



Mâle de *Bombyx mandarina*. Les antennes plumeuses augmentent la surface de captation des odeurs - Cliché Michel Renou

Par Michel Renou

Les insectes ingénieurs. 5

Odeurs et biomimétisme

Les insectes évoluent dans un paysage d'odeurs dont nous n'avons qu'une idée très partielle. Ils utilisent leurs capacités olfactives très développées pour l'interpréter et ainsi s'alimenter, communiquer entre eux et s'accoupler. Leurs neurones olfactifs détectent et analysent des quantités très faibles de ces sémi-chimiques qui leur sont indispensables. Leurs performances dans ce domaine en ont fait un modèle incontournable en olfaction. Si on peine à les imiter, on s'en sert en biocontrôle des insectes ravageurs.

Les performances des insectes pour retrouver partenaire, proie, ou hôte grâce à l'olfaction fascinent depuis longtemps les entomologistes. Leurs remarquables capacités à détecter des concentrations très faibles d'une odeur et leur exceptionnelle aptitude à localiser sa source dans un

environnement complexe méritent bien notre admiration. Dès la fin du XIX^e siècle Jean-Henri Fabre, constatant qu'une femelle dissimulée à leur vue attire de nombreux mâles du Grand Paon de nuit *Saturnia pyri* (Lép. Saturnidé)¹, suspectait le rôle « des effluves analogues à ce que nous appelons odeur » et

amputait les antennes pour tenter de localiser le siège de l'olfaction. Depuis des progrès considérables ont été accomplis. La première identification d'une phéromone sexuelle de papillon, *Bombyx mori*, est due à Adolf Butenandt en 1959². Par la suite les progrès technologiques dans l'analyse des substances naturelles et l'intérêt des chimistes organiciens pour leur synthèse ont rendu facilement disponibles des phéromones de synthèse aux éco-physiologistes de l'insecte qui les utilisèrent au laboratoire ou dans la nature. Le britannique John S. Kennedy (1912-1993) fut l'un des premiers à s'intéresser aux mécanismes de navigation des papillons dans un panache de phéromone, construisant un « tunnel de vol » pour mieux pouvoir analyser les « manœuvres » accomplies par le papillon lors de sa remontée du courant d'air odorisé par l'odeur de la femelle. Très tôt, la possibilité d'exploiter ces comportements

1. À relire : Fabre ou la soirée mémorable par Jacques d'Aguilar, *Insectes* n°159, 2010(4), en ligne à www7.inra.fr/opie-insectes/pdf/i159aguilar.pdf

2. Butenandt, auquel ses travaux sur les hormones sexuelles humaines avaient valu le prix Nobel de Chimie en 1939, a extrait quelques mg de « bombycol » de 500 000 femelles de Ver à soie.



1. Mâle de *Bombyx disparate Lymantria dispar* : antennes ; les antennes bipectinées ont un long flagelle segmenté. Elles sont fragiles mais le mâle vit peu de temps et doit trouver rapidement une femelle. 2. Corée marginée *Coreus marginatus* : antennes allongées, cylindriques. 3. Le Charançon rouge des palmiers *Rhynchophorus ferrugineus*, qui creuse des galeries dans le stipe des palmiers, a de solides antennes en massue. 4. Les antennes en lamelles du Lucane Cerf-volant *Lucanus cervus* offrent une surface sensorielle importante et peuvent s'ouvrir ou se refermer selon que l'insecte sent ou doit fouir. - Clichés Michel Renou

pour lutter contre les ravageurs a donné lieu à des applications pratiques. Ainsi, Bruno Götz fut-il l'un des premiers dès la fin des années 1930 à utiliser le piégeage sexuel à l'aide de femelles vierges de papillons afin de détecter la présence et suivre l'évolution des populations de ces ravageurs dans les vignobles allemands³.

■ ORGANES OLFACTIFS ET DÉTECTION DES ODEURS

Les insectes détectent les odeurs grâce à leurs antennes. Celles-ci ont des formes très variées d'un groupe à l'autre mais un plan fonctionnel commun. Elles portent des milliers de sensilles olfactives dont la paroi est percée de pores pour permettre aux molécules odorantes d'atteindre les neurones récepteurs. Ces neurones jouent le rôle de capteurs et envoient un signal nerveux aux centres sensoriels du cerveau de l'insecte.

