

L'INTELLIGENCE COLLECTIVE CHEZ LES ABEILLES

Leur fameuse danse permet de signaler et de localiser une source de nourriture à leurs congénères. Et lorsqu'il leur faut choisir le meilleur site possible, elles se trompent rarement. Mais comment délibèrent-elles ?

**MATHIEU LIHOREAU,
TAMARA GÓMEZ-MORACHO**

Tous deux mènent leurs recherches au Centre de recherches sur la cognition animale (CRCA), Centre de biologie intégrative (CBI), (CNRS, Université Paul Sabatier, Toulouse).



Vivre en groupe permet de résoudre des problèmes difficiles, voire impossibles, à résoudre seul : les individus acquièrent de l'information indépendamment les uns des autres, puis la partagent afin de trouver une solution commune à un problème. Ces phénomènes « d'intelligence collective » ont été décrits à travers le règne animal, dans les groupes humains bien sûr, mais aussi dans les troupeaux de mammifères, les nuées d'oiseaux ou les bancs de poissons (1). Certaines des manifestations les plus spectaculaires sont observées chez les insectes. Considérez, par exemple, les termites du genre *Nasutitermes* qui, bien que mesurant quelques millimètres chacun, construisent de véritables nids cathédrales de plus de dix mètres de haut, avec des réseaux de galeries optimisés sur plusieurs étages et un système d'air conditionné... La forme hexagonale parfaite des alvéoles d'un nid d'abeille est un autre exemple bien connu qui a longtemps fasciné les naturalistes et philosophes. Comment des animaux avec un si petit cerveau réalisent-ils de telles prouesses collectives ? Récemment, l'exploitation de la théorie de l'auto-organisation dans les recherches en éthologie et écologie a permis de lever le mystère sur cette question.

La danse des abeilles

L'étude de l'intelligence collective chez les insectes commence en Allemagne, il y a près de 80 ans, quand Karl von Frisch, alors professeur de zoologie à l'université de Munich, fait la découverte révolutionnaire qui lui vaudra

Communication et danse frétilante

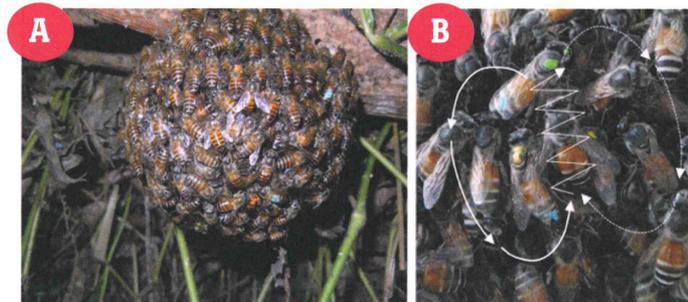


Figure A : Essaim d'abeilles en recherche d'un nouveau site de nidification.

Figure B : Danse frétilante dans le contexte de la sélection d'un nouveau site de nidification. La danseuse (ouvrière au centre) se déplace selon un mouvement qui ressemble à un huit, composé d'une phase frétilante (*zig zag*) et de deux phases de retour (demi-cercles à droite et à gauche). L'orientation de la phase frétilante donne la direction de la cible signalée par rapport au soleil. La durée de la phase frétilante donne la distance de la cible par rapport à l'essaim. Photos : James Makinson.

