

VRAI OU FAUX

Une planète doit-elle être petite pour être naine ?

Non. Aucune taille maximale n'est spécifiée pour la catégorie des planètes naines.

Guillaume Jacquemont

Le 24 août 2006, le Système solaire perdait une planète. Pluton (*en médaillon*) était en effet déposée de son statut de planète et rétrogradée au rang de planète naine. Était-ce parce qu'elle est trop petite ?

La création d'un nouveau statut, celui de planète naine, a suscité de multiples débats en 2006. L'Union astronomique internationale a défini une planète comme un corps céleste en orbite autour du Soleil, ayant une masse suffisante pour que sa propre gravité lui donne une forme sphérique ou quasi sphérique, et qui a fait le vide sur son orbite ; la définition d'une planète naine est identique, à l'exception de ce dernier critère.

Or Pluton est loin d'avoir fait le vide : elle fait partie de la ceinture de Kuiper, un anneau de petits corps situé au-delà de l'orbite de Neptune. On soupçonnait l'existence de cette ceinture depuis les années 1940, mais elle n'a été détectée qu'en 1992. Elle comprendrait plus de un milliard de petits corps glacés. Quelque 1 500 ont déjà été découverts. Pluton n'a donc pas été déclassée parce qu'elle était trop petite, mais parce qu'elle n'était pas seule.

On connaît aujourd'hui cinq planètes naines (plusieurs dizaines d'autres candidats existent dans la ceinture de Kuiper, mais on n'a pas encore pu vérifier leur forme sphérique en raison de leur éloignement). La plus petite, Cérès, a un diamètre de 950 kilomètres. Découverte dès 1801, elle se situe dans la ceinture d'astéroïdes, un autre anneau de petits corps, qui s'étend entre Mars et Jupiter. Les autres planètes naines sont dans

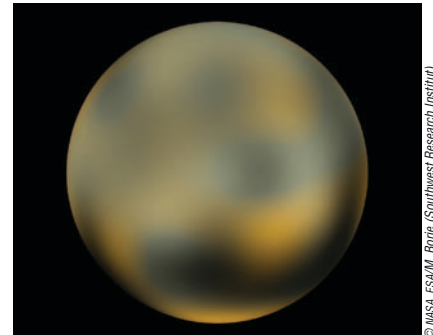
la ceinture de Kuiper. La plus grosse, Éris, a un diamètre d'environ 2 400 kilomètres (voisin de celui de Pluton). En comparaison, la Terre a un diamètre de 12 700 kilomètres et Mercure, la plus petite planète du Système solaire, de 4 880 kilomètres.

La plus grosse planète naine connue est donc deux fois plus petite que la plus petite planète. En outre, la ceinture d'astéroïdes et la ceinture de Kuiper « classique », située entre 30 et 50 unités astronomiques du Soleil (une unité astronomique est égale à la distance Terre-Soleil), ont d'assez faibles masses totales : quatre pour cent de la masse de la Lune pour la première et dix pour cent de la masse terrestre (un peu moins de deux fois la masse de Mercure) pour la seconde. Elles n'abritent donc aucun mastodonte.

Des planètes naines plus grosses que des planètes

Les planètes naines portent-elles alors bien leur nom et sont-elles condamnées à de petites tailles ? Non, selon Alain Doressoundiram, de l'Observatoire de Paris. La définition des planètes naines ne comprend aucune mention d'une taille maximale. Pour l'astrophysicien, plus un corps est gros, plus il a de chance d'avoir fait le vide autour de lui, mais cela n'impose pas une masse maximale claire, à partir de laquelle un corps nettoierait son orbite et deviendrait une planète.

En outre, des mécanismes externes pourraient expliquer en partie la petite taille des planètes naines connues. Ainsi, dans la ceinture d'astéroïdes, l'influence



© NASA, ESA/M. Borne (Southwest Research Institute)

gravitationnelle de Jupiter perturberait les petits corps, qui entreraient en collision trop vite pour s'agglomérer et former des corps dépassant les tailles actuelles.

Selon A. Doressoundiram, on peut alors imaginer une planète naine plus grosse qu'une planète. Des estimations fondées sur la densité de matière en fonction de la distance orbitale montrent que des planètes naines de la taille de Mars pourraient exister dans la ceinture de Kuiper dite étendue ou détachée. Située au-delà de 50 unités astronomiques du Soleil, cette ceinture comprendrait bien plus de corps que la ceinture classique. Selon le modèle dit de Nice, son existence serait due à une incursion passée de Neptune dans la ceinture de Kuiper primitive, dont 99 pour cent de la masse auraient été éjectés vers la ceinture étendue.

