

## À la découverte des capacités cognitives d'un cerveau miniaturisé

Conférence de **Martin GIURFA**, mise en forme par **Janine KIEVITS**

Ce texte a été validé par Martin Giurfa.

### Pourquoi l'abeille ?

Pourquoi parler de cognition chez l'abeille ? Un neuroscientifique de la cognition cherche à apprendre quelles sont les capacités qui font de nous des êtres particuliers, quelles sont nos capacités de mémoire, d'apprentissage... Pourquoi l'abeille ? Parce que celle-ci est un pollinisateur constant dont l'activité de butinage repose sur les capacités d'apprentissage et de mémoire. L'abeille travaille à la chaîne florale, elle reste à travailler sur une même espèce tant qu'elle reçoit une récompense en nectar ou en pollen, ce

n'est qu'à la fin de la miellée qu'elle va arrêter de butiner cette espèce. C'est ce qu'on appelle la constance florale ; elle suppose une capacité à apprendre et mémoriser les signaux floraux de sorte à rester constant sur l'espèce exploitée. Les abeilles apprennent les couleurs, les odeurs, les formes, la position dans l'espace... Elles sont un trésor naturel du biologiste intéressé par l'apprentissage en contexte naturel ! Car l'abeille est un organisme qui montre des capacités poussées d'apprentissage et de mémorisation ; c'est ce qui lui confère sa capacité de butinage.



De plus l'abeille est très coopérative : on peut l'entraîner à venir au laboratoire, à entrer par la fenêtre, à travailler dans un appareil particulier ; elle nous dit si elle voit des couleurs, si elle discrimine des couleurs ou des odeurs, combien de temps elle peut retenir une information... L'abeille va travailler pour vous si vous offrez une récompense, c'est-à-dire une petite gouttelette de sucre, l'équivalent du nectar qu'elle cherche. C'est fabuleux pour l'expérimentateur !

Comment tout cela se passe-t-il dans ce cerveau d'un millimètre cube ?

Ce qu'on a développé, c'est la possibilité de rentrer dans ce cerveau, parce que sa complexité est moindre que celle d'un homme : 950 000 neurones. L'homme, lui, en dispose de 100 milliards ; dans un tel système il est difficile de trouver les circuits responsables de ceci ou cela ! Chez l'abeille il y a moins de neurones, les circuits sont donc relativement plus faciles à établir.

Les questions que nous nous posons sont : de quoi le cerveau est-il capable ? Comment ces capacités sont-elles portées par les circuits neuronaux ? Ces capacités restent-elles chez l'abeille au niveau élémentaire, et s'il y a plus : qu'est-ce qui permet de constituer ces deux niveaux, le simple et le plus élevé ?

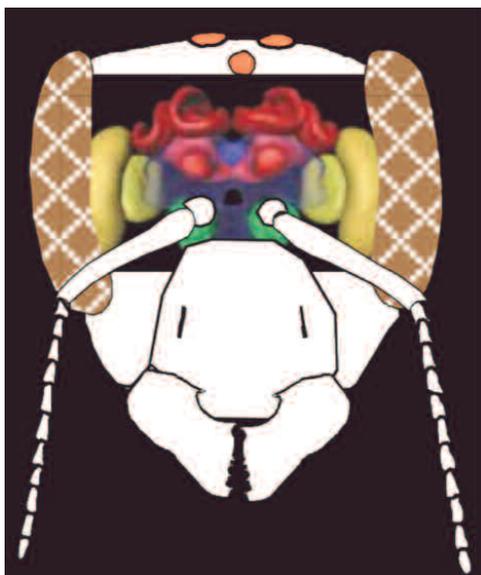
## L'apprentissage associatif

Nous disposons d'un protocole de conditionnement (apprentissage) où l'abeille apprend et mémorise en contention : il est basé sur le PER (*Proboscis Extension Reflex*) ou réflexe d'extension de la langue. Il s'agit d'un réflexe inné, non appris, qui a lieu chez toute abeille affamée : on touche les antennes avec une goutte de sucre et elle étire la langue. L'expérience se déroule comme suit : on présente tout d'abord à l'abeille une odeur (à laquelle elle ne répond pas d'emblée) puis on lui donne la solution sucrée. L'abeille apprend ainsi l'association odeur/sucre ; et par association l'odeur se substitue au sucre : dès qu'on présente l'odeur à l'abeille, elle étire la langue avant même d'avoir reçu le sucre. Tout se passe comme avec le chien de Pavlov, qui apprenait à baver chaque fois que retentissait la cloche qui annonçait son repas. Pour ces expériences nous disposons d'un appareil qui peut émettre plusieurs odeurs devant l'abeille harnachée<sup>1</sup>, la goutte de sucre est donnée avec un cure-dents ou une micropipette<sup>2</sup>.