L'olfaction est en effet une affaire de molécules : la rencontre entre des composés organiques volatils (COV) présents dans l'air ambiant et des protéines réceptrices exprimées dans les membranes de neurones spécialisés. Seuls les composés volatils qui peuvent se lier à ces récepteurs olfactifs (OR) sont perçus et peuvent être qualifiés d'odorant. Chaque espèce d'insecte exprime son propre répertoire d'OR et évolue dans son propre paysage odorant constitué des COV qu'elle peut détecter. Chaque COV est mélangé à beaucoup d'autres dans l'air et reconnaître une odeur est donc un processus complexe pour l'insecte. Une solution élégante s'est développée au cours de l'évolution : faire exprimer des types fonctionnels d'OR, chacun ne liant qu'une gamme plus ou moins étroite de COV, par des neurones sensoriels différents. Ainsi en analysant l'activité des milliers de neurones des

antennes, le cerveau de l'insecte construit une « image olfactive » et identifie bien plus d'odorants simples qu'il ne possède de types différents d'OR.

La liaison d'un composé odorant sur l'OR provoque une modification de l'activité électrique dans le neurone récepteur olfactif. Plus de molécules odorantes se fixeront sur les récepteurs, et plus la réponse électrique du neurone sera forte. Le neurone récepteur code ainsi la concentration de l'odeur dans l'air. Des composés odorants différents excitent des neurones sensoriels différents. Les messages nerveux qui quittent l'antenne pour aller vers le cerveau contiennent donc une information sur la force de l'odeur et sur sa nature chimique. Chaque neurone de l'antenne est en effet relié par son axone aux centres de l'olfaction situés dans le cerveau de l'insecte. L'information y est traitée par des réseaux de cellules nerveuses au cours d'un processus appelé « codage sensoriel ». L'analyse de patrons d'activité des différents neurones permet au cerveau de mesurer les proportions relatives des composés, donc reconnaître des odeurs complexes comportant plusieurs composés odorants chimiquement différents, y compris si ces mélanges ne diffèrent que par les proportions de leurs constituants. Cette analyse combinatoire réalisée par les neurones du cerveau permet à l'insecte de discriminer des centaines d'odeurs écologiquement pertinentes.

■ ORIENTATION ET NAVIGATION

La perception d'une odeur et sa reconnaissance déclenchent une réponse comportementale chez l'insecte, souvent une augmentation de son activité locomotrice associée à un déplacement orienté. La sensibilité de l'in-

3. Un point sur l'histoire : Les phéromones d'insectes, 30 ans de recherches, par Janine Pain. *Insectes* n° 69 1988(2). En ligne à [/pdf/168pain.pdf](#)

secte et sa capacité rapide à analyser les odeurs lui permettent en effet d'utiliser son odorat pour localiser la source de l'odeur. Depuis les travaux de Kennedy, techniques et outils se sont perfectionnés permettant désormais d'enregistrer et d'analyser des trajectoires de vol avec une très grande précision, tout en recréant des univers virtuels permettant de déterminer quelles informations sont essentielles à l'insecte pour qu'il puisse s'orienter. Le vol vers des odeurs a été très étudié chez les Lépidoptères et les insectes hématophages, mais aussi chez les drosophiles. Un tunnel de vol permet de créer des flux d'air calibrés que l'on peut odoriser tout en contrôlant l'environnement visuel de l'insecte (voir p. suivante). Des caméras enregistrent la position de l'insecte toutes les 10 millisecondes, puis la trajectoire est calculée et analysée. Pour les insectes marcheurs, des compensateurs de locomotion enregistrent la marche sur des distances non limitées par la taille du dispositif, tout en maintenant l'insecte dans un environnement odorant précisément contrôlé. Ainsi sait-on qu'un papillon mâle intègre des stimuli visuels, mécaniques et olfactifs pour localiser une femelle. Lorsqu'il perçoit le panache de phéromone qui émane d'une femelle située en amont du courant d'air le mâle s'envole pour remonter le flux odorant. Mais dans la nature, les turbulences et les obstacles modifient considérablement la géométrie du panache, qui est brassé, dilué, et mélangé à d'autres odeurs. La teneur moyenne en phéromone, déjà faible à l'émission, chute très vite cependant que des filaments d'air chargé de phéromone persistent longtemps, transportés par le vent. Le papillon mâle ne peut se fier à un gradient de concentration mais détecte ces filaments qu'il remonte comme une trace aérienne.