La difficulté est que l'extrême éloignement de cette ceinture la rend difficile à observer. Par exemple, Sedna (un petit corps qui s'y trouve et qui fait environ les trois quarts de la taille de Pluton) est en orbite entre 76 et 900 unités astronomiques du Soleil.

La faible taille des planètes naines connues est donc due à la limitation de nos capacités de détection et à l'histoire particulière du Système solaire. Des planètes naines plus grosses que Mercure pourraient graviter à ses confins. Et rien n'interdit l'existence d'équivalents encore plus gros dans d'autres systèmes planétaires, où l'on a déjà détecté des ceintures de petits corps...

Guillaume JACQUEMONT est journaliste à Pour la Science.

L'intelligence des abeilles

Aurore Avarguès-Weber

Les abeilles ont des facultés cognitives étonnantes pour des animaux dotés d'un si petit cerveau. L'étude des mécanismes neuronaux sous-jacents pourrait inspirer certains dispositifs d'intelligence artificielle.

À l'évocation de l'abeille, on pense souvent à une organisation sociale élaborée. Une ruche comporte des dizaines de milliers d'ouvrières, toutes filles d'une seule reine, et qui assurent ensemble la survie de la colonie. Cependant, cet insecte se distingue aussi par des comportements individuels divers et complexes.

Une ouvrière vit de quatre à six semaines, sauf quand elle naît à la fin de l'été, car elle passe alors l'hiver en hibernation. Lors de sa courte vie, elle effectue des dizaines de tâches différentes, telles que le nettoyage de la ruche, le soin aux larves ou la collecte de nourriture. Au sein de la ruche, la plupart des tâches sont stéréotypées et déclenchées automatiquement par les stimulus (visuels, olfactifs...). En revanche, quand elle va butiner, l'abeille doit choisir des fleurs et naviguer dans un environnement complexe et changeant, conditions qui excluent les comportements stéréotypés.

Elle peut alors se repérer dans un rayon de plus de dix kilomètres de la ruche et mémoriser les caractéristiques des sources

de nourriture visitées : emplacement, disponibilité temporelle (certaines fleurs produisent plus ou moins de nectar selon l'heure), qualité (concentration en sucre)... Les recherches récentes ont révélé les capacités cognitives mises en jeu lors de la collecte de nourriture. Elles sont d'autant plus étonnantes que l'abeille a un cerveau minuscule : 960 000 neurones qui tiennent dans moins d'un millimètre cube, contre 100 milliards pour l'être humain.

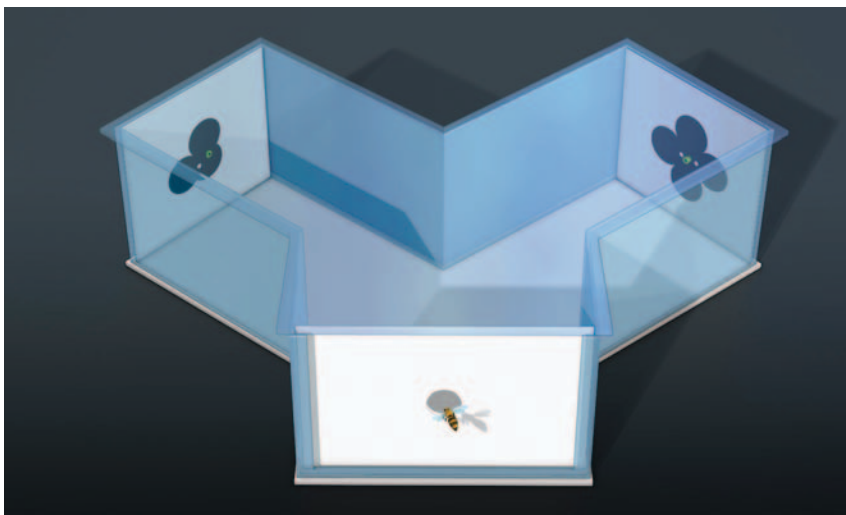
Depuis un siècle, l'abeille a été utilisée dans des centaines d'études sur la perception, l'apprentissage et la mémoire. L'éthologue autrichien Karl von Frisch (1886-1982) en a été le pionnier. Ses recherches, débutées en 1910, ont été couronnées par le prix Nobel de physiologie en 1973. Il a notamment défini une méthodologie, toujours utilisée aujourd'hui, pour étudier la perception et la mémoire des abeilles. Celles-ci ont un comportement dit de constance florale : lorsqu'elles rencontrent des fleurs contenant du nectar, elles en mémorisent les caractéristiques et ne visitent par la suite que les

