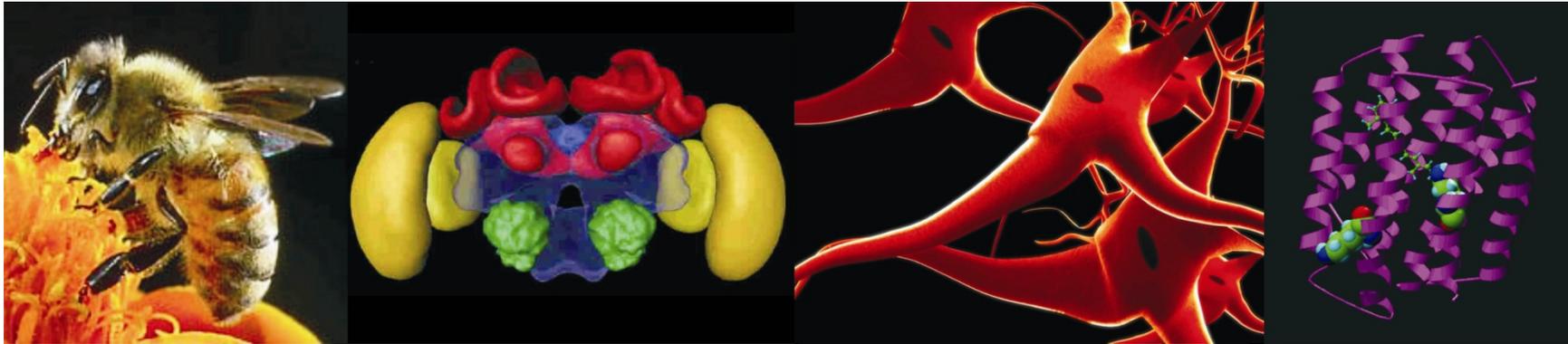


Dans le cerveau des abeilles: nouvelles découvertes, nouveaux émerveillements



Martin Giurfa

Institut de Biologie Paris-Seine

Neurosciences Paris Seine

martin.giurfa@sorbonne-universite.fr

Deux Cerveaux en Vue Frontale

Le cerveau humain

1350 cm³

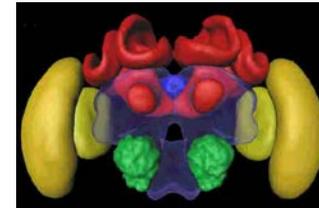
**90~100 milliards de
neurones**



Le cerveau de l'abeille

1 mm³

1 million de neurones



L'abeille domestique *Apis mellifera* : un pollinisateur floral constant

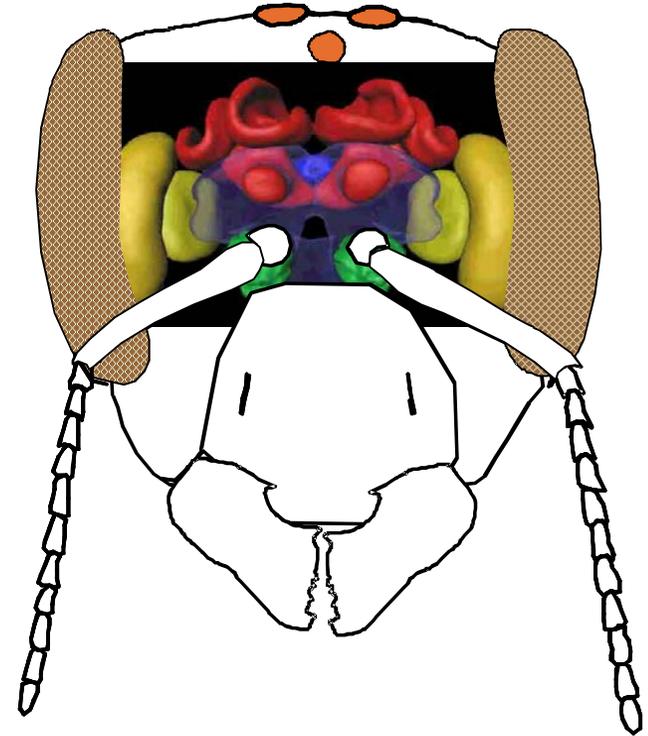
- ❑ La constance florale est basée sur la capacité d'apprendre et mémoriser en contexte naturel, couleurs, odeurs, formes, etc.
- ❑ Possibilité d'entraînement et donc de recherche expérimentale sur l'apprentissage: les abeilles sont coopératives tant qu'elles sont récompensées avec de l'eau sucrée.



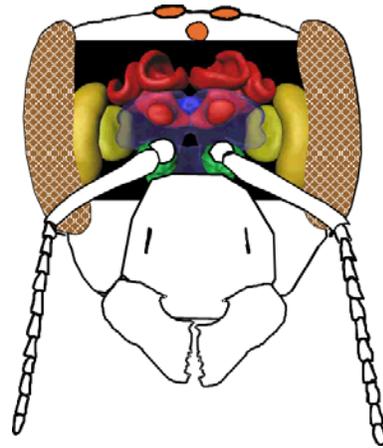
- ❑ *Des méthodes invasives disponibles pour accéder au cerveau, un génome entièrement séquencé.*
- ❑ Un système nerveux relativement 'simple' : 950 000 neurones au lieu de 100 milliards...

Questions à Répondre

- ❑ Comprendre le potentiel du mini cerveau de l'abeille : **de quoi est-il capable?**
Comment de telles performances sont-elles assurées par un tel cerveau?
- ❑ **Ces capacités restent-elles au niveau élémentaire?** Au-delà de simples associations, peuvent-elles apprendre des concepts ? Et si oui, peuvent-elles apprendre des concepts numériques? Comptent-elles?
- ❑ **Ont-elles des mémoires comparables aux nôtres?** Jusqu'à quel point leur mémoire est efficace? Où sont stockées les mémoires des abeilles?
- ❑ **Comment les pesticides affect-ils le cerveau des abeilles?**
- ❑ Qu'apprenons nous sur notre propre cerveau à partir des abeilles?



I. L'apprentissage de concepts chez les abeilles



L'apprentissage de concepts



Thomas Zentall

Apprendre à résoudre des problèmes à partir de relations entre objets ou événements de l'environnement

Concepts relationnels : relations qui sont encodées indépendamment de la nature physique des objets qui sous-tendent ces relations.

Ex: 'même que', 'différent de', 'plus grand que', 'meilleur que', 'au dessus de', etc.



Concepts relationnels : l'apprentissage du concept d'équivalence ('sameness')

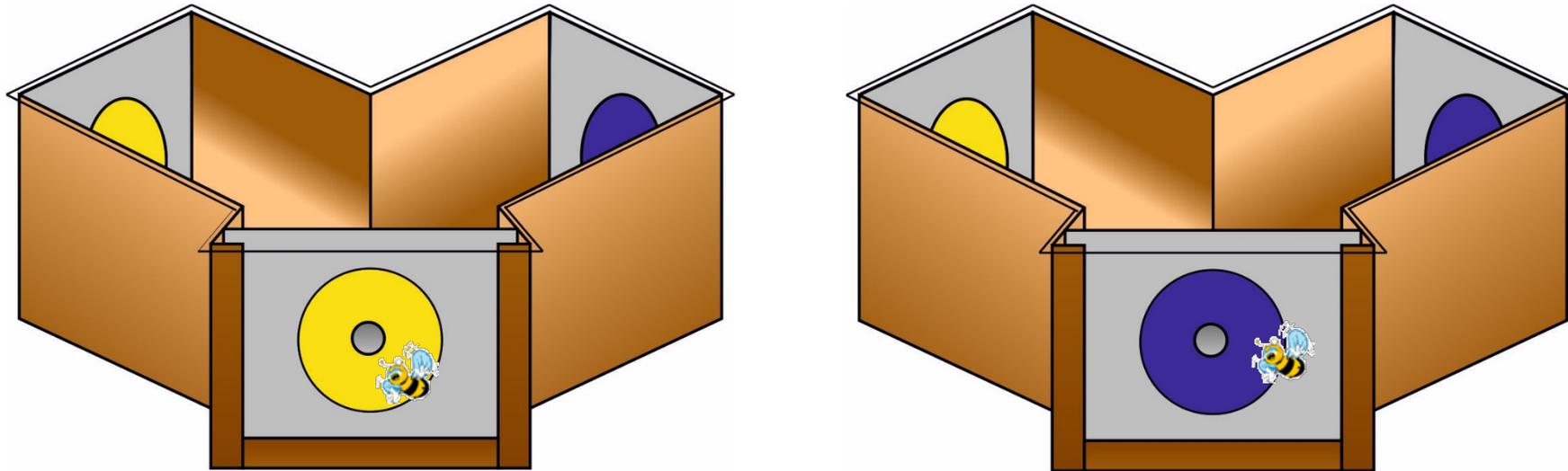
- ❑ Les abeilles peuvent-elles apprendre une 'règle d'équivalence' (sameness rule)?



- ❑ Peuvent-elles résoudre un problème de 'delayed matching-to-sample', focalisé sur une règle relationnelle, indépendamment de la nature physique des stimuli sous-tendant la règle d'équivalence?

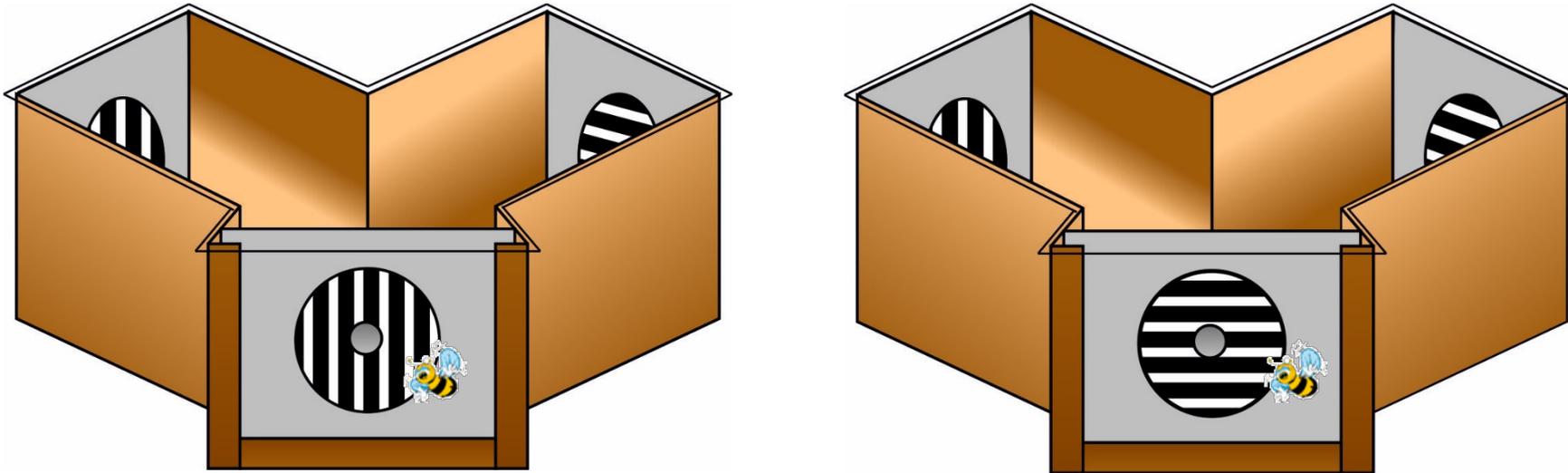
Entraînement

Les abeilles sont entraînées dans une tâche de discrimination de couleurs. Dans le protocole de "delayed-matching-to-sample", elles doivent choisir le stimulus qui est identique à l'échantillon présenté à l'entrée du labyrinthe.