Sensilles olfactives sur une branche de l'antenne du mâle de la Noctuelle ipsilon - Cliché microscopie électronique à balayage par D. Tauban et M. Renou, INRA

■ UTILISER DES ODEURS

POUR MANIPULER LES INSECTES

Les progrès en physico-chimie ont permis d'identifier les phéromones d'un grand nombre de ravageurs. Les chimistes organiciens ayant mis au point des méthodes de synthèse à haut degré de pureté, des attractifs ont été produits en quantité suffisante pour le biocontrôle des ravageurs. Certains COV reconnus par un OR déclenchent une attraction. C'est le cas des phéromones sexuelles des papillons utilisées dans les pièges qui permettent d'avertir précocement de la présence d'un ravageur, mais aussi des attractifs de mouches des fruits (Téphritidés), ou des phéromones d'agrégation de plusieurs familles de Coléoptères utilisés en piégeage de masse pour détruire ces ravageurs. La diffusion de plusieurs mg/ha de phéromone de synthèse brouille la communication sexuelle et empêche les papillons mâles de trouver les femelles pour les féconder.

D'autres VOC reconnus par les récepteurs déclenchent au contraire la fuite de l'insecte (répulsifs) ou le dissuadent d'attaquer son hôte. Cette approche est bien connue

pour se protéger des Diptères hématophages. Elle est aussi employée dans les cultures en association où les émissions volatiles de plantes répulsives masquent l'odeur de la plante cultivée aux insectes qui la consomment. On peut enfin se servir de la capacité de certains COV à interagir avec un OR empêchant par là même la détection de son ligand naturel. L'identification relativement récente des récepteurs olfactifs et

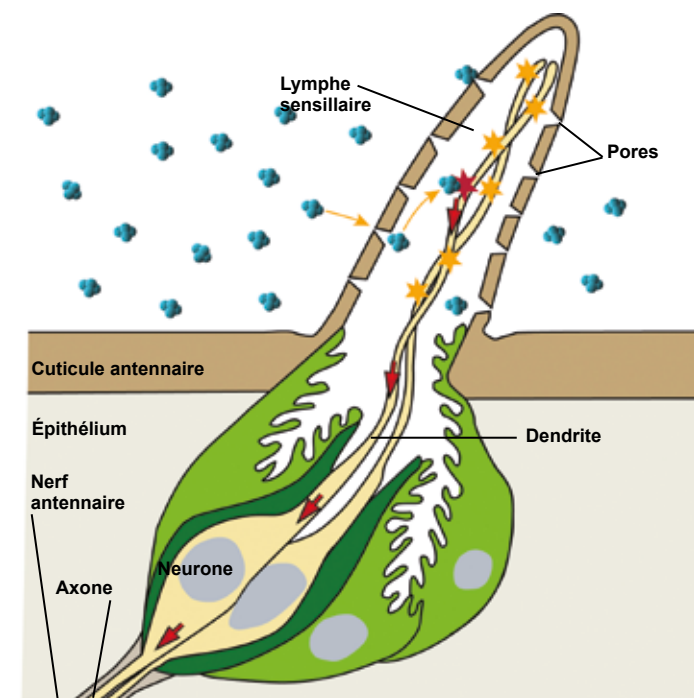


Schéma en coupe d'une sensille olfactive. ● : molécules odorantes. ★ : récepteurs olfactifs, protéines transmembranaires exprimées au niveau de la membrane du dendrite. ★ : ce récepteur est passé « au rouge » après avoir reconnu une molécule odorante : signal transmis - Ill. par BD



Tunnel de vol pour l'étude de la Noctuelle ipsilon. La fumée permet de visualiser le panache d'odeurs - Cliché M. Renou - INRA