L'ESSENTIEL

- Le traitement cognitif de l'environnement visuel des abeilles est élaboré.
- Ces insectes classent les objets par catégories et utilisent des concepts relationnels, c'est-à-dire des relations abstraites liant les objets : nombre, configuration spatiale...
- Le substrat cérébral des concepts pourrait se trouver dans une zone nommée corps pédonculés. On cherche à le confirmer par des études d'imagerie ou en mesurant l'activité des neurones avec des électrodes.

© Peter Waters/shutterstock.com





© Bruno Bourgeois d'après A. Avarguès-Weber

1. POUR TESTER LES CAPACITÉS COGNITIVES DES ABEILLES, on les fait pénétrer dans un labyrinthe en Y. Dans l'une des branches se trouve un répulsif et, dans l'autre, une récompense (une solution sucrée) associée à ce qu'on cherche à apprendre à l'insecte (ici à reconnaître une image symétrique). Après la phase d'apprentissage, l'abeille doit choisir entre de nouvelles images ayant ou non la propriété testée. Ici, elle choisira celles dotées d'une symétrie (à droite), ce qui montre qu'elle a identifié et mémorisé cette propriété.

fleurs de la même espèce. Elles abandonnent l'espèce seulement quand elles visitent plusieurs fleurs « vides ». Ce comportement permet d'entraîner les abeilles à récolter une solution sucrée associée à une image, qu'elles mémorisent et vers laquelle elles reviennent lors de leurs voyages successifs – et ce des heures durant, afin de ramener le maximum d'eau sucrée à la ruche. En proposant ensuite aux abeilles un choix entre plusieurs images, on détermine les éléments spécifiques perçus et mémorisés.

Par exemple, on teste si l'abeille distingue les couleurs en associant un rond jaune à la solution sucrée pendant l'entraînement, et en lui présentant ensuite des ronds de couleurs variées : si elle se dirige plus souvent vers les ronds jaunes, c'est qu'elle est capable de distinguer les couleurs. De même, on teste si elle apprend préférentiellement les formes ou les couleurs en l'entraînant avec un carré bleu associé à la récompense et en lui faisant ensuite choisir entre un carré gris et un triangle bleu : si elle choisit le carré, c'est qu'elle a mémorisé la forme ; si elle choisit le triangle, c'est qu'elle se souvient de la couleur.

Grâce à cette méthodologie, von Frisch a montré en 1914 que l'abeille perçoit le monde en couleurs, mais que son spectre visuel est décalé vers l'ultraviolet par rapport au nôtre. À l'époque, ces résultats ont suscité la polémique. On sait aujourd'hui qu'ils s'expliquent par une coévolution des fleurs et de leurs pollinisateurs. De nom-

■ L'AUTEUR



Aurore AVARGUÈS-WEBER a travaillé au Centre de recherches sur la cognition animale, à l'Université de Toulouse, puis à l'Université Queen Mary, à Londres.

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Avarguès-Weber et al., **Simultaneous mastering of two abstract concepts with a miniature brain**, *PNAS*, vol. 109, pp. 7481-7486, 2012.

A. Avarguès-Weber et al., **Visual cognition in social insects**, *Annual Reviews of Entomology*, vol. 56, pp. 423-443, 2011.

L. Chittka et K. Jensen, **Animal cognition : concepts from apes to bees**, *Current Biology*, vol. 21, pp. 116-119.

M. Srinivasan, **Honey bees as a model for vision, perception, and cognition**, *Annual Reviews of Entomology*, vol. 55, pp. 267-284, 2010.

breuses fleurs présentent ainsi des sortes de pistes d'atterrissage dans l'ultraviolet, c'est-à-dire des motifs visibles uniquement à ces longueurs d'onde et qui guident les pollinisateurs vers le nectar.

Les abeilles distinguent aussi les formes. Elles reconnaissent des images complexes, malgré une faible acuité visuelle (elles perçoivent des images très pixellisées, avec une résolution 100 fois inférieure à la nôtre) : elles savent, par exemple, distinguer un paysage forestier d'un champ. Stockent-elles les images et les comparent-elles aux nouvelles pixel par pixel ? Une telle technique, dite de matching (littéralement, de correspondance), serait simple, mais coûteuse en termes de mémoire. Les recherches récentes indiquent plutôt que l'abeille réalise un traitement cognitif élaboré de son environnement visuel.