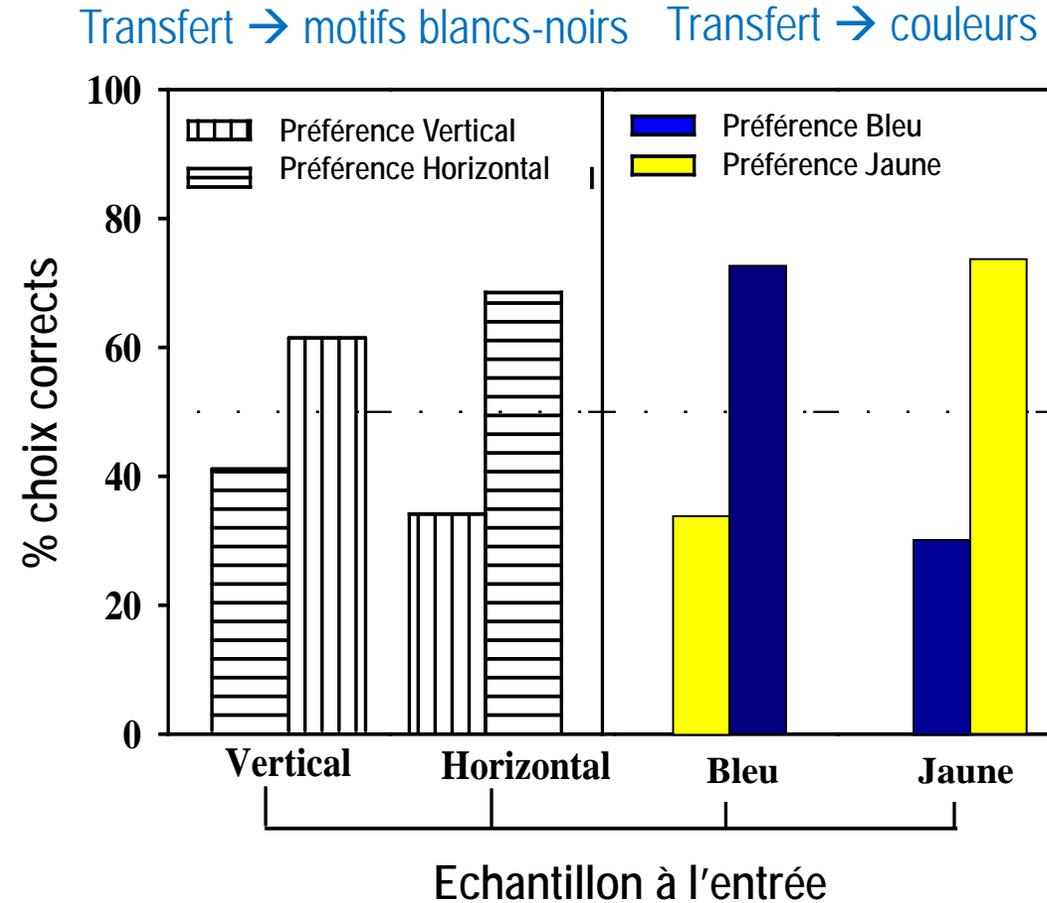
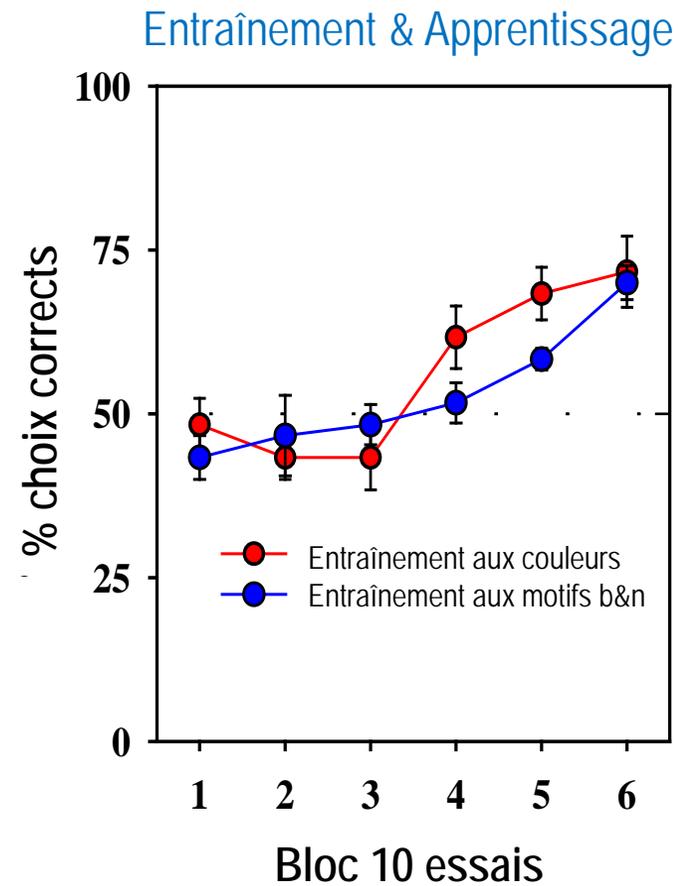


Test

Après avoir appris la règle précédente, les abeilles sont confrontées à de nouveaux stimuli qu'elles n'ont jamais vus auparavant. Elles doivent montrer si elles ont appris le **concept abstrait d'équivalence (« sameness »)** et donc choisir en conséquence



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





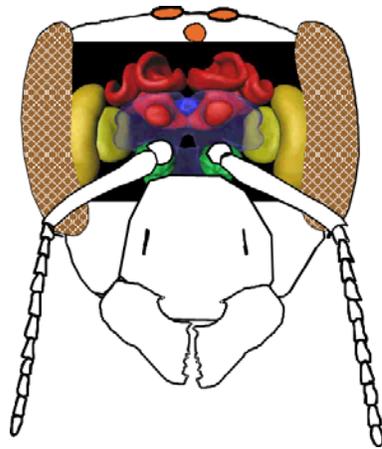
Conclusions



- ❑ Les abeilles peuvent apprendre une règle basée sur le **concept d'équivalence ('sameness')** indépendamment de la nature physique des stimuli utilisés.
- ❑ Transfert entre couleurs et motifs achromatiques, mais aussi entre couleurs et odeurs. Les représentations conceptuelles ne sont pas liées au domaine initial, mais **peuvent être transférées à de nouveaux types de stimuli**.
- ❑ Elles peuvent également apprendre un **concept de différence** (DNMS).
- ❑ Notre équipe a montré que les abeilles apprennent d'autres concepts : par exemple des concepts spatiaux ('au-dessus de', 'au-dessous de', 'à droite de', 'à gauche de'), des concepts de numérosité, et la maîtrise simultanée de deux règles conceptuelles.



II. Les nombres chez l'abeille



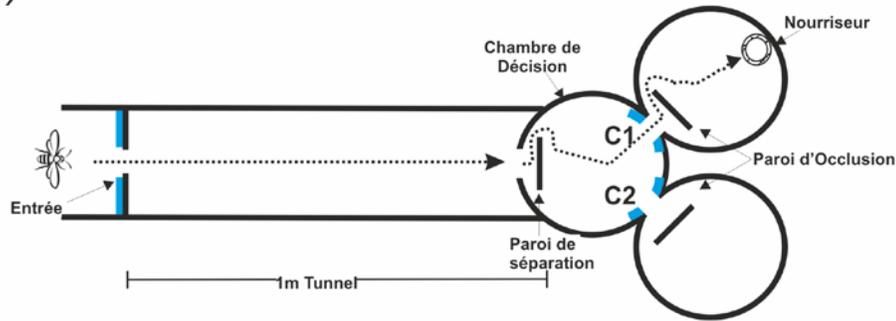
Les abeilles ont aussi des concepts numériques



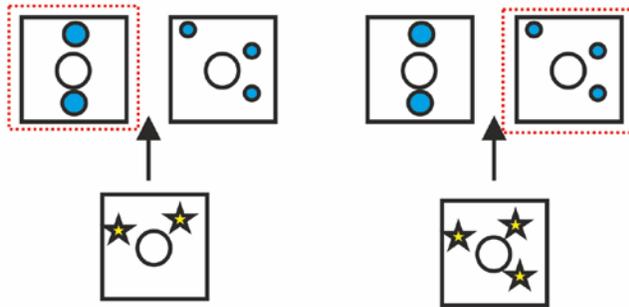
Shaowu Zhang

□ Les abeilles, comme beaucoup d'autres espèces animales, ont un sens numérique: *elles comptent*.

(a)



(b)



- Expérience où il faut apparier le choix à des quantités spécifiques, indépendamment des détails de l'image. Correspondance entre nombres : « *choisis le nombre que je te montre indépendamment du nombre montré* ».
- Les abeilles choisissent en fonction du nombre d'objets dans les images.
- Elles comptent jusqu'à 5.

$$1+2=3$$



L'abeille et le concept du zero

Les abeilles comprennent-elles la notion numérique du ZERO?

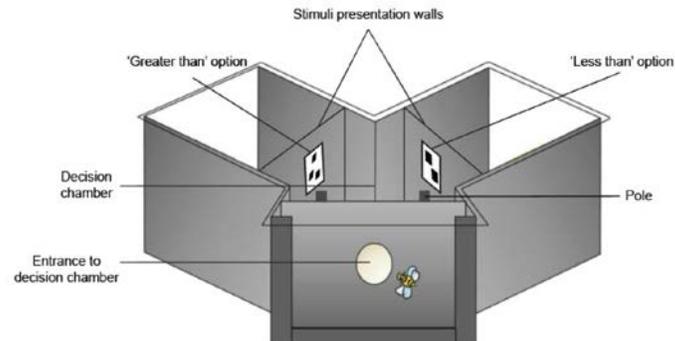
- Zéro en tant que ‚Néant‘ — L'absence de stimuli.
- Zéro en tant que ‚Néant‘ contre ‚quelque chose‘.
- Zéro en tant que valeur minimale d'une série continue de nombres positifs.
- Zéro chez l'Humain: Représentation symbolique d'un chiffre (symbole arabe ‚0‘), utilisé en mathématiques.