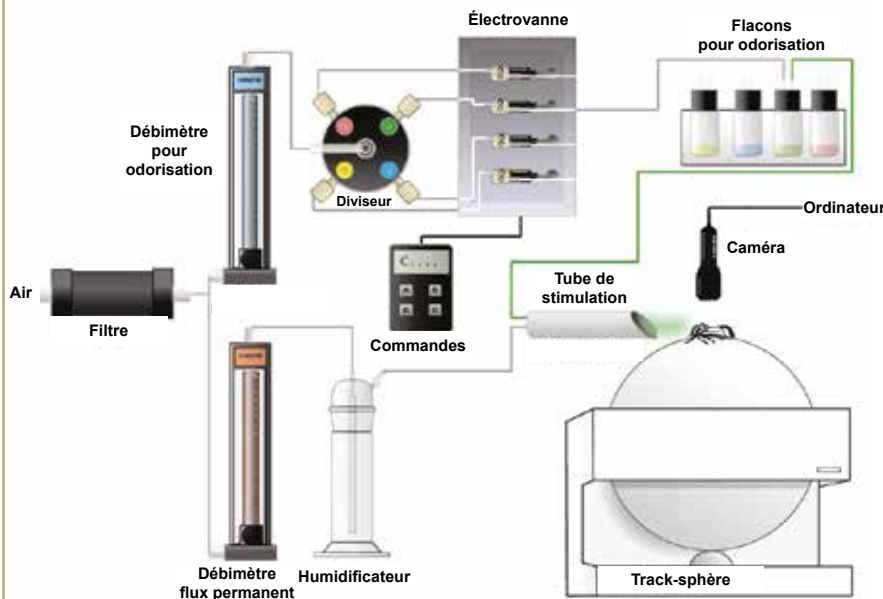


Schéma d'un compensateur de locomotion. Le système de stimulation permet de choisir les odeurs proposées à l'insecte. Une caméra enregistre la marche de l'insecte posé sur une sphère mobile. Ses déplacements sont analysés par un ordinateur qui pilote en retour deux moteurs entraînant la sphère dans le sens inverse. L'insecte a ainsi l'illusion d'un déplacement libre et sa marche est enregistrée tout le temps pendant lequel le stimulateur programmable lui envoie les odeurs que l'on teste.- Ill. par Maxime Renou

autres protéines associées à l'olfaction, elle date de moins de 25 ans, permet d'envisager de rendre ce blocage encore plus efficace. Des tentatives ont été faites avec des dérivés fluorés, inhibiteurs d'enzymes antennaires. Leur mode d'action partiel et une interrogation sur l'innocuité environnementale de la diffusion d'atomes de fluor, n'ont pas permis de développement agronomique. En revanche, de grands espoirs sont mis dans la conception assistée par ordinateur d'antago-

nistes puissants et sélectifs grâce à la modélisation des sites accepteurs et des mécanismes moléculaires de reconnaissance récepteur-odeur.

■ EXPLOITER LES CAPACITÉS DE DÉTECTION DES INSECTES

Les capacités de détection d'insectes très spécialisés sont elles-mêmes sources d'inspiration. L'entomologie légale utilise depuis longtemps les « escouades » d'espèces nécrophages qui viennent coloniser un cadavre, chacune à

un moment bien précis après le décès, pour dater celui-ci. Les insectes pyrophiles qui pondent dans le bois brûlé réagissent à la chaleur de l'incendie mais aussi à son odeur⁴. L'identification des COV responsables de ces attractions a été entreprise afin de permettre de dater le décès ou de détecter précocement un départ de feu en analysant les émissions volatiles.

Si les insectes répondent de manière innée à de nombreuses odeurs, ils peuvent aussi apprendre. Il y a quelques années la presse généraliste a beaucoup parlé d'insectes dressés à détecter des traces d'explosifs dans les aéroports. Des abeilles ont été conditionnées à répondre à des odeurs d'explosif en étant récompensées par une solution sucrée. Une abeille indifférente au début de l'expérience à une odeur deviendra peu à peu réceptive si celle-ci précède régulièrement le contact avec la solution sucrée et elle étendra sa langue à la présentation de la seule odeur. Une fois l'abeille ainsi conditionnée, l'extension de sa langue pourra donc être interprétée comme marqueur de la présence de l'explosif émettant ce composé. Malheureusement, la mémoire de l'abeille s'efface rapidement en l'absence de renforcement et le maintien de ces abeilles lanceuses d'alerte demande beaucoup d'attention.

Le fonctionnement de l'olfaction de l'insecte est basé sur trois principes simples :

- 1- des « capteurs » sélectifs, les OR, dont chaque type ne lie qu'une partie des COV ;
- 2- un système de transduction qui transforme dans le neurone le signal chimique en un signal électrique dans les neurones de l'antenne ;
- 3- un « calculateur » qui analyse l'activité au sein du réseau de neurones. Comment imiter ce système si performant ? Nous savons parfaitement analyser des patrons complexes et de grandes quantités d'information grâce aux performances

4. À (re)lire : Pyrophiles, ces insectes qui aiment le feu, par Bruno Didier. *Insectes* n°156, 2010(1), en ligne à pdf/i156didier.pdf et *Insecte ingénieurs* 4, par Alain Fraval, *Insectes* n°194, 2019(3).

de nos ordinateurs. Mais si nos capteurs chimiques basés sur des oxydes métalliques ont bien une certaine sélectivité ils restent bien en deçà des performances en termes de spécificité et de sensibilité des récepteurs d'insecte. Ils sont aussi trop lents pour suivre la dynamique des signaux odorants qui fluctuent au gré des turbulences de l'air.