Si on fait cette expérience d'association sucre-odeur six fois avec une trentaine ou quarantaine d'abeilles, toutes vont répondre à l'odeur acquise. Si vous placez ensuite ces abeilles dans une cagette et que vous les gardez à l'étuve deux semaines en les nourrissant régulièrement (c'est la durée de vie

1 – L'abeille est mise en contention dans un petit tube, d'où ne dépasse que sa tête, ce qui laisse libres les mouvements des pièces buccales et des antennes.

2 – Vous trouverez sur Youtube de petits films qui montrent ce type d'expérience. Il suffit de placer, dans votre moteur de recherche, les mots « honey bee proboscis extension reflex youtube » pour les trouver tous.



**Schéma 1 : Le cerveau de l'abeille, représenté en place. En jaune, les lobes optiques; en vert, les lobes antennaires; en rouge, les corps pédonculés, dits aussi corps champignons.**

d'une butineuse), et que vous leur présentez ensuite trois odeurs, dont l'odeur apprise, les abeilles se souviennent parfaitement de la "bonne" odeur. Leur mémoire est donc fabuleuse : elle peut durer la vie entière d'une butineuse, sauf si d'autres événements se sont produits (d'autres apprentissages d'odeurs) qui vont influencer sur la mémoire.

En outre vous pouvez réaliser cette expérimentation en découvrant le cerveau de l'abeille. La cuticule est en effet une carapace, une structure non innervée ; on peut y ouvrir une fenêtre et apercevoir le cerveau. On peut alors rentrer dans le cerveau pour voir comment cela se passe.

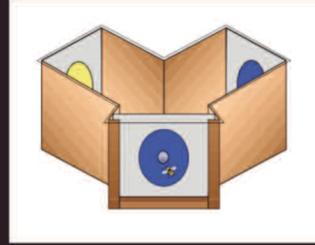
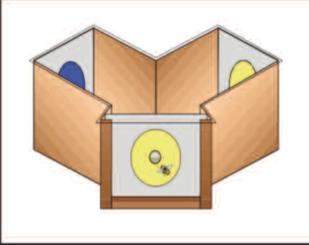
Le cerveau de l'abeille comporte plusieurs parties (schéma 1) : les lobes olfactifs, les lobes antennaires et les corps pédonculés (on les appelle parfois aussi corps champignons) où il faut chercher les fonctions supérieures. Mais cette forme d'expérimentation a une limite : l'animal harnaché ne bouge pas. Or il nous faut récupérer la pleine expression de la recherche comportementale : que fait l'abeille en liberté ? Que perdons-nous quand nous contraignons les abeilles de la sorte ? Le test de l'extension du proboscis est riche pour investiguer certaines questions mais il n'exprime pas tout.

### **Les apprentissages visuels**

Tournons-nous donc vers l'apprentissage du visuel. On va pouvoir alors cerner mieux les capacités insoupçonnées de cette petite créature. Nous allons envisager l'apprentissage de concepts.

Nous devons à Karl von Frisch d'avoir décodé la danse des abeilles. Une de ses premières expériences a démontré que l'abeille voit en couleurs. K. von Frisch marquait des abeilles et les entraînait à venir s'alimenter à un plat de solution sucrée sur un carton bleu ; puis il plaçait auprès de la première coupelle d'autres coupelles avec des cartons gris, noirs... Les abeilles reconnaissaient le carton bleu et le distinguaient de stimuli achromatiques, montrant par là leur capacité à voir des couleurs. Les abeilles avaient donc fait

## L'Apprentissage de Concepts Abstraits: Entraînement



**« Choisis jaune à l'intérieur quand l'échantillon d'entrée est jaune, et bleu, quand l'échantillon d'entrée est bleu ».**

un apprentissage visuel : bleu égal sucre. Cela reste un apprentissage simple à ce stade.

En utilisant ce protocole, nous avons pu répondre à d'autres questions qui ont montré des choses étonnantes. La question était : dans quelle mesure l'abeille est-elle capable de résoudre des problèmes de niveau conceptuel, ce que savent faire les hommes, certains primates, les dauphins, mais enfin pas des insectes ?

Nous avons testé la capacité des abeilles à former un concept d'équivalence – c'est-à-dire à apprendre une règle indépendante des caractéristiques physiques des signaux. Un exemple : je montre à un sujet – animal ou humain – un objet, puis je lui montre ce même objet en même temps qu'un second, et je lui demande de choisir un des deux

objets. Au départ, mon sujet n'a aucune indication sur celui des deux objets qu'il doit choisir. Mais je le punis s'il choisit l'objet différent de celui montré au départ, je le récompense s'il choisit le même. Je refais cela un certain nombre de fois avec des objets différents et le sujet doit comprendre que ce que je demande, c'est qu'il choisisse l'objet qui est le même que celui montré au départ : j'apprends à mon sujet une règle de relation : "choisis ce qu'on te montre, indépendamment de ce qu'on te montre" Avoir la capacité d'extraire de telles règles était considéré jusqu'il y a peu pour la prérogative de quelques animaux supérieurs, mais pas d'un insecte.

Nous avons construit un labyrinthe en Y pour quantifier les décisions des abeilles. L'abeille qui entre dans ce labyrinthe doit choisir entre les deux branches, marquées l'une et l'autre

d'un signal, dont un seul est le même que le signal d'entrée; derrière un seul de ces signaux, l'abeille trouvera une solution sucrée, fournie dans une micropipette au milieu du disque (schéma 2). On place d'abord un disque jaune à l'entrée; l'abeille trouvera la récompense (la solution sucrée) si elle choisit la branche où se trouve le disque jaune équivalent. Ensuite on place un disque bleu à l'entrée et l'abeille devra choisir le disque bleu pour avoir la récompense, fournie au milieu du disque bleu... Au fil de l'entraînement, au cours duquel on répète quelques fois ce jeu, l'abeille doit comprendre que quand le signal de l'entrée est jaune elle doit aller vers le signal jaune et quand le signal d'entrée est bleu elle doit aller au bleu. Au cours de l'entraînement, on change aléatoirement les signaux de

place pour qu'elle ne mémorise pas un côté du dispositif, mais le signal.

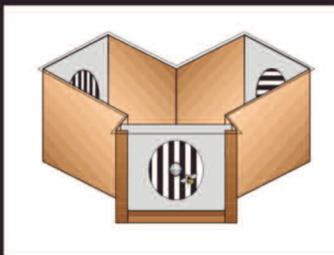
Lorsque les abeilles ont été entraînées, nous les avons placées dans une situation nouvelle: nous avons répété l'expérience mais les signaux cette fois n'avaient plus de couleur, c'étaient des patrons (*patterns*) achromatiques, faits de rayures noires, verticales ou horizontales, sur fond blanc (schéma 3). Parallèlement un autre groupe d'abeilles, qui avaient été entraînées avec des *patterns*, a été par la suite testé avec les disques de couleur jaune et bleu en tant que stimuli nouveaux.

Le résultat est visible sur le schéma 4 : sur 60 vols de butinage qui constituent l'entraînement, dans les deux groupes, les abeilles sont plus de 7 sur

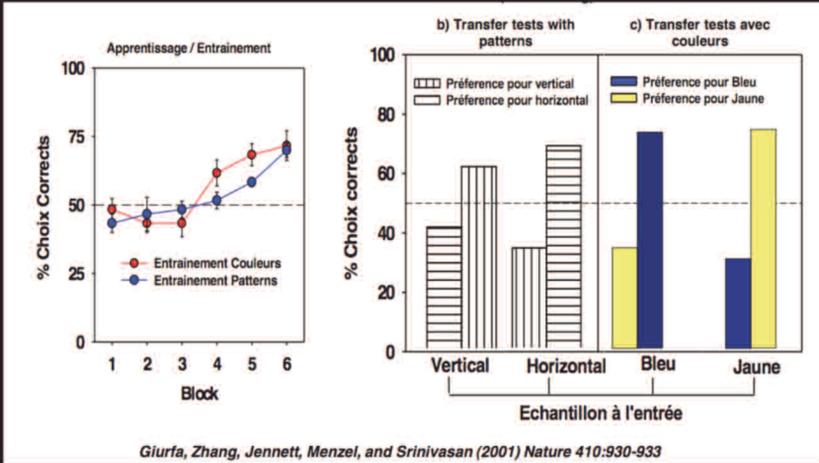
Schéma 3

## L'Apprentissage de Concepts Abstraits: Test

Les abeilles sont confrontées à des **stimuli nouveaux** qu'elles n'ont jamais vus auparavant.