En quoi consiste un tel traitement ? L'homme, par exemple, effectue une catégorisation, c'est-à-dire qu'il classe instantanément les objets de son environnement en catégories : ainsi, il regroupe dans la catégorie « voiture » tous les objets présentant quatre roues, un moteur et une carrosserie. Pour définir une catégorie, le cerveau doit identifier des similarités, tout en faisant abstraction des autres propriétés. Cette classification diminue la quantité d'informations à mémoriser, puisque seuls les critères pertinents sont enregistrés. En outre, elle renseigne sur le comportement à adopter envers une entité (objet, animal...) avec laquelle on n'a jamais interagi, grâce aux interactions mémorisées avec d'autres entités de la même catégorie.

Classer les objets par catégories

En raison de la complexité du traitement des images, on a longtemps considéré la capacité de catégorisation comme l'apanage des vertébrés. Elle a notamment été mise en évidence chez les primates, les dauphins et les pigeons.

Cependant, on s'est aperçu dans les années 1990 que les abeilles sont aussi capables de catégorisation. L'une des catégories qu'elles distinguent est celle des objets présentant une symétrie interne, comme l'ont montré en 1996 Martin Giurfa, de l'Université de Toulouse, et ses collègues. Ainsi, quand on associe une récompense sucrée à différents dessins présentant un axe de symétrie, les abeilles apprennent que le critère récompensé est la symétrie. Par la

suite, elles choisissent préférentiellement les dessins dotés de cette propriété, même quand elles ne les ont jamais vus (*voir la figure 1*). Une telle capacité pourrait leur être très utile dans la nature, car les fleurs, notamment, présentent une symétrie interne.

Leur faculté de classer leur environnement en catégories a été confirmée par de nombreuses études. Les catégories identifiées sont variées : paysages, plantes, fleurs, images orientées d'une même façon (composées, par exemple, de rayures)...

Les catégories du type paysage ou plante, dites perceptives, sont fondées sur des similarités visuelles. Elles ne nécessitent pas un traitement cognitif très élaboré. De même, la détection de la symétrie et de l'orientation est assez simple : elle se fonde probablement sur l'activation de quelques neurones spécialisés, comme c'est le cas chez les vertébrés. Pour l'orientation, des neurones analogues à ceux assurant cette tâche chez les vertébrés ont d'ailleurs été identifiés.

Il existe deux autres types de catégories, qui nécessitent des capacités cognitives supérieures, en raison d'un degré supplémentaire d'abstraction : les catégories fonctionnelles et les catégories conceptuelles. Les premières dépendent de la