Des biocapteurs pourraient utiliser les nombreux récepteurs olfactifs d'insecte qui ont été caractérisés fonctionnellement. Cependant, cela suppose d'isoler le récepteur, puis de l'associer à un environnement qui assure la transduction comme le fait le neurone de la sensille. Des OR d'insecte ont tout d'abord été exprimés dans des cellules non olfactives, comme des ovocytes d'amphibien, les réponses étant enregistrées par électrophysiologie. Cette approche est très utilisée pour « désorphaniser » les récepteurs d'insectes, c'est-à-dire connaître l'ensemble des composés odorants qu'ils peuvent lier, mais est trop lourde pour être opérationnelle sur le terrain car elle nécessite de maintenir des cellules vivantes. Une étape supplémentaire a été franchie en 2018 lorsque des biosenseurs expérimentaux ont été fabriqués par Khadka et collaborateurs en immobilisant sur une surface en or des récepteurs olfactifs de *Drosophile* reconstitués dans des liposomes.

En attendant de développer des biocapteurs entièrement artificiels, les longues antennes de blattes ou de papillons sont suffisamment robustes pour rester vivantes et délivrer un courant plusieurs heures après leur ablation. Elles peuvent être embarquées dans un système autonome pour « tracer » des odeurs spécifiques. Un prototype a été mis au point pour contrôler la distribution de phéromone dans les vergers et les vignobles traités par confusion sexuelle. On essaye maintenant d'en équiper des drones afin de dresser une carte d'infestation d'un ravageur. Une antenne



Blatte de Madagascar porteuse d'un dispositif miniaturisé d'« électroantennographie ». Ce dispositif permet de recueillir l'activité électrique d'une antenne de papillon pendant que la blatte se déplace. On peut ainsi étudier la locomotion de la blatte lorsque celle-ci entre ou sort d'un champ odorant - Cliché M. Renou - INRA

de papillon a aussi été montée sur un robot doté de roues et piloté par un processeur interprétant les signaux reçus de l'antenne de façon à augmenter les fréquences de rencontre avec la phéromone. Grâce un algorithme simple le robot retrouve une source odorante placée dans un coin de la pièce. En attendant de développer des « robots renifleurs », de telles expériences ont permis de tester de nouvelles hypothèses sur les mécanismes d'orientation du papillon. Enfin, grâce aux outils de la génétique on peut modifier les capacités de détection des antennes d'un insecte en faisant exprimer par ses neurones les récepteurs d'un autre organisme afin de leur permettre de détecter des odeurs d'intérêt.

■ S'INSPIRER

DE LA COMMUNICATION CHIMIQUE

Pour clore cette revue, n'oublions pas que les remarquables capacités des insectes sociaux pour coordonner leurs activités à l'aide de signaux olfactifs sont aussi source d'inspiration. Les fourmis marquent d'une trace odorante le chemin menant à une source alimentaire. Ce faisant elles envoient trois messages à leurs congénères : elles ont trouvé une source d'aliment, sa localisation, et le degré d'actualité (le signal chimique disparaît rapidement s'il

n'est pas renouvelé). Ce mode de communication appelé stigmergie par Pierre-Paul Grassé dès 1959, permet à la colonie d'accomplir des tâches complexes nécessitant de coordonner l'activité de très nombreux individus, alors même que les prises de décision sont décentralisées au niveau de chaque individu qui ne gère que la faible quantité d'information recueillie de ses voisins proches. Il est beaucoup plus économe en puissance de calcul que si un système centralisé devait traiter simultanément la masse d'information provenant de tous les individus. Ceci a inspiré les cybernéticiens chargés de coordonner des essaims de drones affectés à des missions de surveillance. Chaque drone ne communique qu'avec ses voisins par l'intermédiaire de signaux simples, véritables « phéromone numérique », et l'essaim peut ainsi se coordonner pour quadriller efficacement le terrain. ■

L'auteur

Michel Renou est chercheur à l'INRA de Versailles. Il s'intéresse à la communication chimique chez les insectes et pour cela étudie la détection des odeurs et le comportement chez des papillons, des punaises ou des Coléoptères.

Contact : michel.renou@inra.fr