## Les abeilles transfèrent le concept d'équivalence de couleurs à des patterns et vice versa



10 à effectuer le choix correct. Par la suite, dans les tests avec les stimuli nouveaux, les abeilles n'ont pas été dérouterées par la nouveauté et ont appliqué systématiquement la règle apprise: « choisie le signal qui est le même que celui qu'on te montre à l'entrée, quelle que soit la nature du signal ».

La majorité des abeilles a réussi le test; on peut en conclure que les abeilles sont capables d'apprendre un concept d'équivalence. Par des expériences du même type on peut montrer qu'elles sont aussi capables d'extraire une règle de différence, c'est-à-dire d'apprendre la règle opposée: « choisie le contraire de

ce qu'on te montre, indépendamment de ce qu'on te montre ».

Allons un pas plus loin. Sont-elles capables d'apprendre à maîtriser deux concepts simultanément? Sont-elles capables d'une double abstraction mentale et de travailler les deux concepts à la fois? Par exemple, si on les fait travailler en utilisant un premier concept, spatial celui-là: au-dessus, en dessous, à gauche, à droite, et qu'on combine cela avec un concept d'équivalence/de différence: sont-elles capables d'intégrer les deux concepts à la fois? Lorsque mon étudiante Aurore<sup>3</sup> m'a parlé d'une expérimentation en ce sens, je lui ai dit:

3 – Il s'agit d'Aurora Avarguès-Weber, premier auteur des publications figurant dans la bibliographie de cet exposé.

Aurore tu pousses un peu trop fort, mais c'est le meilleur moyen de faire avancer la science !

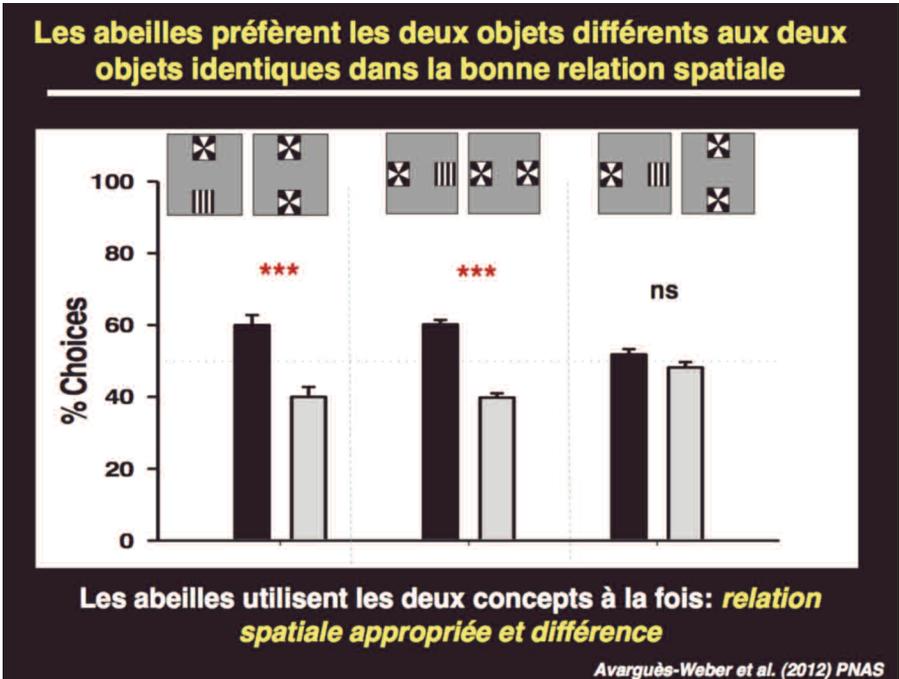
Nous avons donc confronté les abeilles à deux concepts : celui de différence, et un concept spatial : au-dessus/au-dessous (schéma 5).

Lors de l'expérience, nous avons affiché deux stimuli faits de deux images chacun, sur les deux parois du labyrinthe en Y. D'un côté nous présentions deux images l'une au-dessus de l'autre, de l'autre côté les mêmes images l'une à côté de l'autre. Une seule relation (par ex. au dessus/au dessous) était récompensée. Les abeilles étaient donc entraînées à pri-

vilégier l'une ou l'autre des dispositions spatiales : pour certaines, par exemple, des motifs l'un au-dessus de l'autre étaient systématiquement associés à la récompense. Une autre relation était présente dans cet entraînement, à savoir que les deux images étaient toujours différentes l'une de l'autre.

Après une trentaine d'essais, soit un entraînement d'environ trois heures, les abeilles choisissaient toujours les combinaisons récompensées (par ex. deux images différentes, situées dans une relation dessus/dessous). Elles faisaient ce choix même quand lors des tests, elles étaient confrontées à des motifs nouveaux qu'elles n'avaient jamais vus au cours de l'entraînement.

Schéma 5





Les abeilles ont donc extrait et les relations spatiales et le concept de différence ! Elles sont donc capables d'extraire deux concepts à la fois et de les utiliser pour résoudre des problèmes complexes qui se posent à elles dans la nature.

### Les bases neuronales

Donc les abeilles ont des capacités supérieures. Mais il faut maintenant voir quelles sont les bases neurales de ces capacités. Chez l'homme on est capable d'identifier les sites des apprentissages de concepts et règles abstraites. Ceux-ci se déroulent dans le cortex préfrontal ; et ce qui permet à l'homme d'extraire des concepts indépendamment des signaux physiques, c'est que cette région intègre des voies différentes, des informations

visuelles, gustatives... C'est un carrefour de voies sensorielles et on peut y combiner ces informations et en tirer les concepts qui vont au-delà de ces informations concrètes.

L'abeille n'a évidemment pas de cortex préfrontal ! Mais n'y aurait-il pas dans ce cerveau un carrefour d'intégration comparable ? Une structure du cerveau de l'abeille apparaît comme une bonne candidate pour remplir cette fonction. Ce sont les corps pédonculés : il y a une région d'entrée (calices) et une région de sortie (pédoncules) : au niveau des calices arrivent des voies olfactives, visuelles, sensorielles, gustatives ségréguées ; au niveau des neurones de sortie des corps pédonculés, les réponses sont multimodales : ces neurones répondent à une multiplicité de signaux différents. Donc, les corps pédonculés sont le lieu d'une intégration

tion multisensorielle: il s'y passe des échanges et des transferts entre modules, avant la sortie. C'est là aussi qu'on trouve le site de la mémoire à long terme. Cette région présente donc une similarité fonctionnelle avec le cortex préfrontal de l'être humain.

Des études en cours essaient de déterminer si, lors des apprentissages de concepts, des modifications particulières de la structure fine des corps pédonculés ont lieu.

En résumé, nous avons compris que l'abeille est une créature unique, dans le sens où elle est capable d'apprentissages d'ordre supérieur, et dans le sens où il est possible d'accéder au mystère de ces capacités par l'étude de son cerveau.

Je voudrais avoir partagé avec vous la fascination que j'ai pour cette petite créature. L'abeille mérite notre protection... Je compte sur vous pour ce dernier point!

## Bibliographie

Avarguès-Weber A., Dyer A. G. et Giurfa M., 2011 : Conceptualization of above and below relationships by an insect, *Proc. R. Soc. B.* : 898-905.

Avarguès-Weber A., Dyer A. G., Combe M. et Giurfa M., 2012: Simultaneous mastering of two abstract concepts by the miniature brain of bees, *PNAS* 109 (19): 7481-7486.

## Questions - réponses

**Q.** Jusqu'où va la mémoire des abeilles? Les abeilles d'hiver pourraient-elles garder en mémoire des informa-

tions acquises lors de la saison précédente?

**R.** Martin Lindauer a entraîné des abeilles d'automne à fréquenter un nourrisseur, et les a vues danser longtemps sur des cadres operculés. Or dans ces cadres il y avait des larves en voie de développement... Il est possible que ces larves aient perçu les vibrations émises pendant la danse. L'idée de Lindauer était que les larves pourraient avoir enregistré ces vibrations, de sorte qu'une fois devenues abeilles elles sortaient dans la direction rapportée trois mois avant. On sait que le cerveau des larves a la faculté d'enregistrer des informations.

**Q.** Moi mes abeilles me reconnaissent...

**R.** La reconnaissance d'une personne par l'abeille n'est pas du même type que celle que nous opérons, mais je suis convaincu qu'elles peuvent reconnaître des paramètres comme les odeurs, les silhouettes...

Plusieurs apiculteurs donnent des témoignages quant à ce qu'ils ont constaté de la mémoire de leurs abeilles.

Martin Giurfa note encore: on connaît les molécules qui interviennent dans la mémoire. On a pu déterminer quand une cascade<sup>4</sup> s'active et comment cela s'enchaîne... et ces molécules sont quasiment les mêmes que celles qui interviennent dans la mémoire chez l'homme. Ce sont les mêmes processus et les mêmes durées: l'abeille, comme nous, dispose de mémoires à long terme, à moyen terme, à court terme. ■

4 – Ce que l'on appelle une cascade est une suite de réactions biochimiques qui se suivent et dont le produit final entraîne un effet déterminé, ici comportemental.