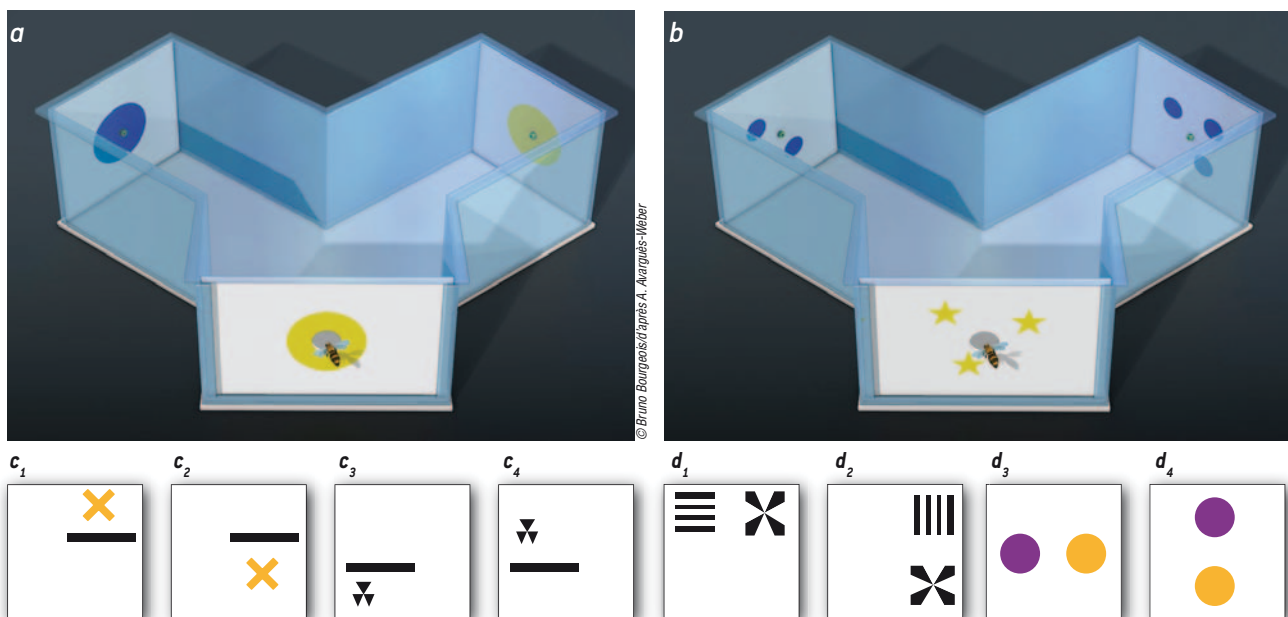
Le système visuel des abeilles

Les abeilles ont des yeux à facettes (5 500 par œil), chacune représentant un pixel.

Elles perçoivent alors des images très pixellisées, avec une résolution 100 fois inférieure à la nôtre. En revanche, elles sont plus sensibles aux mouvements, grâce à l'activation successive des différentes facettes par un objet en déplacement. En outre, elles ont un champ visuel de 320 degrés, bien plus large que le nôtre.

fonction de l'objet (nourriture, meuble...), indépendamment de son apparence ; on ignore si les abeilles sont capables d'une telle catégorisation. Les secondes regroupent des objets ou des événements liés par une relation particulière, telle que « avant », « au-dessus », « plus grand que », « identique », « en même nombre que », etc. (en sciences cognitives, un concept est défini par une telle relation). Une catégorie conceptuelle est, par exemple, l'ensemble des groupes de deux objets.

Les concepts relationnels servent à nous représenter des scènes ou des événements, mais sont difficiles à appréhender. Une girafe et la Tour Eiffel seront ainsi regroupées dans la même catégorie, celle des entités « grandes » (par comparaison implicite aux autres animaux et aux autres monuments), alors qu'elles n'ont en commun aucune caractéristique physique ou fonctionnelle, pas même leur taille absolue. Les concepts relationnels ne peuvent se former qu'à partir de multiples exemples concrets, avec des objets donnés. Leur comparaison permet au cerveau de dégager une relation commune, au-delà des différences entre les images. Cette relation devient alors abstraite, c'est-à-dire indépendante des objets qu'elle lie.



2. LES CONCEPTS RELATIONNELS sont des relations liant les objets, telles que « identique à », « en même nombre que » et « au-dessus de ». Les abeilles sont capables de maîtriser ces trois derniers concepts. Dans un labyrinthe en Y, elles peuvent apprendre à choisir la branche terminée par une image de couleur identique à celle présentée à l'entrée (a) ou comportant le même nombre d'éléments (b). Elles transfèrent même la règle d'identité à des formes et à des odeurs : après l'avoir apprise avec des couleurs, elles choisissent spontanément la branche contenant une odeur ou une forme identique à celle présentée à l'entrée. De

même, elles peuvent apprendre à choisir la branche contenant une certaine configuration spatiale : celle où un objet est au-dessus d'une barre de référence (c_1 et c_4) contre celle où il est au-dessous (c_2 et c_3), ou celle où deux objets sont l'un au-dessus de l'autre (d_2 et d_4) contre celle où ils sont côte à côte (d_1 et d_3). Dans tous les cas, les images récompensées ne se ressemblent pas (les trois étoiles sont, par exemple, très différentes des trois ronds bleus) : elles n'ont en commun que la relation à apprendre, tel le nombre d'éléments. Pour les abeilles, cette relation devient donc abstraite, c'est-à-dire indépendante des objets.