Scarlett
Howard

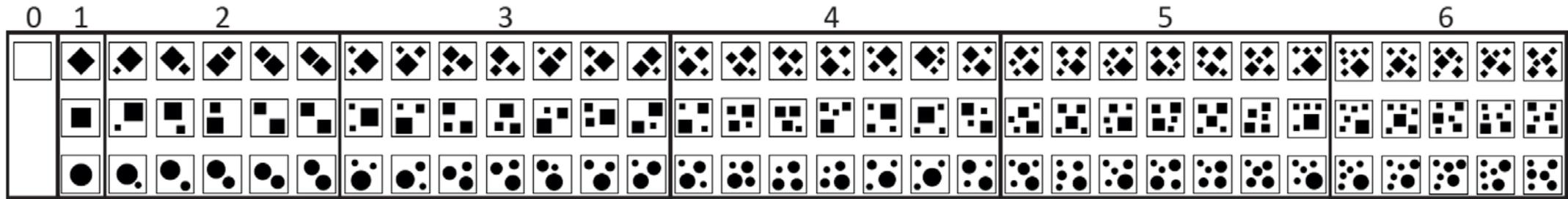


Aurore Avargues-
Weber

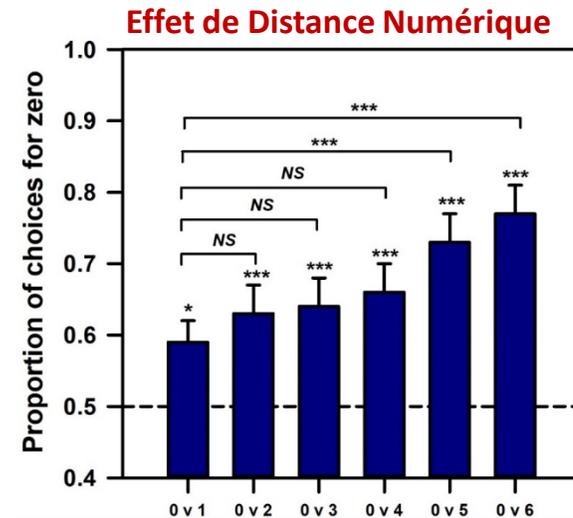
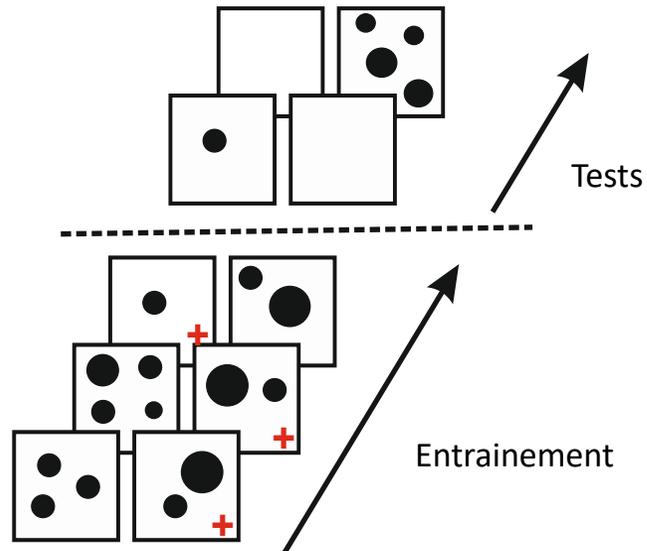


- Entraînement selon règle *“plus petit que”*.
- Le nombre de carrés change d'une visite à l'autre.
- Les stimuli changent aussi d'une visite à l'autre.

Images utilisées pour l'entraînement



Entraînement: Fonds blanc avec des éléments noirs (cercles, carrés, etc.)



A plus petite distance entre deux chiffres, plus difficile devient la possibilité de les discriminer

Conclusion: les abeilles comprennent et intègrent le „Zéro“ en tant que concept numérique



- Les abeilles sont capables d'intégrer dans leur choix le concept abstrait du néant. A partir d'un entraînement conceptuel qui les pousse à choisir en fonction de « plus petit que », elles préfèrent un fonds vide contre le même fonds où apparaît un seul élément noir, ce qui indique que $0 < 1$.
- Elles conçoivent le nombre Zéro en tant que valeur inférieure d'une série continue et croissante de nombres positifs. *Effet de Distance Numérique.*
- Des expériences récentes ont aussi montré que les abeilles sont aussi en mesure d'apprendre des additions ou des soustractions simples.



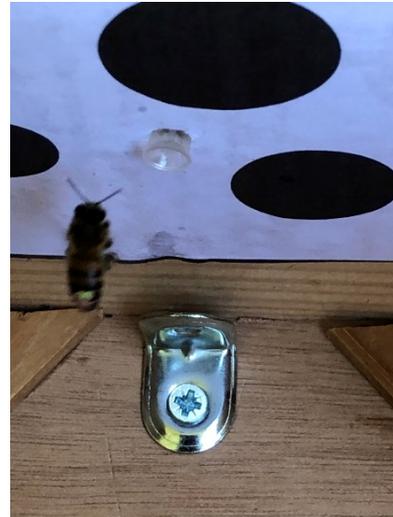
Rosa Rugani

Les abeilles ont-elles une ligne mentale numérique?

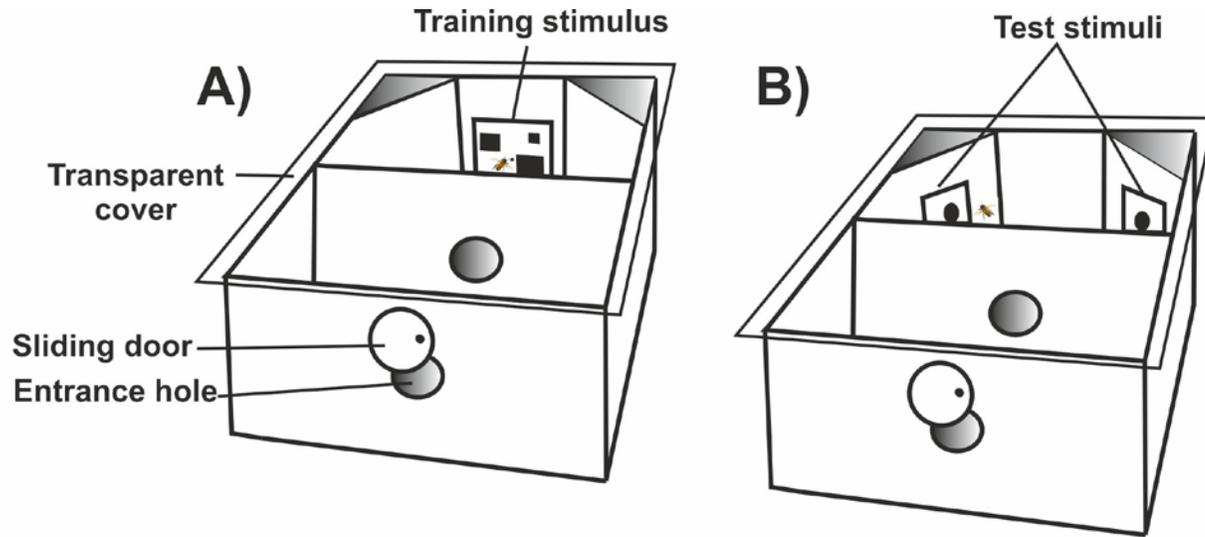


Catherine Thevenot

- ❑ Les abeilles mellifères ont un sens numérique : ont-elles une «**ligne mentale numérique**» ?
- ❑ Représentent-elles les nombres de gauche à droite en ordre croissant, comme le font les humains?



Entraînement & tests



- Entraînement à un nombre donné (les images changent, le nombre reste fixe) présenté en position centrale. *P. ex. entraînement à 3.*
- Trente visites à l'appareil.
- Test avec deux nouveaux nombres, un à droite et l'autre à gauche. Les deux sont des images miroir identiques. *P. ex. test 1 vs. 1.*



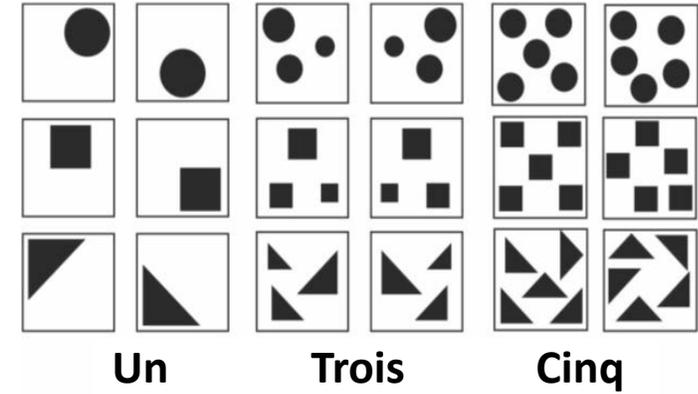
Questions

- L'abeille préférera-t-elle un côté spécifique lors de la présentation des deux images-test identiques?
- Ce côté varie-t-il en fonction du nombre affiché ? Et en fonction du nombre de référence?

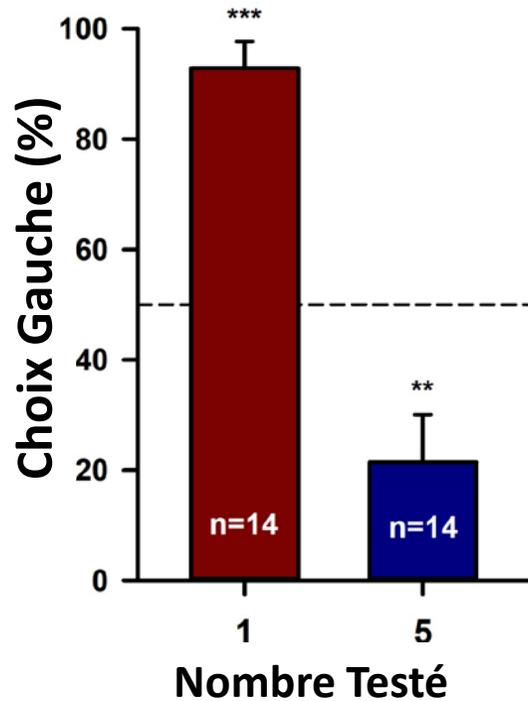
Les abeilles montrent-elles des biais de position dépendant du nombre affiché?