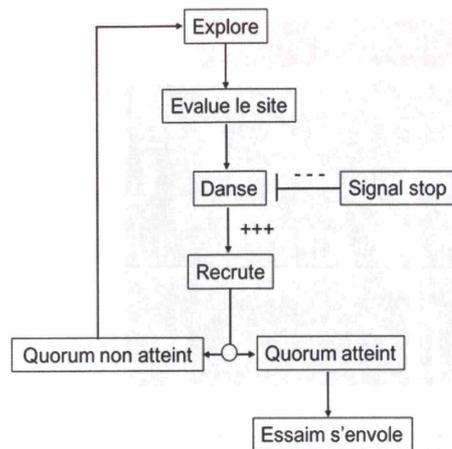
le prix Nobel : les abeilles utilisent une forme de communication symbolique pour signaler l'emplacement de sources de nourriture à leurs congénères du nid. La colonie d'abeille (figure A) est un exemple de communauté parfaitement organisée, dans laquelle plusieurs milliers d'individus stériles, les ouvrières, travaillent dans un but commun : assurer la survie et la reproduction de la femelle reproductrice (reine). Au sein de ce « superorganisme », la division du travail entre les ouvrières est basée sur l'âge. Les ouvrières les plus anciennes s'engagent dans la tâche difficile de butiner, c'est-à-dire collecter du nectar et du pollen sur les fleurs à l'extérieur de la ruche afin de nourrir la colonie. Chez l'abeille domestique (*Apis mellifera*), il est connu depuis l'Antiquité que lorsqu'une butineuse découvre un site de bonne qualité, celle-ci retourne à la colonie et réalise une « danse frétilante » qui consiste à marcher droit sur la surface verticale du nid en frétilant, puis à tourner (à gauche ou à droite) pour revenir au point de départ (figure B). Pendant l'été 1945, von Frisch scrute ce comportement avec minutie et découvre que la durée de la phase frétilante est proportionnelle à la durée du voyage vers le site, et que son angle par rapport à la verticale représente l'angle du trajet vers le site, par rapport au soleil (2). De manière encore plus remarquable, von Frisch découvre qu'une abeille « suiveuse » qui s'est trouvée en contact avec l'abeille « danseuse », est capable de décoder le signal pour ensuite visiter le site par elle-même. À travers cette danse, les butineuses informent donc les autres membres de leur colonie de l'emplacement d'une source de nourriture.

On sait désormais que toutes les abeilles à miel (genre *Apis*) utilisent la danse frétilante pour recruter des

congénères. Il existe cependant des variations entre les espèces, que l'on appelle « dialectes » (3). Selon les espèces, les danses se produisent dans le noir ou à la lumière, à la verticale ou à l'horizontale, et avec la gravité, le soleil ou bien la cible directement comme point de référence. Les autres groupes d'abeilles sociales, tels que les bourdons (*Bombus*) ou les abeilles sans dard (*Meliponi*) possèdent également des formes de communication plus ou moins sophistiquées permettant aux butineuses de recruter d'autres ouvrières. Ces variations dépendent de paramètres écologiques comme la distribution spatiale des ressources.

Le choix d'un nouveau site de nidification

Une dizaine d'années après la découverte de la danse frétilante, Martin Lindauer, un disciple de von Frisch, découvre que la danse est utilisée dans d'autres contextes que le butinage et peut aboutir à des décisions collectives spectaculaires lors de l'essaimage. Des recherches plus récentes nous apportent désormais une bonne compréhension de ce phénomène (4). À la fin du printemps, quand les nids deviennent surpeuplés, les abeilles essaient. Environ un tiers des ouvrières reste dans le nid pour élever une nouvelle reine. Les deux autres tiers partent avec l'ancienne reine pour créer une colonie fille. Choisir un site de nidification est une question de vie ou de mort pour la colonie : les abeilles s'engagent donc dans un débat démocratique en deux phases. Durant une première phase dite d'exploration, les abeilles forment une grappe à environ 30 mètres de la ruche mère (figure A). En observant les essais, Lindauer nota la présence de danseuses qui revenaient sans nourriture et se voyaient souvent couvertes de poussières : il ne >>



Mécanisme de sélection d'un site de nidification par un essaim d'abeilles. La prise de décision collective résulte d'une compétition entre le feedback positif de la danse frétilante et le feedback négatif du signal stop. Lorsqu'un nombre suffisant d'abeilles dansent pour un même site, un quorum est atteint et l'essaim s'envole vers ce site, qui est généralement le meilleur site possible.