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-

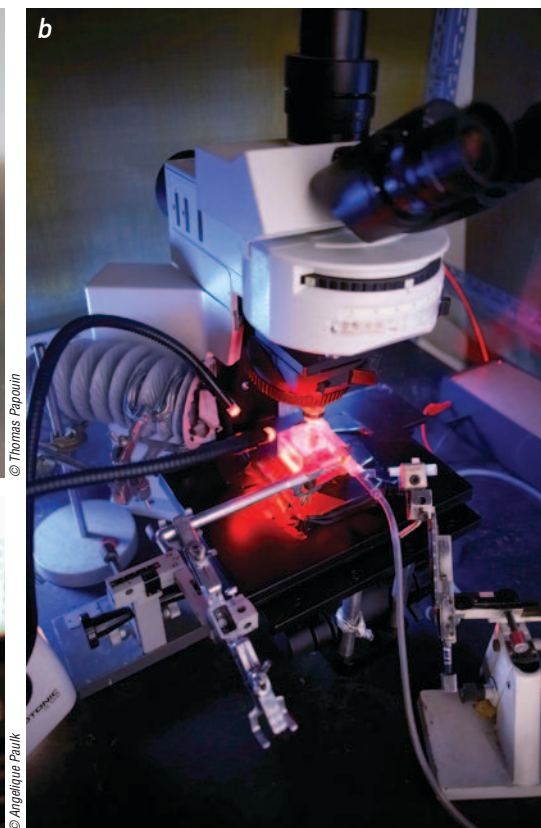
leil. En parallèle, la danseuse fait vibrer son abdomen à une fréquence qui renseigne sur l'éloignement de la source de nourriture : plus elle est élevée, plus la source est lointaine.

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.



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 simi-

larités 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

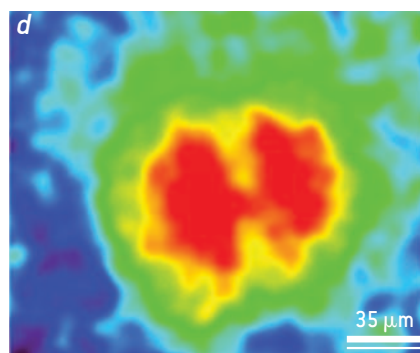
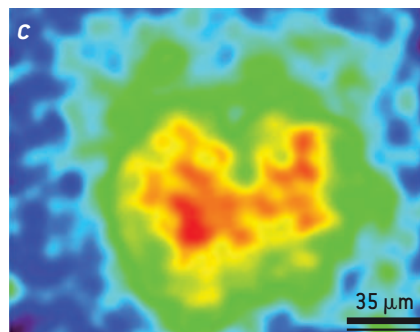
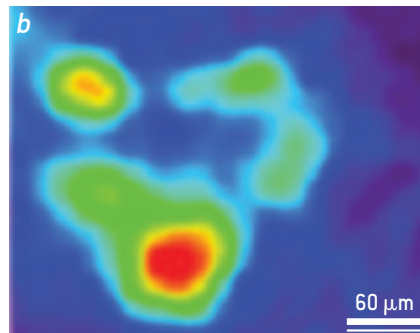
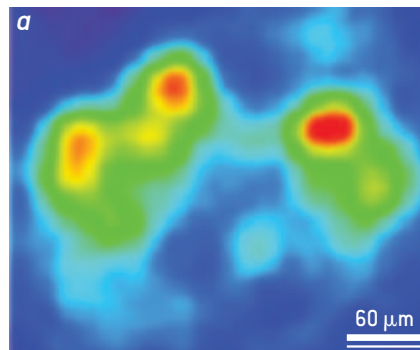
donc sur la configuration des éléments (la forme globale en carré qu'ils dessinent) plutôt que sur ces éléments eux-mêmes (leur forme de losange). C'est le cas aussi chez l'homme, mais pas chez les autres primates, dont la perception est dominée par le niveau élémentaire.

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-

tion olfactive. Lors de plusieurs études menées au cours des années 2000, on a appris aux abeilles à associer une odeur à une récompense sucrée et on a observé le rôle des corps pédonculés dans la mémorisation : lorsque cette structure cérébrale était détruite ou inhibée par des substances chimiques, les abeilles ne parvenaient plus à mémoriser les odeurs.

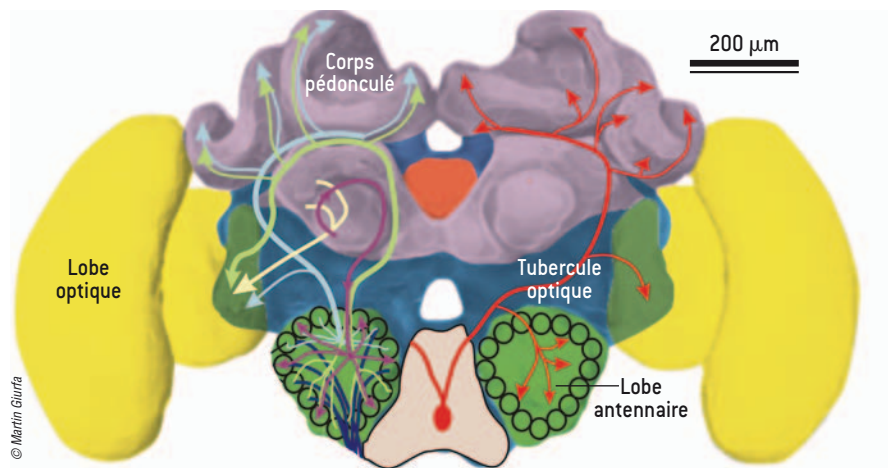
Pour trouver les bases neuronales des concepts, la première étape est donc de vérifier l'implication des corps pédonculés. Plusieurs laboratoires pensent lancer des projets en ce sens dans l'année à venir. Ils devraient obtenir des résultats au cours des deux ou trois prochaines années.