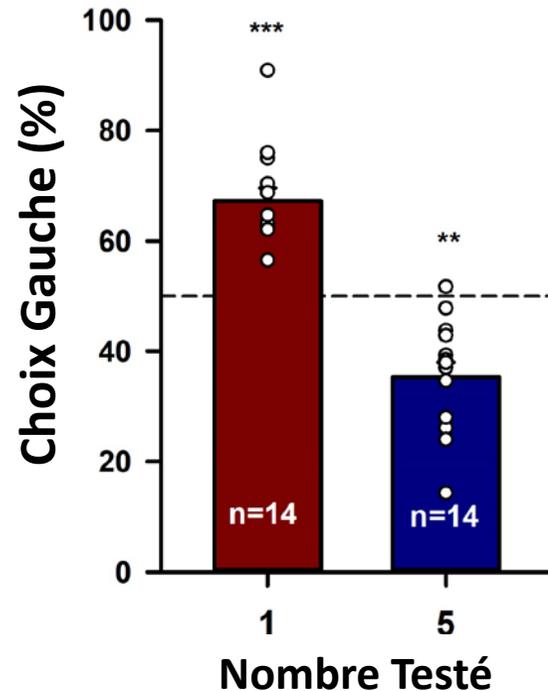
La Ligne Mentale Numérique: Entraînement à 3 – Test avec 1 ou 5



Premier choix

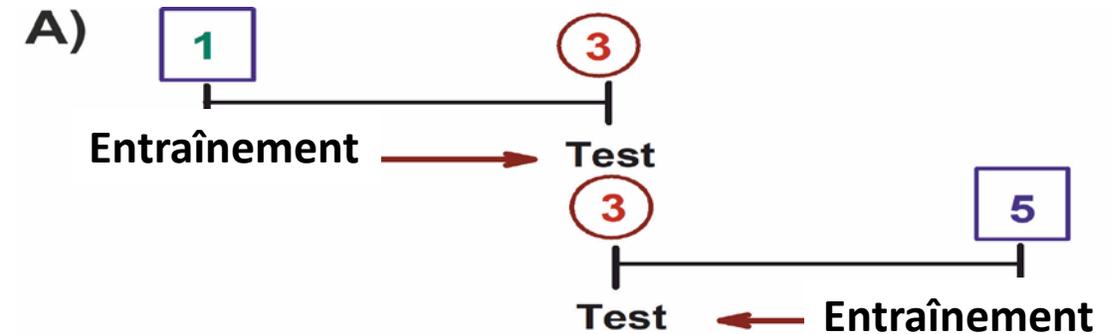


Choix cumulés 30 seg

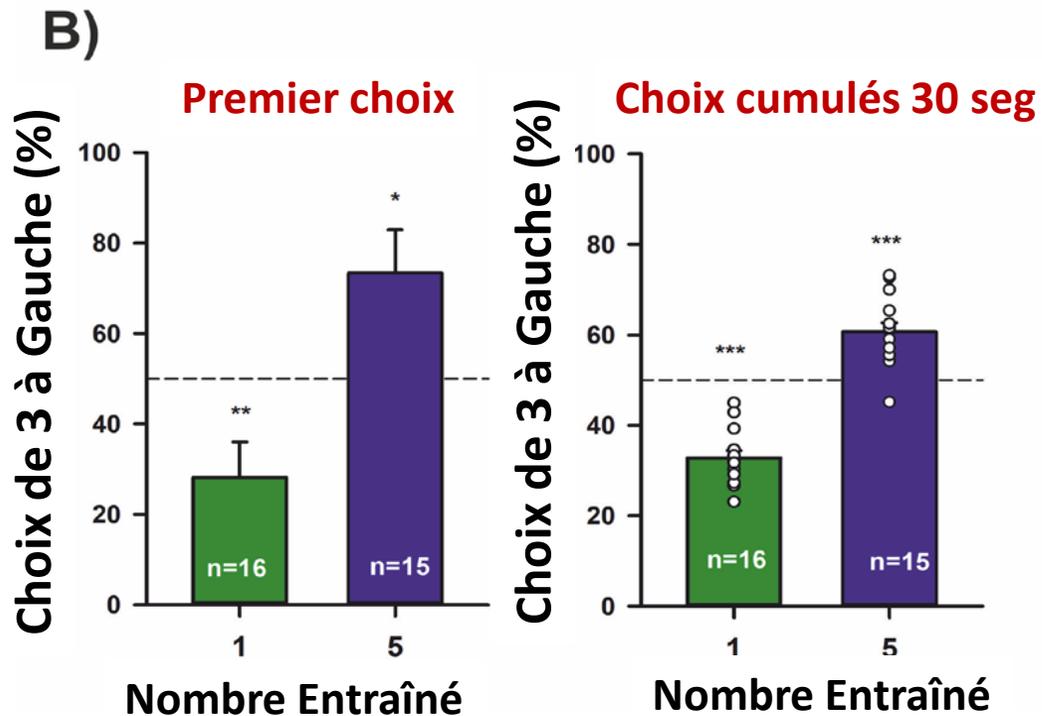


Les abeilles entraînées à 3 ont préféré **1 à gauche** et **5 à droite** par rapport à leur numéro de référence (3).

Changement du nombre de référence



- Entraînement à 1, Test avec 3
- Entraînement à 5, Test avec 3
- Le nombre présenté dans les tests est le même (3)
- Mais les nombres de référence sont différents (1 & 5)



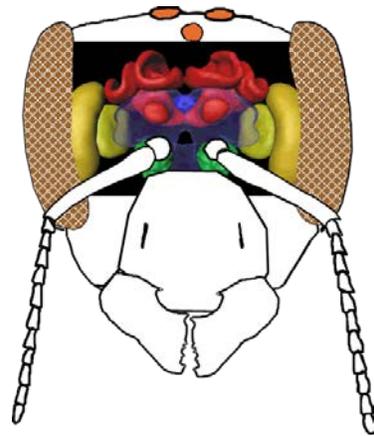
L'association d'un nombre avec le côté droit ou gauche de l'espace n'est pas absolue mais dépend du nombre de référence.

- Les abeilles entraînées à 1 associent 3 avec le côté droit.
- Abeilles entraînées à 5 associent 3 avec le côté gauche.

Conclusions: une ligne mentale numérique chez les abeilles

- Existence d'une représentation spatiale numérique de gauche à droite, qui fournit une preuve supplémentaire de la [convergence entre le sens numérique des vertébrés et des invertébrés](#).
- La ligne mentale numérique inhérente à de nombreux cerveaux avec des hémisphères latéralisés.
- Un traitement latéralisé des signaux sensoriels et des asymétries cérébrales gauche-droite existent dans le système nerveux des abeilles.

III. Olfaction et mémoire



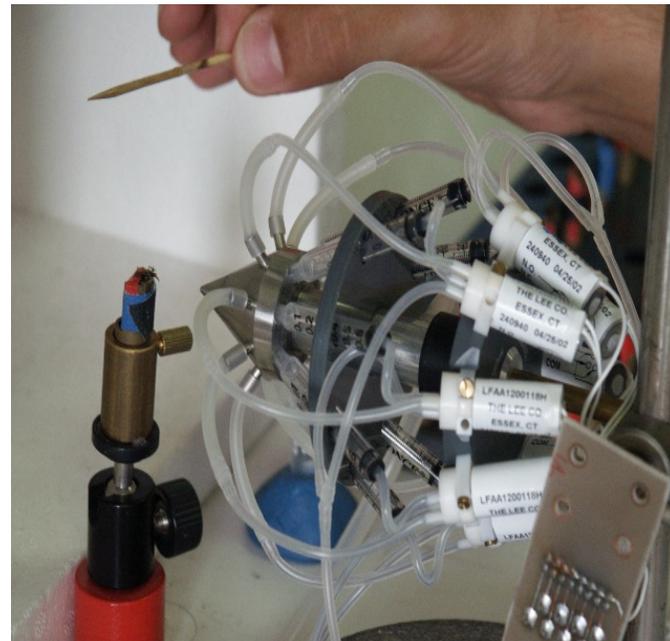
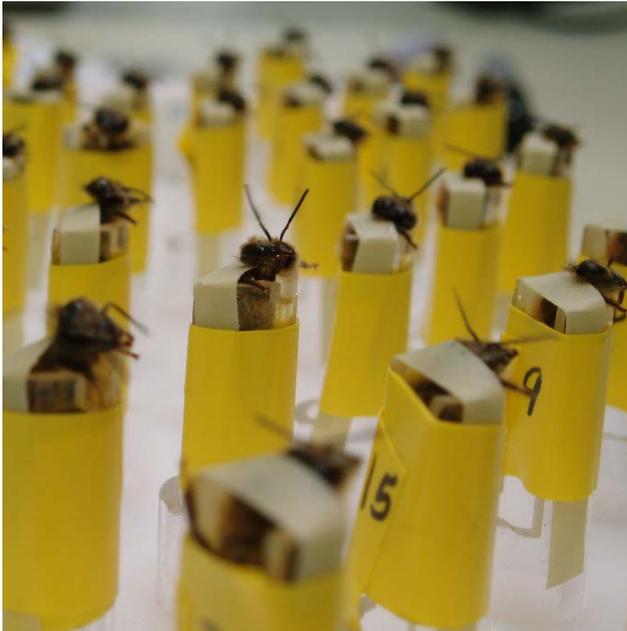
L'apprentissage olfactif chez les abeilles : un cas d'étude classique sur l'apprentissage et la mémoire animale

Les abeilles mellifères apprennent efficacement les odeurs des fleurs qu'elles exploitent.

Cette information est cruciale pour reconnaître les fleurs exploitées et assurer ainsi la constance florale.



Le conditionnement olfactif du réflexe d'extension du proboscis : un cas d'apprentissage pavlovien