>> s'agissant pas de butineuses mais plutôt « d'exploratrices » chargées de localiser des sites de nidification potentiels. Ainsi, des centaines d'ouvrières se mettent en recherche, localisent plusieurs possibilités, et les évaluent chacune en fonction de leur taille, leur obscurité, leur isolement au vent, ou leur protection contre les prédateurs. Durant la phase de vote qui s'ensuit, chaque exploratrice danse pour indiquer la localisation d'un site. Ici, la danse s'exprime à la surface de l'essaim en référence directe avec la position du soleil. Plus la danse est répétée, plus le site est jugé de bonne qualité par la danseuse. La danse a un effet amplificateur (feedback positif) qui stimule des suiveuses à évaluer elles-mêmes le site en question. Plus on observe de danseuses pour un site, plus ce site devient attractif. Cependant, certaines exploratrices peuvent aussi avoir un effet inhibiteur sur les danses (feedback négatif) (5). En effet des exploratrices ayant visité des sites différents que celui qui est déjà signalé peuvent exprimer un « signal stop » : elles émettent un son produit par la vibration de leurs ailes, tout en se cognant la tête contre la danseuse. Lorsqu'un nombre critique (quorum) d'exploratrices danse pour un même site, un « consensus » est atteint et le vote s'arrête. L'essaim s'envole vers le site sélectionné, qui s'avère bel et bien, le plus souvent, le meilleur disponible. Le consensus émerge des interactions entre toutes les exploratrices, sans l'intervention d'un leader ni plan central pour organiser le vote. Dans ce processus, l'équilibre entre le feedback positif de la danse et le feedback négatif du signal stop permet un ajustement rapide de la réponse collective des exploratrices. Un mécanisme simple mais efficace pour réaliser un choix optimal!

Quelles leçons tirer des abeilles ?

Les recherches sur l'intelligence collective des insectes ont trouvé un écho important dans de nombreuses disciplines scientifiques. En éthologie et en écologie, elles ont été pionnières pour la compréhension des comportements collectifs à travers le règne animal. En neurosciences, les parallèles entre le fonctionnement des groupes animaux et des systèmes nerveux éclairent sur les mécanismes de prise de décision. En effet, il existe de nombreuses similarités entre la manière dont un essaim de 1,5 kg d'abeilles et un cerveau humain de 1,5 kg de neurones traitent l'information et arrivent à un consensus. En sciences computationnelles et en robotique, ces travaux ont inspiré le développement de systèmes d'intelligence artificielle pour optimiser des réseaux, qu'ils soient de communication ou de trafic routiers.

Professeur de biologie à l'université Cornell, Tom Seeley (4) propose d'utiliser ces recherches sur les abeilles en psychologie, économie et sciences politiques pour tenter d'améliorer les prises de décisions collectives humaines. Dans nos sociétés, les décisions de groupe se produisent en continu, à petite échelle (accords entre amis et collègues) ou à grande échelle (élections nationales, accords internationaux). De nombreuses décisions collectives sont discutables en termes d'intérêt collectif (élections politiques, bulles spéculatives). Les abeilles montrent que trois ingrédients sont nécessaires à la prise de décisions collectives simples et efficaces :

1 Il faut d'abord identifier un ensemble d'options possibles. Les abeilles font cela avec une force de travail considérable constituée de plusieurs centaines d'individus qui ne visitent jamais chacun exactement les mêmes sites, peut-être parce qu'ils ont des « personnalités » différentes. Ceci augmente la probabilité qu'un des sites découverts soit d'excellente qualité.

2 Il faut ensuite partager l'information. Si un individu ne rend pas publique sa découverte, l'information est inutilisée, ce qui peut aboutir à des décisions de groupe moins bonnes. Les abeilles utilisent la danse frétilante pour indiquer l'emplacement du site découvert. Plus le site est perçu comme bon, plus les exploratrices sont nombreuses à se voir recruter pour lui. Chaque abeille est libre de juger de la qualité du site de manière indépendante.

3 Enfin, il faut agréger l'information pour choisir la meilleure solution. Les abeilles le font en conduisant un débat franc parmi les exploratrices qui supportent différents sites. Ce débat se déroule un peu comme dans une élection politique, dans le sens où il implique de multiples candidats (sites), des idées opposées (danses), des individus fidèles à certains candidats (exploratrices qui supportent un site en particulier), et un ensemble d'électeurs indécis (exploratrices qui ne supportent pas encore de site). Le résultat de l'élection est fortement biaisé en faveur du meilleur site, parce que ses supporteurs produisent la publicité la plus intense et gagnent des convertis plus rapidement. Au final, toutes les exploratrices finissent par supporter un seul site : un accord unanime est atteint. Dans ce processus, chaque individu se fait son propre avis par son évaluation personnelle. Les opinions dissidentes ne sont pas supprimées. Le débat est donc ouvert et la décision finale est basée sur la supériorité intrinsèque du site vainqueur, jugée de nombreuses fois par plusieurs centaines d'individus.