Comment observer le cerveau des abeilles en fonctionnement ? Les techniques d'imagerie par résonance magnétique (IRM) sont inapplicables, car leur résolution est de l'ordre du millimètre, et le cerveau de l'abeille mesure moins d'un millimètre cube. En revanche, la robustesse de l'abeille autorise les méthodes invasives. On réalise donc de l'imagerie cérébrale en ouvrant la cuticule (la carapace) du crâne (une opération indolore, cette cuticule n'étant pas innervée), puis en injectant un colorant dans le cerveau : cette substance se colore en présence des ions calcium libérés par les neurones lorsqu'ils émettent des impulsions électriques. On observe alors le cerveau de l'abeille au microscope (voir la figure 3).

Observer le cerveau des abeilles

On utilise également l'électrophysiologie : cette technique consiste à mesurer directement l'activité de neurones et d'ensembles de neurones en implantant des électrodes dans le cerveau des insectes. La pointe de l'électrode est placée soit à la surface du neurone, soit à l'intérieur.

La seule limitation, en passe d'être résolue, est la difficulté d'étudier des apprentissages complexes sur des abeilles immobilisées en laboratoire. Cette immobilisation est nécessaire pour l'imagerie cérébrale et l'enregistrement de l'activité du cerveau. Or une abeille immobilisée peine à apprendre de simples couleurs et est incapable de mémoriser des concepts relationnels. Une solution en cours de développement serait d'utiliser des simulateurs de vol ou de marche, qui donneraient l'impression d'un mouvement libre à l'abeille immobilisée.



5. LES CORPS PÉDONCULÉS (en violet) pourraient être l'aire cérébrale responsable des concepts relationnels chez l'abeille. En effet, ils sont très développés et reçoivent des informations de multiples zones du cerveau – à l'instar du cortex préfrontal des primates, qui sous-tend les fonctions cognitives supérieures chez ces animaux.

Des dispositifs de ce type ont déjà été développés par plusieurs équipes de l'Université de Queensland, en Australie. Dans l'un d'eux, l'abeille est collée à une tige qui la maintient sur une boule tournant quand elle marche. L'analyse des mouvements de la boule, maintenue en suspension par un flux d'air, renseigne sur la direction dans laquelle l'abeille veut se diriger et sur sa vitesse. Nous voudrions utiliser un simulateur de marche de ce type, avec un écran cylindrique où serait projetée une image qui bougerait en fonction des mouvements de l'abeille. Le simulateur de marche semble suffire à autoriser des apprentissages complexes et est plus simple et moins coûteux qu'un simulateur de vol.

En parallèle, des modélisations de ces apprentissages devront être réalisées pour comprendre leurs fondements neuronaux. Dans une telle modélisation, un neurone virtuel intègre des stimulations excitatrices ou inhibitrices en provenance d'autres neurones. Quand un certain seuil d'excitation est atteint, il envoie un message excitateur ou inhibiteur à d'autres neurones.

En 2011, l'équipe de Barbara Webb, de l'Université d'Édimbourg, en Écosse, a obtenu des premiers résultats pour des apprentissages simples (la mémorisation d'odeurs) chez la drosophile, dont le cerveau est bien moins complexe que celui de l'abeille. Dans sa simulation, la perception d'une molécule odorante entraînait l'activation d'un ensemble de neurones, chacun réagissant à une caractéristique chimique particulière. Lorsque cet ensemble était activé en même temps que les

neurones détectant la récompense sucrée (ce qui se produit quand les abeilles trouvent cette récompense en même temps qu'elles perçoivent l'odeur), les synapses connectant les neurones en jeu étaient potentialisées, c'est-à-dire qu'elles devenaient plus efficaces pour transmettre le signal. Après quelques essais virtuels, l'activation du circuit neuronal codant l'odeur suffisait à activer celui de la détection du sucre. C'est ainsi qu'un insecte réel serait attiré vers la source de l'odeur.

