomen ou en se tenant tout près. Leur chaleur, produite dans le thorax, est envoyée vers l'abdomen par des contractions spécifiques. Des ouvrières de l'Abeille mellifère pratiquent également la couvaie.

Un cas particulier de production de chaleur et de système de défense est la façon dont les ouvrières de l'abeille asiatique *Apis cerana* tuent les frelons *Vespa velutina* en faisant une boule autour d'eux : le prédateur succombe à la chaleur.

Contre le chaud, la pratique de la ventilation, en poussant l'air chaud vers l'extérieur par le battement des ailes, est connue des abeilles (y compris les mélipones) et des guêpes (*Polistes* et *Vespula*). Ce faisant, l'Abeille mellifère, à l'entrée de la ruche, se place face au nid, tandis qu'*Apis cerana* regarde à l'extérieur.

Les abeilles à miel, des guêpes des genres *Polistes*, *Vespula* et *Vespa* (frelons) ont recours à l'évaporation d'eau pour climatiser leur nid. Des ouvrières déposent des gouttes d'eau au bord des cellules ; certaines les étalent avec la langue.

En cas de surchauffe dans le nid, une partie des ouvrières s'envole, défèque et revient au bout de quelques minutes.

* À (re)lire l'Épingle de 2019 : « Une société de climatiseurs » à [epingle19.htm#cli](#)
Pour plus de précisions : DOI: 10.1016/S0065-2806(06)33003-2



Larve de *Dendroides canadensis* - Cliché Ansel Oommen, Bugwood.org, CC-A NC 3.0

mordante *Rhagium mordax* (Col. Cérambycidé), insecte saproxylophage dont les larves creusent le bois mort des conifères. La larve produit ces protéines antigels toute l'année, au niveau de la cuticule, de la lumière du tube digestif et de l'épithélium intestinal.

Cet aspect de la thermorégulation des insectes est de loin le plus étudié. Il s'agit en effet de trouver des sources (d'inspiration) de produits empêchant la formation de glace sur les ailes des avions, dans les tissus et greffons conservés et dans les glaces alimentaires, notamment. Les recherches ont surtout été menées chez les plantes et les poissons. On explore maintenant le monde des insectes où les protéines qu'on y a déjà découvertes sont de 10 à 40 fois plus puissantes.

La firme Unilever a déposé un brevet portant sur une protéine antigel d'insecte produite par génie génétique qui pourrait être ajoutée à ses glaces¹². La glace peut ainsi être conservée et transportée à -40°C , où elle est moins exposée au risque de réchauffement, sans que s'y forment des cristaux une fois dans le congélateur domestique. ■

12. Schroeder B.H. *et al.*, 2018.

DOI: 10.1002/adma.201705322