En plus de leur rôle clé en tant que pollinisateurs, et donc dans le maintien de la biodiversité et la production alimentaire, les abeilles sont une source d'inspiration pour étudier les processus cognitifs au niveau individuels et au niveau collectifs. Pendant des milliers d'années, ces insectes ont dû faire face aux tâches complexes de butiner et de sélectionner de bons habitats. La sélection naturelle a façonné ces communautés et leur comportement pour aboutir collectivement aux meilleures décisions possible. Maintenant que nous comprenons comment ces mécanismes ingénieux fonctionnent, nous pouvons nous inspirer pour améliorer nos propres vies... ∞

1) Krause J, Ruxton GD, Krause S. 2010. Swarm intelligence in animals and humans. *Trends in Ecology & Evolution* 25 : 28-34.

2) Von Frisch K. 1967. *The Dance Language and Orientation of Bees*. Harvard University Press, Cambridge, MA.

3) Dyer FC. 2010. « Dance language ». *Encyclopedia of Animal Behavior* 445-453.

4) Seeley TD. 2010. *Honeybee Democracy*. Princeton University Press, Princeton, NJ.

5) Seeley TD, Visscher PK, Schlegel T, Hogan PM, Franks NR, Marshall JA. 2012. « Stop signals provide cross inhibition in collective decision-making by honey bee swarms ». *Science* 335 : 108-111.

INTELLIGENCE COLLECTIVE et intelligence individuelle

Les recherches sur l'intelligence collective des insectes ont longtemps donné la fausse impression que ces phénomènes complexes de groupe émergent à partir d'interactions simples entre individus avec des capacités cognitives limitées. Généralement, il n'existe pas de corrélation entre les capacités cognitives des animaux et la complexité de leurs interactions sociales (1).

L'abeille constitue un excellent exemple. Plus d'un siècle de recherches témoignent de capacités cognitives individuelles étonnamment sophistiquées malgré un cerveau miniature (1 million de neurones chez l'abeille contre environ 100 milliards chez l'Homme). Ces prouesses incluent la capacité d'optimiser des routes, d'apprendre des concepts, la manipulation d'objets, par observation, et d'innover (2). Des travaux récents suggèrent même l'existence d'états physiologiques comparables à nos émotions.

Au niveau collectif, la danse frétilante illustre comment des processus cognitifs individuels, mis en jeu dans les phénomènes de cognition collective, peuvent se révéler de nature très complexe. Pour réaliser une danse, une butineuse doit intégrer en mémoire la localisation du site à signaler ainsi que sa qualité. À cette fin, l'abeille doit au minimum être capable d'estimer les distances (flux d'images perçues sur la rétine), d'apprendre des scènes visuelles (panoramas), de compenser le changement de position du soleil avec le temps (horloge interne), et d'utiliser la lumière polarisée quand le soleil n'est pas visible dans le ciel. L'abeille doit ensuite transcrire la distance à la source en une durée de phase frétilante par un processus encore inconnu : en moyenne une seconde de phase frétilante représente 1 000 m de vol.

Pour lire une danse, une suiveuse doit pouvoir décoder les informations de distance et de direction, et les intégrer dans une mémoire spatiale qui guidera ses futurs voyages. Bien que les mécanismes impliqués dans ces comportements soient encore très mal connus, les suiveuses alignées dans la même direction que la phase frétilante de la danse, auraient plus de chance d'arriver à la nourriture que les suiveuses en contact avec la danseuse sous d'autres angles. En admettant que la suiveuse sait où est l'arrière de la danseuse, déterminer la direction de la source de nourriture pourrait se faire simplement en mesurant son alignement relatif à la gravité.

M.L. et T.G.-M.

1) Lihoreau M, Latty T, Chittka L. 2012. « An exploration of the social brain hypothesis in insects ». *Frontiers in Physiology* 3 : 165.

2) Perry CJ, Barron AB, Chittka L. 2017. « The frontiers of insect cognition ». *Current Opinion in Behavioral Sciences* 16 : 111-118.