

Chez l'homme, l'abstraction – et donc l'acquisition des concepts relationnels – est facilitée par le langage. Quand ils l'enseignent aux enfants, les adultes favorisent les comparaisons entre des entités différentes, liées par une relation identique, en leur appliquant le même mot. C'est le cas, par exemple, lorsqu'ils disent : « Tu as deux bras, deux jambes, deux oreilles. » En revanche, les très jeunes enfants, les primates et les dauphins ont besoin d'un long entraînement pour maîtriser des concepts relationnels. On ne s'attendait donc pas à ce que les abeilles, avec leur cerveau miniature et l'absence d'un langage élaboré, réalisent de telles prouesses cognitives.

Pourtant, depuis le début des années 2000, on a montré qu'elles sont capables de maîtriser plusieurs concepts relationnels (voir la figure 2). Devant l'étonnement des scientifiques, un grand nombre d'expériences et de vérifications ont été effectuées, bien plus que lors d'études similaires sur les primates.

Les abeilles savent compter jusqu'à 4

En 2001, M. Giurfa et ses collègues ont ainsi appris à des abeilles à reconnaître le concept relationnel d'identité. Pour ce faire, ils les ont introduites dans un labyrinthe en Y où une même couleur était indiquée à l'entrée et dans une des branches (contenant une récompense sucrée). Après une phase d'entraînement, non seulement les abeilles se dirigeaient vers la branche repérée par la couleur présente à l'entrée, mais elles étaient capables de transférer cette règle d'identité à des formes et, de façon surprenante, à des odeurs ! En effet, quand une forme géométrique ou une odeur était présentée à

Des abeilles physiionomistes

Les abeilles peuvent apprendre à reconnaître des visages figurés par un assemblage de points et de traits. Elles se fondent sur l'aspect visuel global, mais peut-être aussi sur les relations spatiales entre les éléments (qui, séparément, ne seraient pas reconnus comme des yeux, un nez et une bouche). Ce type d'analyse rend la reconnaissance des formes plus fiable lors d'occultations partielles ou de changements d'angle de vue.



© Aurélie Avariguas-Weber

la fois à l'entrée du labyrinthe et dans une des branches, les abeilles se dirigeaient vers cette branche. Aucun entraînement supplémentaire n'était nécessaire.

Grâce à un dispositif expérimental similaire, les abeilles peuvent apprendre à choisir l'image comportant le même nombre d'éléments que celle présentée à l'entrée du labyrinthe, et ce, même quand ces éléments ne se ressemblent pas et sont disposés différemment. C'est ce qu'ont montré en 2009 Hans Gross, de l'Université de Würzburg, en Allemagne, et ses collègues. Les abeilles sont donc capables de compter ! Mais seulement jusqu'à quatre : à partir de cinq objets, elles ne réussissent plus l'expérience.

Une étude menée en 1996 par Lars Chittka, de l'Université Queen Mary, à Londres, et Karl Geiger, de l'Université de Berlin, suggérait déjà une telle capacité : les deux chercheurs avaient appris aux abeilles à retrouver une source de nourriture située après un nombre donné de repères visuels (de petites pyramides bleues). Cependant, elles auraient pu se fonder sur une perception globale et non sur un comptage des pyramides une par une. En outre, les repères visuels étaient toujours identiques, tandis que dans l'étude de H. Gross, les abeilles choisissaient en fonction du nombre d'objets, même si elles n'avaient jamais vu ces objets. Cet aspect est essentiel pour parler d'abstraction et de concept relationnel.

Dans l'équipe de M. Giurfa, au sein de laquelle j'ai travaillé de 2007 à 2010, nous avons testé un autre concept relationnel chez l'abeille : la configuration spatiale relative de différents éléments. Les insectes ont ainsi été confrontés à des images où un objet (variable) était situé tantôt au-dessus et tantôt au-dessous d'une barre horizontale, et entraînés à choisir celles où il était au-dessus (voir la figure 2). On utilise une procédure identique pour tester ce concept chez les primates ou les enfants. On a ensuite compliqué la tâche, en supprimant la barre de référence ; dans ce dernier cas, deux objets quelconques étaient placés tantôt l'un au-dessus de l'autre, tantôt côte à côte. Divers tests ont permis de vérifier que les abeilles fondaient bien leur choix sur la position relative récompensée (ici « l'un au-dessus de l'autre ») et non sur d'autres éléments (similarités visuelles, orientation globale, position absolue des éléments dans l'image...).