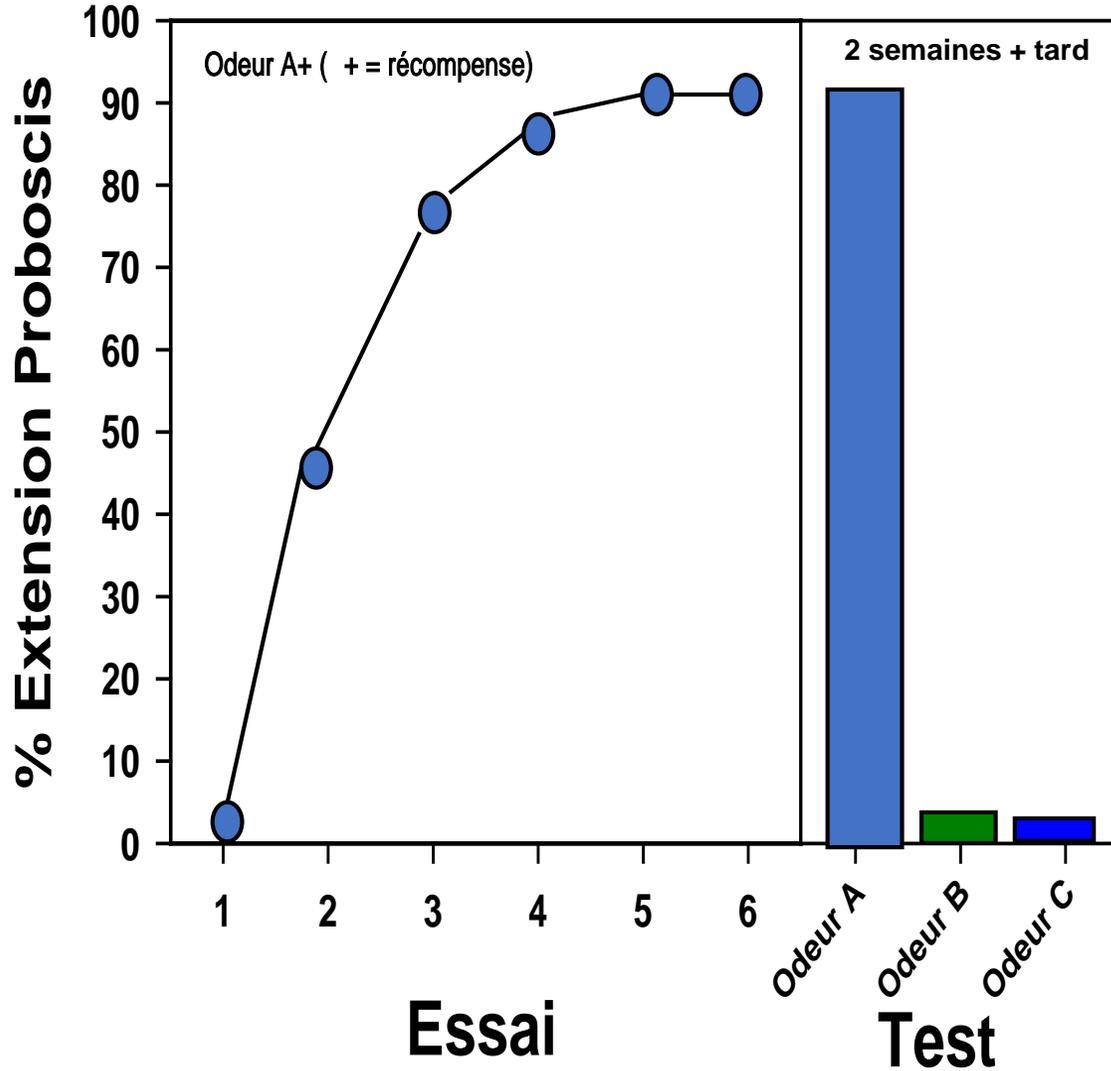


Association Odeur – Saccharose

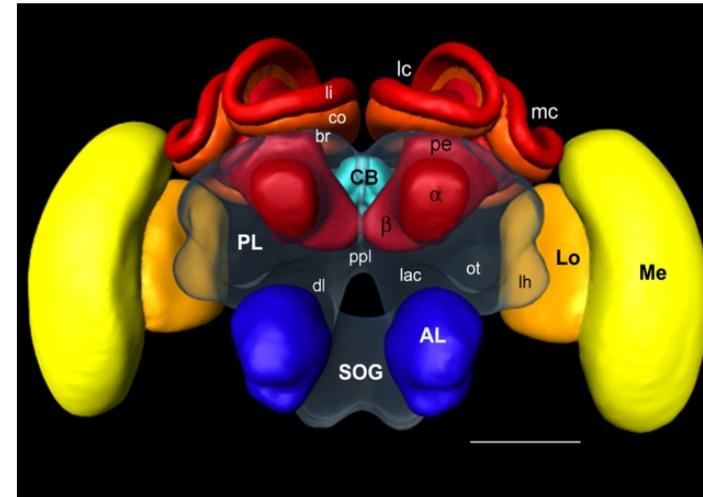
L'odeur doit précéder le saccharose pour que l'apprentissage se produise

Apprentissage rapide en peu d'essais

Mémoire robuste durant toute la vie si plus de 3 essais d'apprentissage



+ accès au
cerveau....



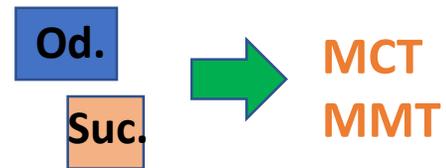
L'idée établie: la répétition est importante



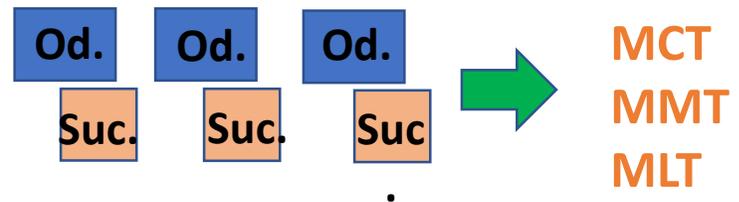
Randolf Menzel

La répétition est importante

1 essai : juste des mémoires à court et moyen terme



Au moins 3 essais : mémoires à court, moyen et long terme



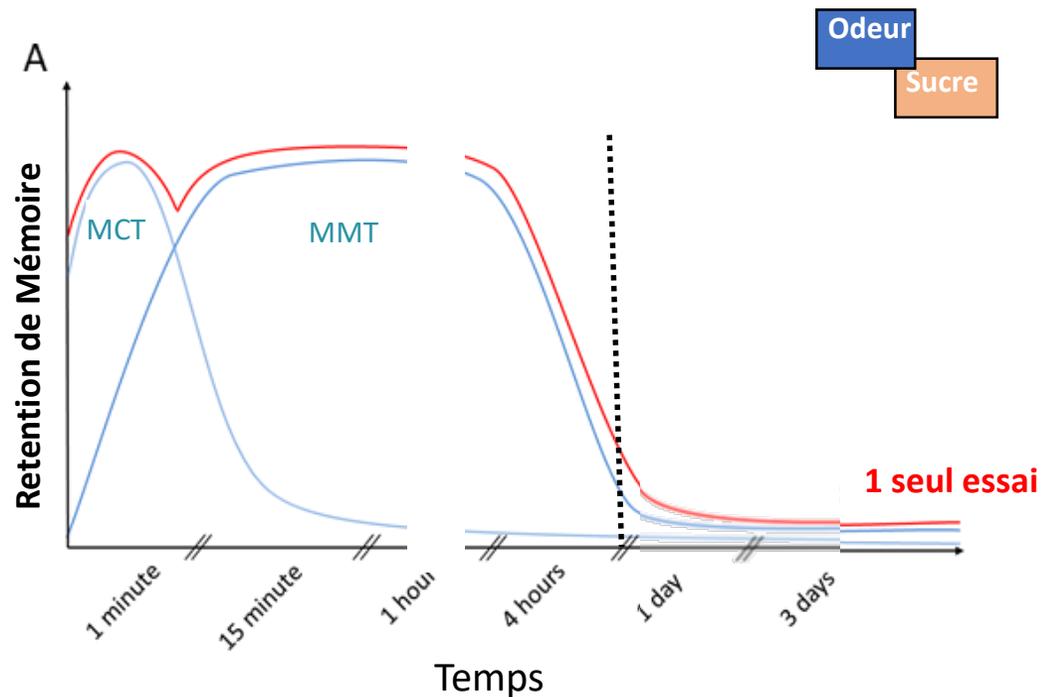
L'effet d'une seule association odeur-sucre: une mémoire à long terme robuste si la motivation appétitive est appropriée



Maru Villar



Paul Marchal



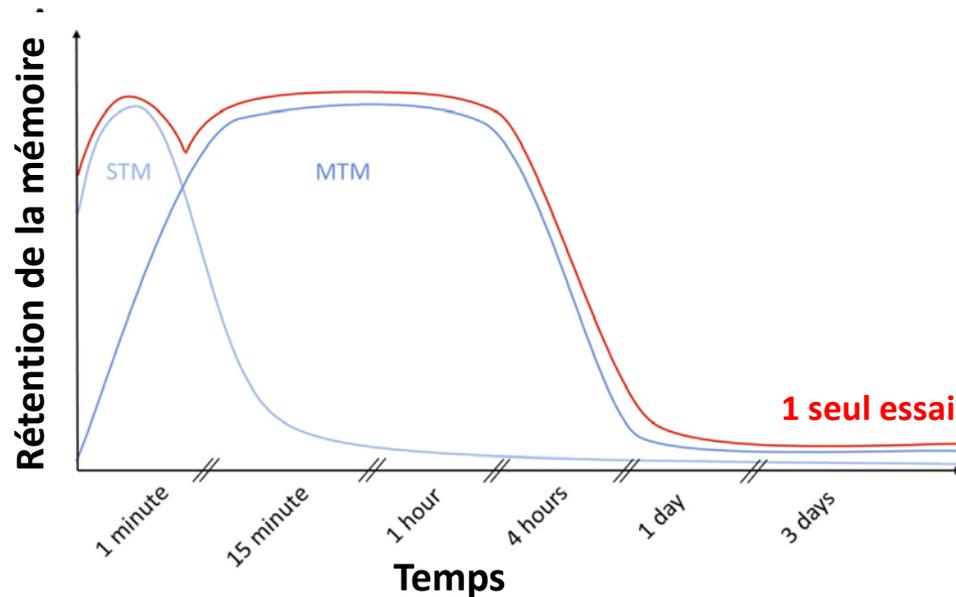
L'utilisation de vraies butineuses a montré qu'une seule expérience olfactive récompensée crée des mémoires à long terme qui dépendent de la synthèse des protéines et qui sont donc stabilisées dans le temps.

=> Mémoires ultra rapides si la motivation est appropriée

Phases de mémoire après 1 essai de conditionnement: avant et maintenant



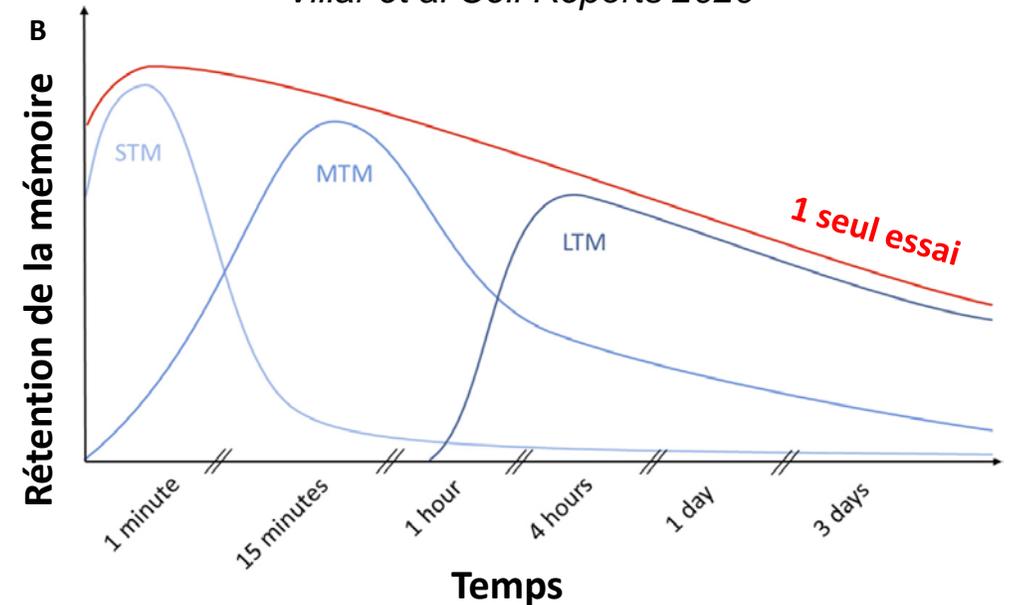
L'idée précédente



Un seul essai de conditionnement induit des MCT et des MMT et à partir de là, dans des délais plus longs, des mémoires défaillantes qui ne dépendent pas de la synthèse des protéines .