B. Webb a déduit de ses travaux qu'un grand nombre de neurones n'est pas nécessaire pour mémoriser une odeur : c'est le nombre de synapses qui importe. Des projets sont en cours d'élaboration pour simuler l'encodage d'apprentissages plus complexes, tels ceux de catégories perceptives, chez les abeilles.

Le cas des abeilles montre que la manipulation de concepts relationnels n'est pas l'apanage des vertébrés. L'étude de ces facultés chez l'insecte devrait nous renseigner sur la complexité cérébrale minimale permettant d'atteindre de tels niveaux cognitifs. Enfin, elle ouvre des perspectives dans le domaine de l'intelligence artificielle et de la reconnaissance visuelle par ordinateur. La rapidité avec laquelle l'abeille apprend les concepts relationnels montre qu'elle a développé des mécanismes cérébraux efficaces pour effectuer cette tâche. Quand nous les aurons mieux compris, nous pourrions nous en inspirer pour concevoir des logiciels de reconnaissance visuelle susceptibles d'être utilisés notamment dans des robots miniatures. ■

La membrane des cellules est infranchissable pour nombre de molécules présentant un intérêt thérapeutique. De petits fragments de protéines découverts dans les années 1990 pourraient leur permettre d'accéder à l'intérieur des cellules.

Des CLÉS moléculaires pour les cellules

Ces dernières années, le nombre de nouvelles molécules ayant un intérêt thérapeutique n'a cessé de croître. Toutefois, un obstacle majeur limite le développement de nouveaux médicaments: parmi ces molécules, rares sont celles qui franchissent la membrane des cellules et en atteignent l'intérieur, où elles pourront remplir leur rôle. Couplage avec des lipides, ajout de molécules agissant sur les membranes cellulaires, perméabilisation électrique des tissus *in vivo*, diverses méthodes ont été développées pour faciliter l'entrée de ces molécules dans les cellules. Toutefois, ces méthodes perturbent les cellules ou restent peu efficaces.

Une autre voie, cependant, semble prometteuse: certains fragments de protéines – ou peptides – facilitent l'absorption, par les cellules, des molécules auxquelles ils sont liés, et ce sans perturber la membrane cellulaire. L'histoire de leur découverte a été riche en rebondissements, et la piste a même failli être abandonnée. Néanmoins, les multiples preuves de son efficacité et de son innocuité laissent penser qu'elle pourrait devenir un outil important de la recherche pharmaceutique.

L'intérêt pour ces peptides particuliers a commencé au début des années 1990, lorsque deux biologistes de l'École normale

Roland Brock et Wouter Verdurmen

L'ESSENTIEL

- La membrane des cellules ne laisse passer que peu de molécules, en général de petite taille et non chargées.
- Les biologistes cherchent un moyen de faire pénétrer de façon ciblée dans certaines cellules des molécules plus grandes à effet thérapeutique, telles que de l'ADN ou des protéines.
- Des fragments de protéines nommés peptides de pénétration cellulaire apportent une solution prometteuse, car même associés à une macromolécule, ils entrent facilement dans les cellules.

supérieure, à Paris, Alain Prochiantz et Alain Joliot, ont découvert une étonnante propriété d'une protéine impliquée dans le développement des neurones chez la drosophile et nommée antennapedia. La protéine induit la production de cellules neuronales à partir de cellules non spécialisées – un processus nommé différenciation neuronale –, et les deux biologistes cherchaient à préciser le mécanisme en jeu en reproduisant son action sur des cellules en culture.

Pour introduire la protéine dans ces cellules, ils ont rendu les membranes cellulaires légèrement perméables par addition de certaines substances, car dans des conditions normales de culture, les cellules n'absorbent pas facilement des molécules aussi grandes que des protéines. À leur grande surprise, cependant, A. Prochiantz et A. Joliot ont constaté que la protéine antennapedia pénétrait même dans les cellules intactes, non perméabilisées, où elle activait la différenciation neuronale. La protéine avait donc atteint sa cible, le noyau cellulaire, où elle jouait son rôle dans la régulation des gènes.

Peu après cette découverte, en 1994, la même équipe a montré qu'antennapedia traverse la membrane des cellules grâce à une petite région de la protéine. Et qu'un