Le plus étonnant est que les abeilles apprennent ces concepts relationnels bien plus vite que les primates : elles n'ont

Apprendre à parler une danse étrangère

Dans les années 1940, l'éthologue autrichien Karl von Frisch, pionnier des recherches sur les abeilles, a découvert l'existence d'un « langage » chez cet insecte. Il est constitué d'une danse, grâce à laquelle les butineuses indiquent la direction et l'éloignement des sources de nourriture à leurs congénères. Pour une source éloignée, la danse forme un huit, dont l'inclinaison par rapport à la verticale traduit la direction par rapport au So-

leil. En parallèle, la danseuse fait vibrer son abdomen à une fréquence qui renseigne sur l'éloignement de la source de nourriture : plus elle est élevée, plus la source est lointaine.

La capacité à communiquer est intéressante d'un point de vue évolutif, mais ne trahit pas nécessairement une intelligence très développée. En effet, elle peut être stéréotypée et innée. Cependant, en 2008, Su Songkun, de l'Université de Zhejiang, en Chine, et

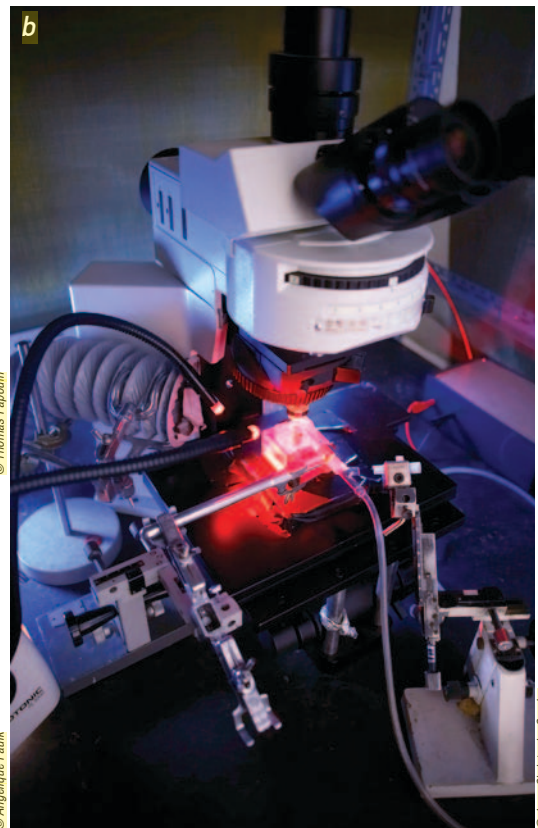
ses collègues, ont montré que les abeilles manifestent d'impressionnantes capacités d'apprentissage et d'adaptation, qui supposent une grande plasticité cérébrale. Pour ce faire, ils ont placé des abeilles européennes parmi des consœurs asiatiques, dont la danse est calibrée différemment (la correspondance entre l'éloignement et la fréquence de vibration de l'abdomen n'est pas identique). En peu de temps, les nouvelles venues ont appris à « parler » la danse locale !

3. POUR VISUALISER LES AIRES

cérébrales qui s'activent lors d'une tâche cognitive particulière, on immobilise les abeilles, on ouvre leur crâne et on injecte un colorant dans leur cerveau (a). On leur fait ensuite réaliser la tâche souhaitée et on observe le cerveau au microscope (b). La difficulté est que les insectes sont incapables de réaliser des tâches cognitives complexes quand ils sont immobilisés. On développe alors des simulateurs de marche (c) ou de vol. Un tel dispositif pourrait être utilisé pour des apprentissages complexes, en remplaçant les éclairages jaunes et blancs du fond par un écran où défilerait un paysage.



© Thomas Papouin



© Jean-Christophe Sandoz



© Angélique Paulik

besoin que d'une trentaine d'essais, qui leur prennent environ deux heures, contre plusieurs centaines d'essais sur plusieurs jours pour les primates. En outre, les abeilles semblent les extraire « naturellement » des images perçues afin de les utiliser comme critère de classification : dans les expériences sur la configuration spatiale, elles ont ainsi dégagé une relation de différence sans que celle-ci soit récompensée. En effet, lors de l'apprentissage, les objets d'une même image étaient toujours différents, qu'ils soient liés par la relation spatiale récompensée (« l'un au-dessus de l'autre ») ou non. Or, quand on présentait par la suite aux abeilles des objets liés par cette relation, mais identiques, elles ne les choisissaient pas plus souvent que d'autres. Elles avaient donc intégré le concept relationnel « différent » comme critère de choix.

En quoi les concepts relationnels sont-ils utiles aux abeilles ? Plusieurs hypothèses ont été proposées. D'abord, ils permettent de classer par catégories les objets, les scènes et les événements bien plus efficacement qu'en se fondant juste sur des similarités perceptives. Selon une théorie controversée, l'abeille pourrait s'en servir pour établir une « carte mentale » de son environnement. En

effet, quand elle connaît la localisation de deux sources de nourriture par rapport à la ruche, elle sait aller directement de l'une à l'autre sans avoir jamais effectué ce trajet, et ce dans un rayon de dix kilomètres autour de la ruche. Cette carte pourrait être fondée sur une représentation mentale des relations spatiales entre différents repères visuels perçus lors de ses déplacements, tels des arbres ou des poteaux – et donc sur des concepts relationnels.

Pour apprendre les concepts, les abeilles n'ont besoin que d'une trentaine d'essais, contre plusieurs centaines pour les primates.

Ces concepts pourraient aussi permettre aux abeilles de reconnaître les objets malgré les variations d'angle de vue, de couleur et texture, ou quand ils sont partiellement cachés. Une telle reconnaissance est plus fiable quand l'analyse se fonde sur les relations spatiales entre les éléments qui composent l'objet (autrement dit, sur sa topologie ou sur sa configuration spatiale) plutôt que sur l'aspect de ces éléments.

L'utilisation des configurations spatiales pour la reconnaissance d'images a

été presque exclusivement étudiée chez l'homme. Pourtant, une expérience réalisée en 2010, toujours au sein de l'équipe de M. Giurfa, suggère que les abeilles en sont aussi capables. Nous leur avons appris à reconnaître des configurations de type visage, obtenues à partir de ronds et de traits (voir la figure page ci-contre) : les insectes distinguaient quand ces éléments formaient un visage ou non. Même si les abeilles se fondent sans doute en partie sur les similarités perceptives globales entre les configurations spatiales, nous pensons qu'elles utilisent aussi les concepts relationnels – la disposition relative des éléments – dans le traitement de ce type d'images.

En outre, lorsqu'on leur laisse le choix des critères utilisés pour reconnaître une image complexe, les abeilles se reposent préférentiellement sur la configuration des éléments de l'image plutôt que sur leur analyse individuelle. Nous avons ainsi appris aux abeilles à reconnaître une grande forme dessinée par de petits éléments, tel un carré composé de petits losanges. Quand on soumet ensuite les insectes à un carré dessiné par de petits triangles et à un cercle dessiné par de petits losanges, ils choisissent le premier : ils se fondent

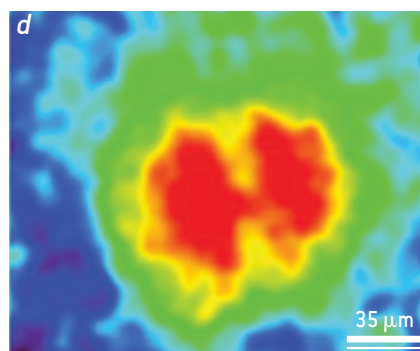
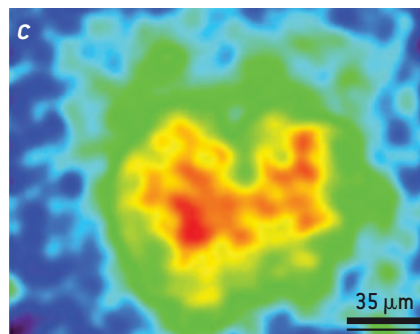
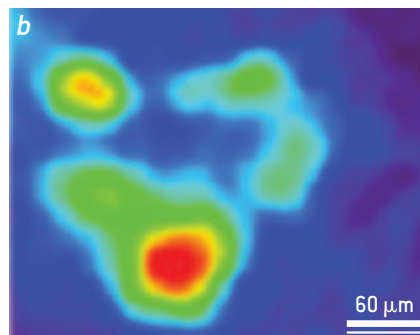
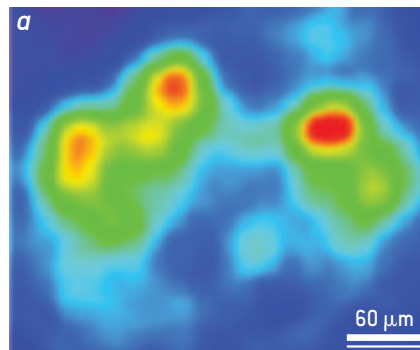
donc sur la configuration des éléments (la forme globale en carré qu'ils dessinent) plutôt que sur ces éléments eux-mêmes (leur forme de losange). C'est le cas aussi chez l'homme, mais pas chez les autres primates, dont la perception est dominée par le niveau élémentaire.