L'idée actuelle

Villar et al Cell Reports 2020



- Un seul essai de conditionnement induit des MLT dépendantes de la synthèse des protéines.
- **Une capacité surprenante a former des mémoires robustes à partir d'une seule expérience.**

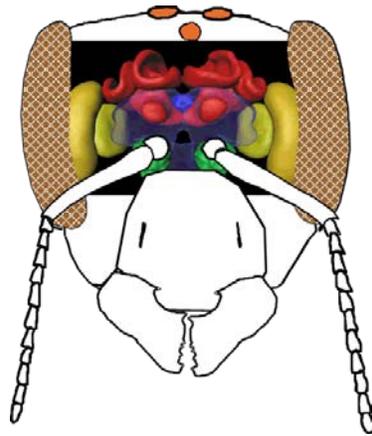
Quelles sont les principales différences entre les Les études précédentes et notre travail actuel?



- De vraies butineuses avec une motivation appétitive élevée.
- Pas d'abeilles d'hiver.
- Pas d'abeilles par mauvais temps.
- Pas d'abeilles pendant la période des frelons asiatique.

Tous ces facteurs influencent l'apprentissage et la mémoire...

IV. Où réside la mémoire olfactive de l'abeille?



Les bases neuronales de l'apprentissage olfactif

Corps pédonculés (centres supérieurs)

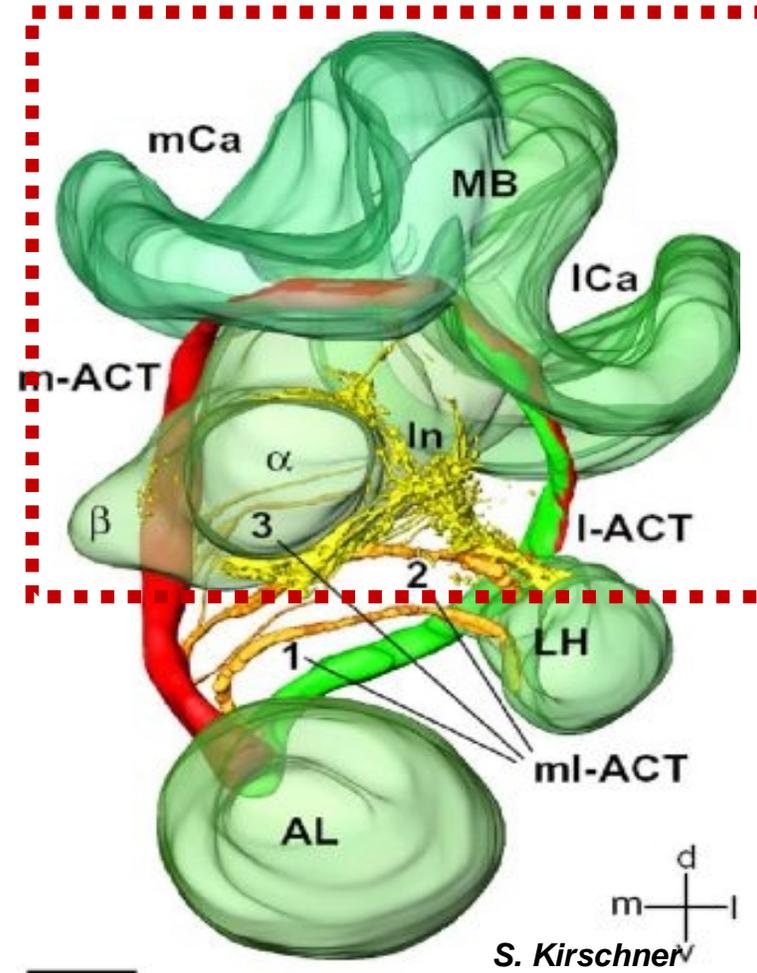
Protocerebrum latéral

Lobe antennaire : 160 glomerules

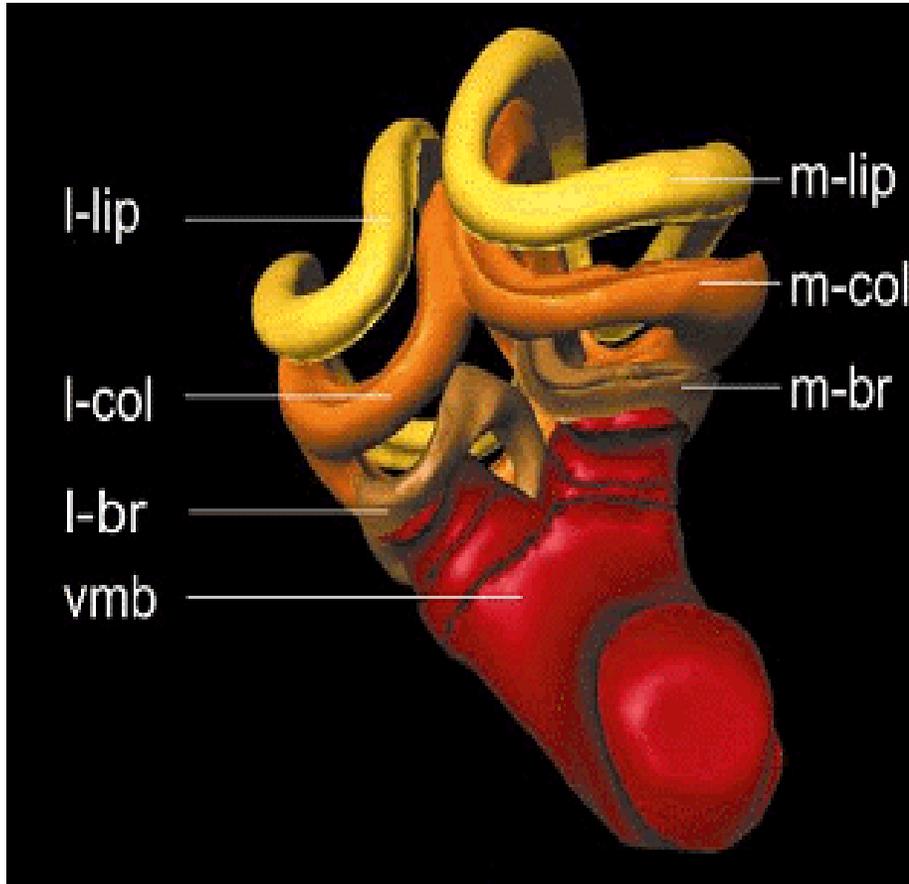
800 neurones de projection

4 000 interneurones locaux

60 000 Récepteurs olfactifs (au niveau
des antennes)



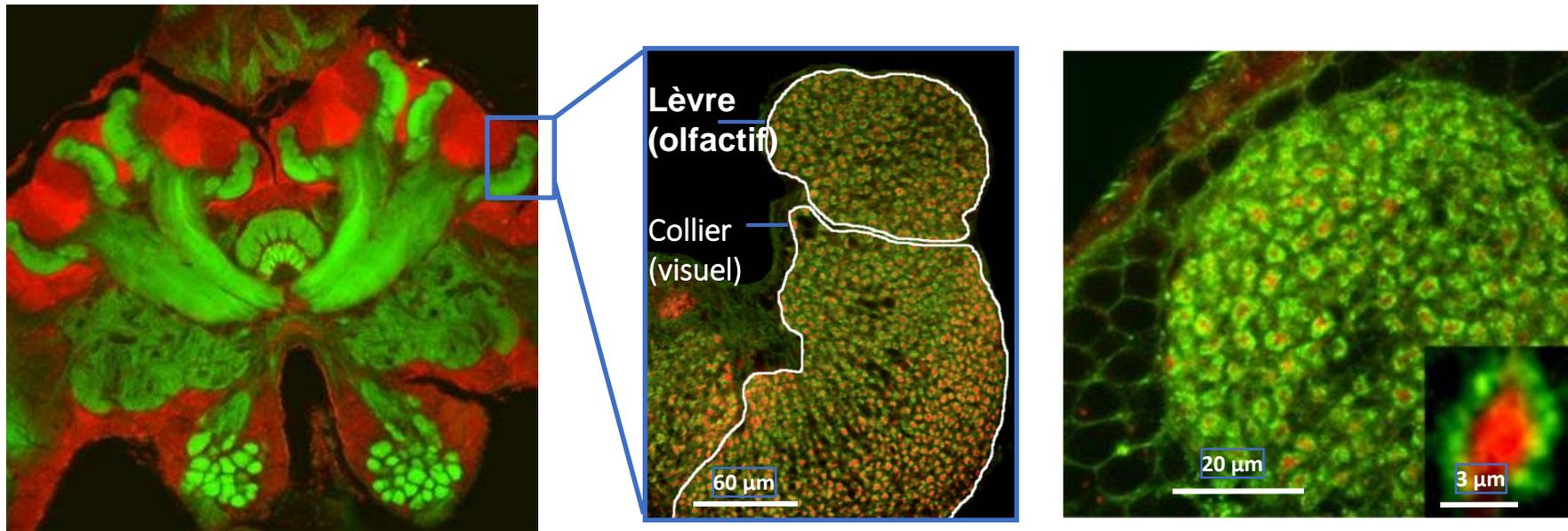
Variations structurales des corps pédonculés lors de la formation des mémoires à long terme



- Centres cérébraux multimodaux, avec convergence multi-sensorielle ségréguée et sortie multimodale combinée
- Echanges et transfert entre modules sensoriels différents
- **Substrat de la mémoire**
- Association étroite avec attention et systèmes de renforcement

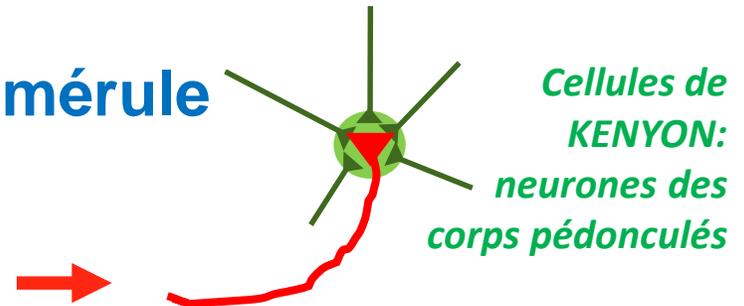
L'organisation cellulaire des corps pédonculés

Dans la région d'entrée des corps pédonculés on trouve des **microglomérules**



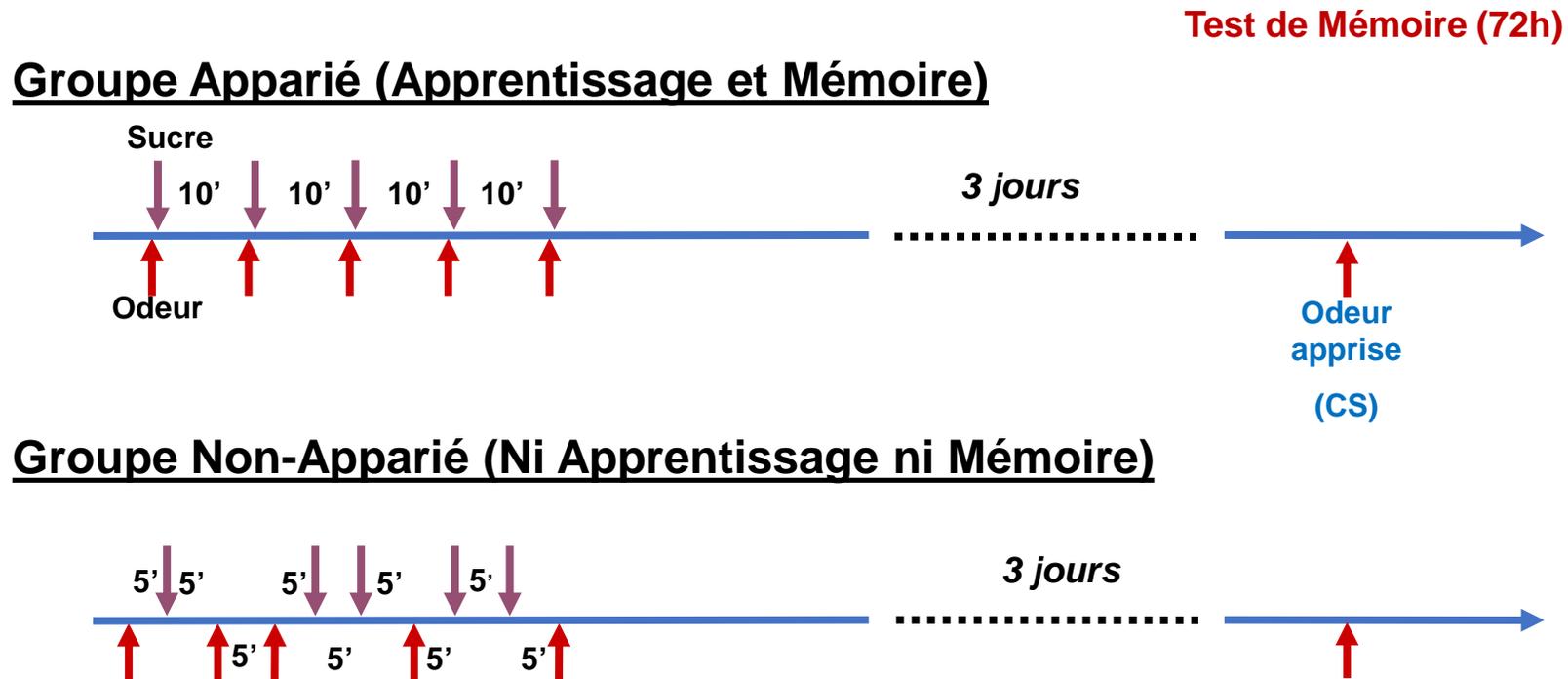
Un microglomérule

Neurone de projection
(en provenance des aires olfactives du cerveau)



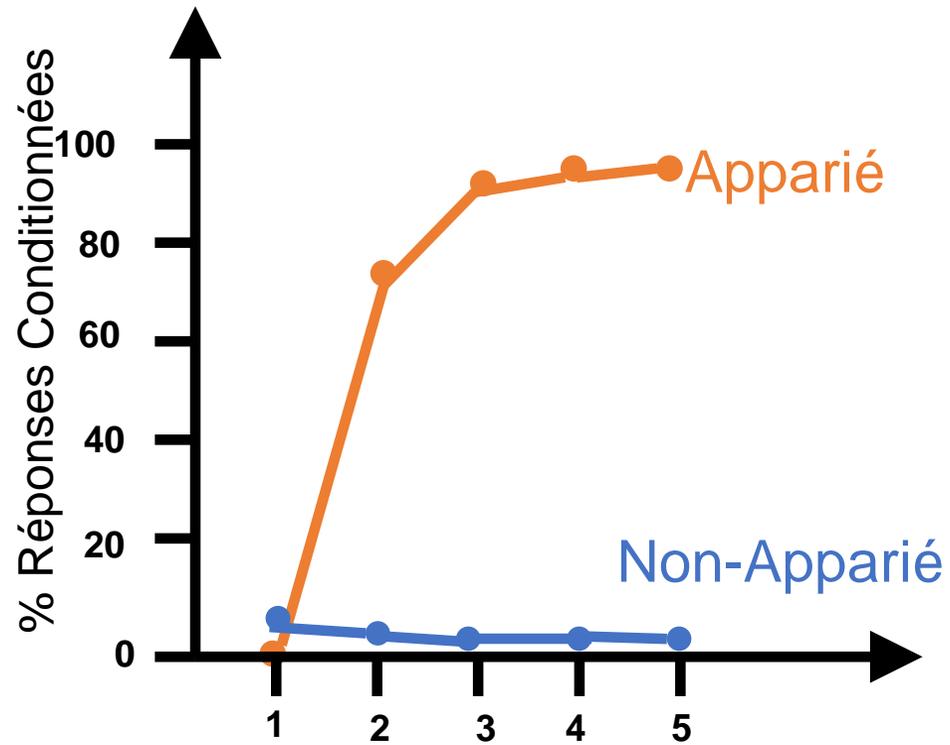
L'apprentissage et la mémoire olfactive modifient-ils les corps pédonculés et plus particulièrement les microglomérules?

Conception de l'Expérience

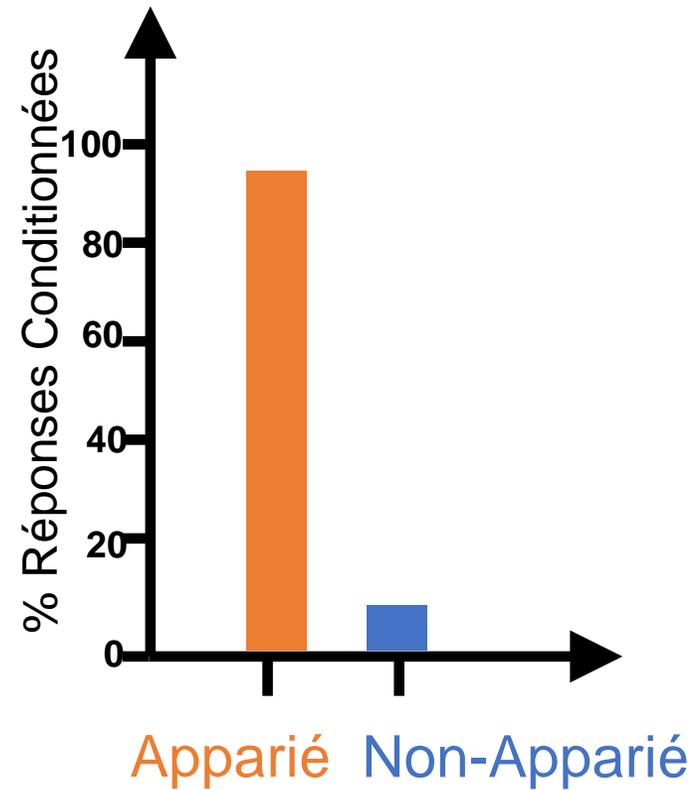


Formation d'une Mémoire Olfactive à Long Terme

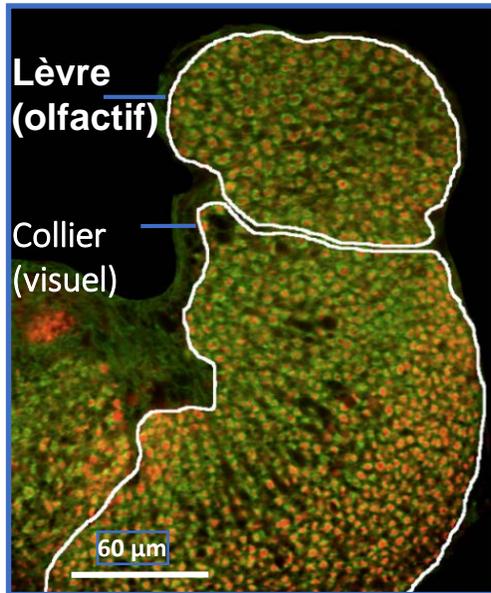
Entraînement



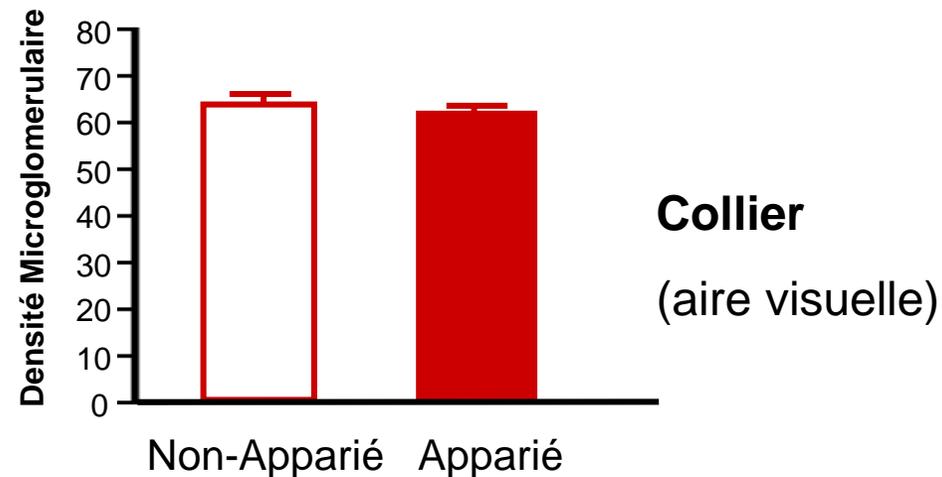
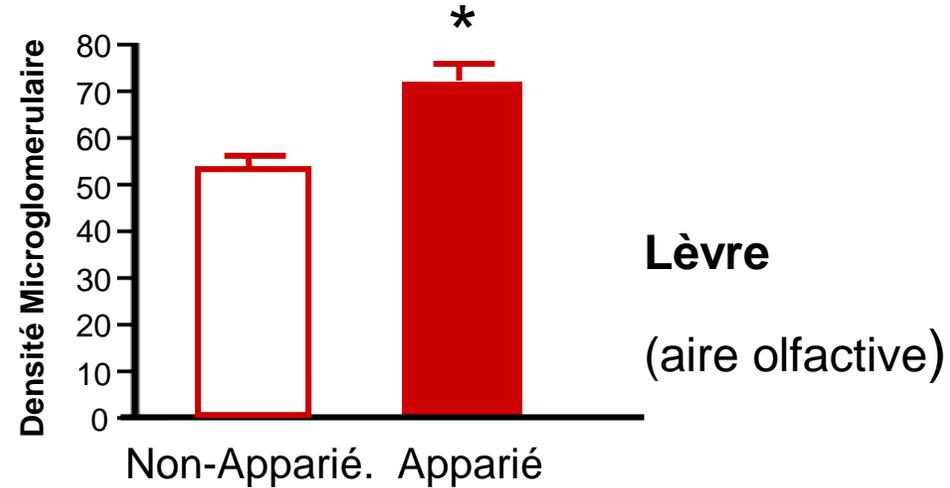
Test de Mémoire