Enfin, l'utilisation de concepts relationnels par l'abeille pourrait n'être qu'un artefact des expériences, dû aux entraînements reçus. Le cerveau des abeilles est peut-être très plastique, facilitant tout type d'apprentissage, y compris celui de concepts. Cependant, quelques éléments laissent penser qu'elles manifestent aussi ce comportement dans la nature. Par exemple, comme nous l'avons souligné, elles ont extrait des relations entre les éléments sans que ces relations soient directement récompensées.

Quoi qu'il en soit, la manipulation de concepts relationnels est une tâche cognitive ardue. En effet, elle nécessite un réseau de neurones codant la relation (par exemple « sur »), qui s'active pour tous les cas mettant en jeu cette relation. Ce réseau doit être activé de la même façon quels que soient les objets concernés, par exemple par un chat *sur* un toit et une bouteille *sur* une table.

La co-activation de ce réseau et du circuit de détection du sucre permettrait à l'animal d'apprendre – lors des séances d'entraînement – la règle à suivre pour obtenir la récompense. Chez les abeilles, la recherche de nourriture stimulerait le recrutement d'un système neuronal codant les similarités relationnelles. Les raisons pour lesquelles ce processus est plus rapide que chez les primates (qui ont besoin de beaucoup plus d'essais pour apprendre un concept relationnel) sont mal connues. Est-ce que la complexité du cerveau de ces derniers entraîne de multiples traitements superflus, qui ralentissent l'élaboration des concepts ? Est-ce une question de motivation ? Une différence dans le codage neuronal des concepts ? Cela reste à déterminer.

Aucun réseau associé à un concept relationnel particulier n'a encore été localisé. Cependant, chez les primates, on pense que ces réseaux se situent dans le cortex préfrontal (à l'avant du cerveau), tandis que les catégories perceptives sont plutôt enregistrées dans le cortex temporal inférieur, siège de la reconnaissance des objets. En effet, des études d'imagerie cérébrale ont mis en évidence une activation du cortex préfrontal lors de tâches comportementales impliquant la manipulation de concepts



4. LES ÉTUDES D'IMAGERIE CÉRÉBRALE montrent que des odeurs et des couleurs différentes activent des zones distinctes, respectivement dans les lobes antennaires et dans le tubercule optique des abeilles (a et b, les zones activées par deux odeurs ; c, celle activée par le bleu et d, celle activée par le vert). De façon générale, la perception des odeurs et des couleurs n'est pas assurée par les mêmes aires cérébrales. Pourtant, l'abeille arrive à transférer à des odeurs une relation d'identité apprise avec des couleurs. Cette relation doit donc être codée séparément dans le cerveau.

relationnels (nombre, identité, relations spatiales...). Le cortex préfrontal est d'ailleurs le siège des fonctions cognitives supérieures (langage, raisonnement...) et est fortement développé chez les primates, en particulier chez l'homme. Il reçoit des informations sensorielles de toutes natures (visuelles, olfactives, gustatives, tactiles et auditives), après traitement par des aires sensorielles spécifiques et diverses régions du cerveau.

Le siège des concepts relationnels chez l'abeille serait donc à chercher dans une structure cérébrale équivalente, recevant des informations de tous les systèmes sensoriels après traitement dans les aires spécialisées. Précisons que cette aire et le cortex préfrontal ne sont pas homologues, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas issues d'une même structure chez l'ancêtre commun aux primates et aux insectes (qui auraient divergé il y a 600 millions à un milliard d'années). En effet, cet ancêtre n'avait pas de cerveau : c'était probablement un ver simple, doté seulement de quelques ganglions nerveux. Les cerveaux des insectes et des primates sont donc apparus de façon indépendante.

Les corps pédonculés, siège des concepts ?

Chez l'abeille, une aire cérébrale nommée corps pédonculés pourrait être cet équivalent du cortex préfrontal et traiter les concepts (voir la figure 5). En effet, elle reçoit tous les types d'informations sensorielles. En outre, cette aire est particulièrement développée chez l'abeille, ainsi que chez les autres hyménoptères (telles les guêpes et les fourmis), les scarabées et les cafards. Dans le cas de ces deux derniers insectes, le développement des corps pédonculés serait dû à des stratégies variées de recherche alimentaire, nécessitant une grande diversité de comportements. Chez les hyménoptères, on attribue ce développement à la vie sociale, impliquant des interactions complexes ; il aurait ensuite permis un traitement cognitif élaboré des données visuelles. Le même phénomène se serait produit avec le cortex préfrontal des primates. Il est aussi possible que la complexification du traitement cognitif de l'environnement visuel se soit déroulée en même temps que la sociabilisation et ait aussi entraîné le développement des corps pédonculés.

Toutefois, le rôle des corps pédonculés reste mal connu. On a seulement montré qu'ils interviennent dans la mémorisa-