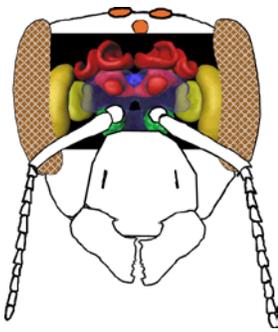
La densité de microglomérules augmente dans les régions olfactives suite à la formation de la mémoire à long terme



Mécanisme possible:
Formation de nouvelles synapses

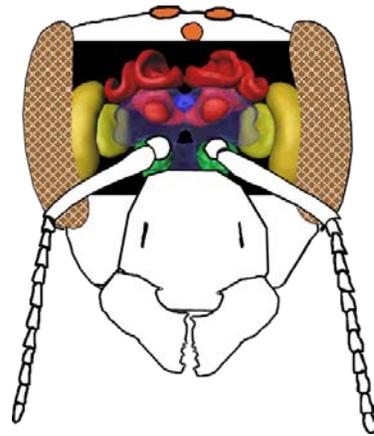


IV. Conclusions : le site de la mémoire

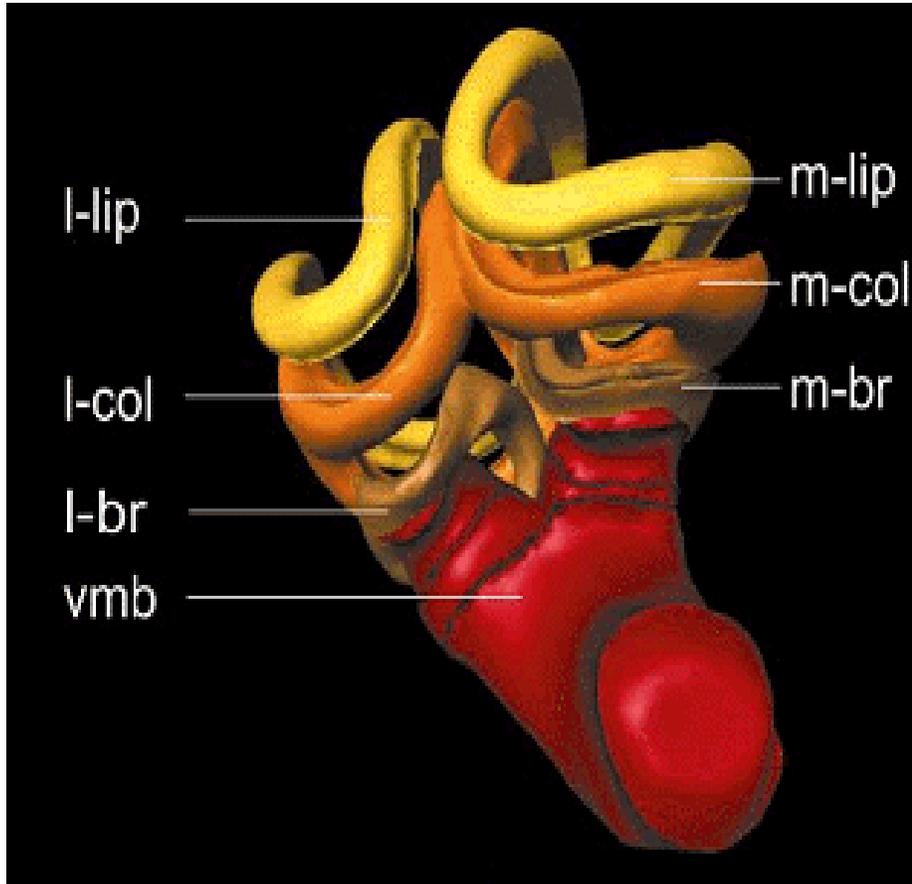


- Le cerveau est **plastique**.
- La région olfactive des corps pédonculés **est modifiée** suite à la formation d'une mémoire olfactive à long terme ...
- La densité microglomérulaire augmente. **De nouveaux microglomérules apparaissent**.
- Ces structures peuvent donc stocker la mémoire olfactive.

V. L'impact des traitements aux pesticides



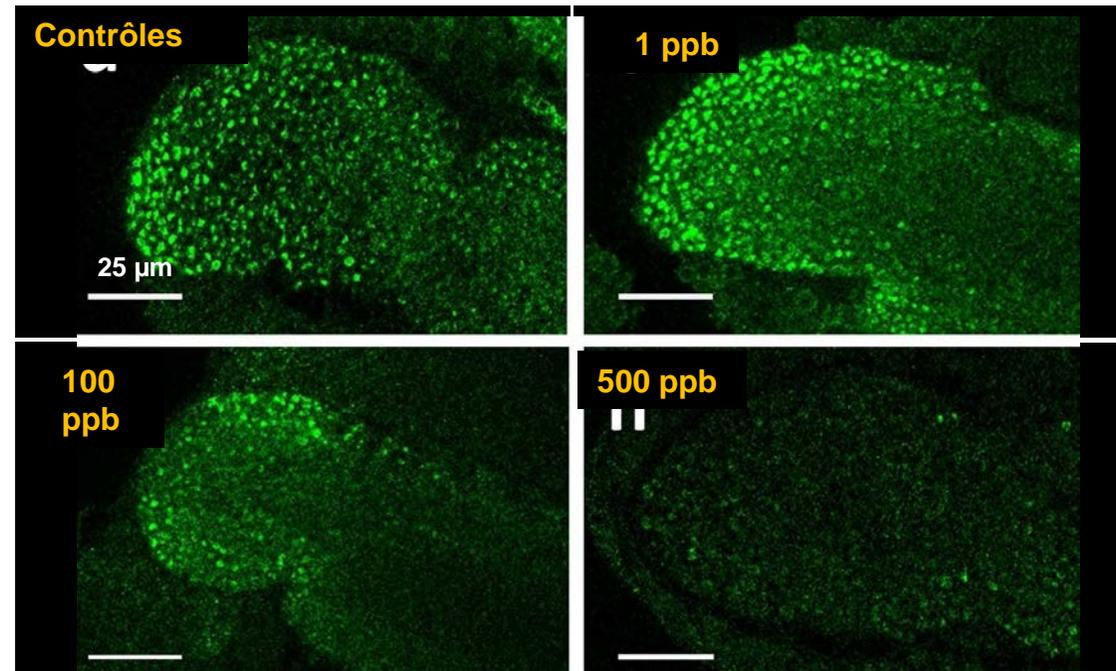
Les corps pédonculés: une structure clé pour le stockage des mémoires des abeilles



- Qu'arrive t-il à ces structures quand les abeilles sont traitées à l'état larvaire avec des doses sublétales de pesticide?
- Les doses sublétales ne tuent pas. Mais affectent elles la connectique cérébrale?

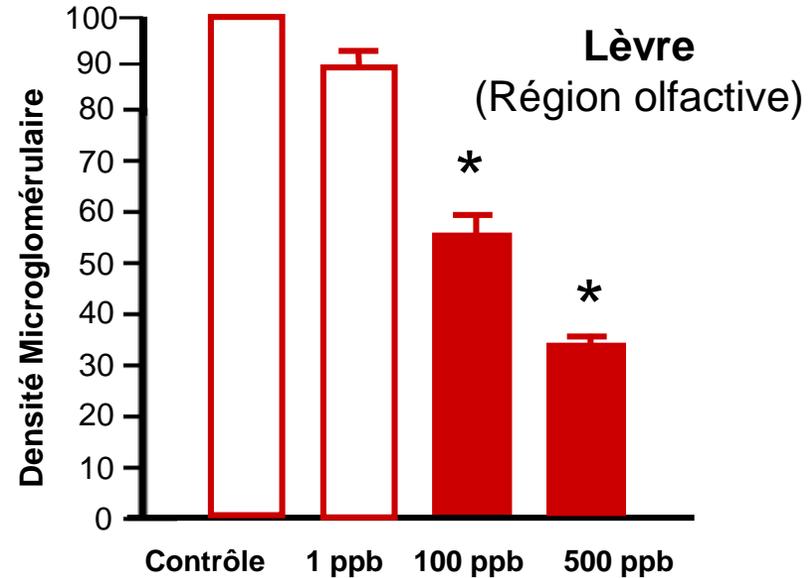
Larves de 1 jour, non operculées nourries avec des doses sublétales d'Imidaclopride (Peng & Yang 2016)

- Abeilles traitées avec différentes doses sublétales (aussi abeilles contrôles).
- Maintenus en incubateur jusqu'à l'Age adulte (20 jours)
- Par la suite, analyse microglomérulaire des corps pédonculés



PPB =partie par milliard
 10^{-9} (un milliardième) = 0,000000001

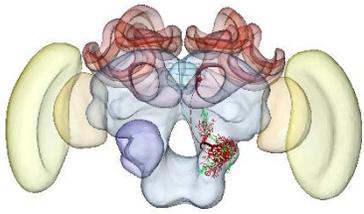
La densité microglomérulaire à l'âge adulte



- La densité microglomérulaire est réduite chez les abeilles adultes à cause des doses sublétales d'Imidaclopride à l'état larvaire
- → Conséquences dramatiques pour l'apprentissage et la mémoire

V. Conclusions: L'impact des pesticides sur l'organisation cérébrale

- ❑ Des doses sublétales induisent des atrophies au niveau des corps pédonculés chez les abeilles adultes.
- ❑ On observe alors une **diminution significative des microglomérules**, structures clés pour le stockage des mémoires à long terme.
- ❑ Ceci aura des conséquences dramatiques pour l'apprentissage, la mémorisation et donc pour la survie.
- ❑ Les doses sublétales de pesticides ne tuent pas dans l'immédiat mais elles créent **des individus lésés cérébraux**, ce qui revient au même.



Conclusions Générales



- ❑ Les abeilles peuvent **apprendre des concepts** au-delà d'associations simples.
- ❑ **Les abeilles comptent**. Leur sens numérique représente les nombres dans l'espace comme nous, suivant une ligne mentale numérique de gauche à droite, avec des nombres plus petits à gauche et des nombres plus grands à droite. Cela peut être la conséquence de la latéralisation du cerveau, qui est également présente chez les abeilles.
- ❑ Les abeilles ont un **mécanisme incroyablement rapide pour établir des mémoires olfactives à long terme**. Si la motivation appropriée est présente, une seule expérience olfactive récompensée induit une mémoire à long terme.
- ❑ **Les mémoires à long terme sont stockées dans la connectique fine d'une région cérébrale appelée les corps pédonculés** ou corps en champignon.
- ❑ **Cette connectique peut être sévèrement dégradée par les doses sublétales de pesticide.**
- ❑ Un cerveau qui nous apprend beaucoup sur nous-mêmes et surtout... **qui mérite RESPECT ET PROTECTION!**

Le Bee Team...



European
Research
Council

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR

