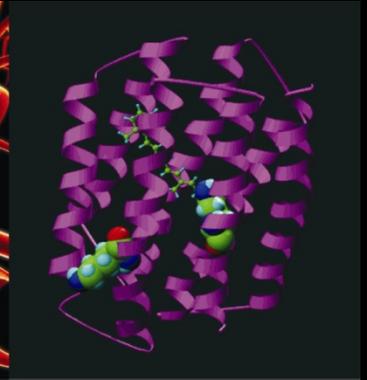
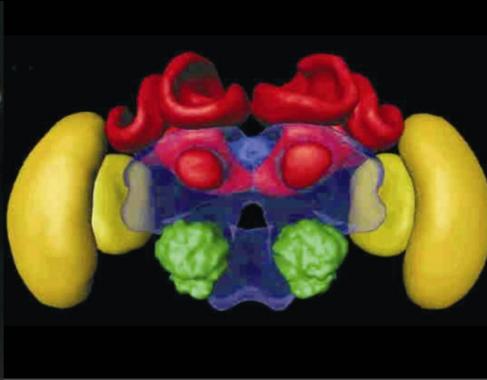


Mini Cerveau et Méga-Performances : Comprendre la Cognition à partir d'une Abeille



Martin Giurfa



Centre de Recherches sur la Cognition Animale
Toulouse, France

<http://cognition.ups-tlse.fr>



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

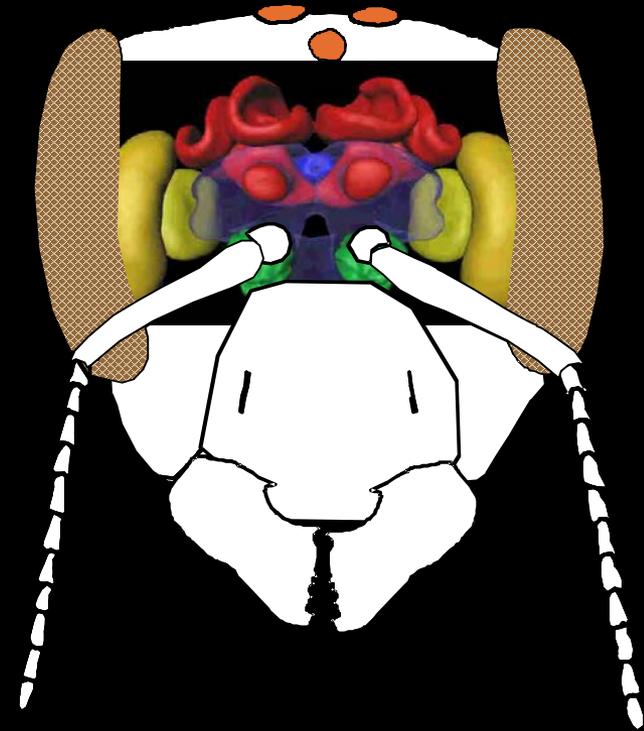
- ❑ La constance florale est basée sur la capacité d'apprendre et mémoriser : en contexte naturel, couleurs, odeurs, formes, etc.
- ❑ Possibilité d'**entraînement** et donc de recherche expérimentale sur l'apprentissage: les abeilles sont **coopératives** tant qu'elles sont récompensées avec du sucre.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



Un spectre de recherche ambitieux

- ❑ 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?**
- ❑ Peut-on trouver des **traitements cognitifs de haut niveau** dans le cerveau d'un insecte?
- ❑ Si oui, quelles modifications cérébrales les permettent-elles?

- ❑ Comment certains traitements **pesticides** affectent-ils ces traitements cérébraux?



Comprendre le potentiel cognitif du mini cerveau de l'abeille

De quoi est-il capable?



**Apprentissage visuel chez des abeilles en libre vol
dans un environnement contrôlé**

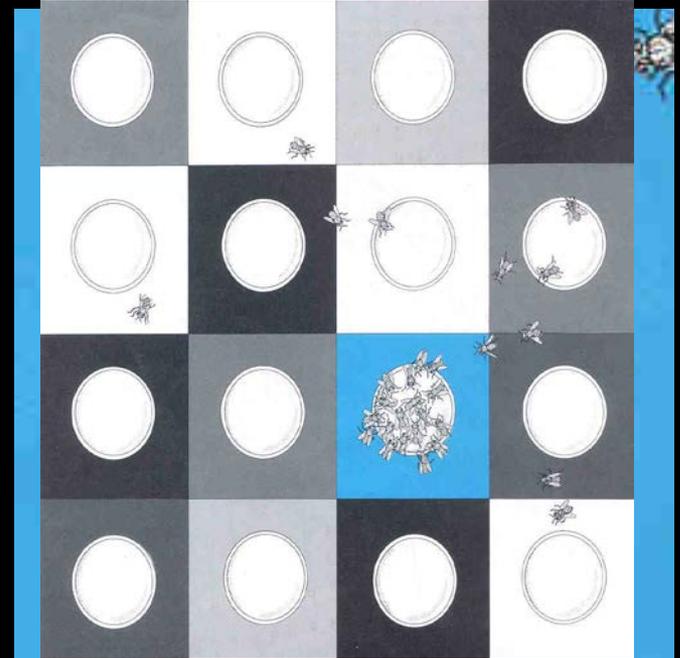
Première demonstration de l'apprentissage visuel chez l'abeille



Karl von Frisch
(Prix Nobel 1973)



Abeille marquée



Entraînement à une couleur
Apprentissage et discrimination
Récompense avec du sucre

=> Association simple 'Couleur – Récompense'

L'apprentissage de concepts



Thomas Zentall

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.

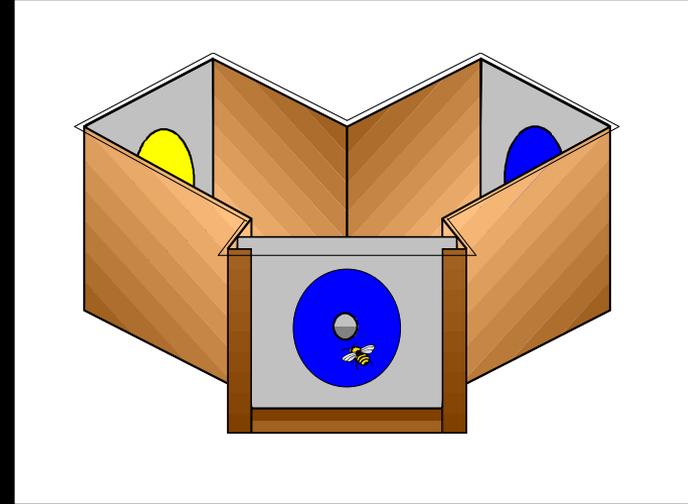
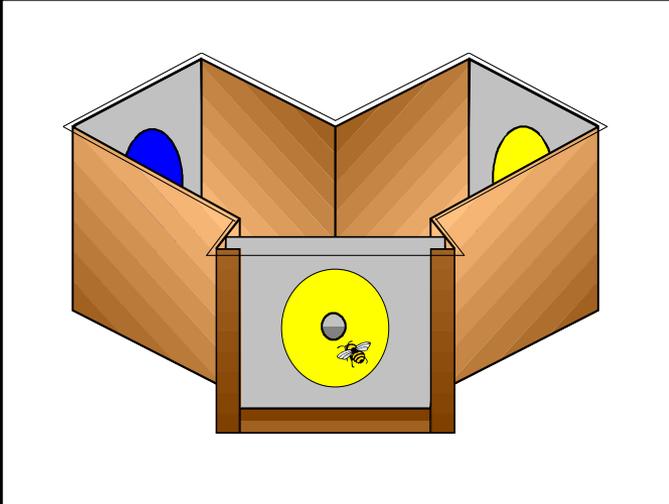
L'Apprentissage de Concepts

- ❑ Les abeilles peuvent-elles apprendre un **'concept d'équivalence'**?



- ❑ De telles capacités les éloigneraient clairement des apprentissages associatifs simples....

L'Apprentissage de Concepts : Entraînement

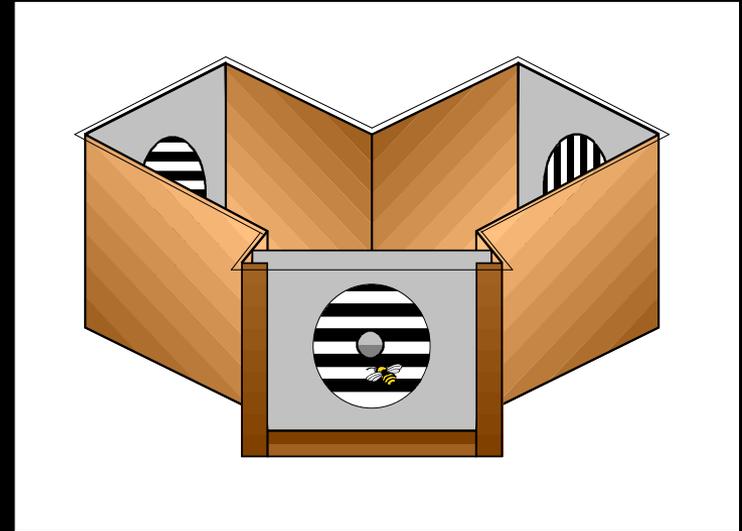
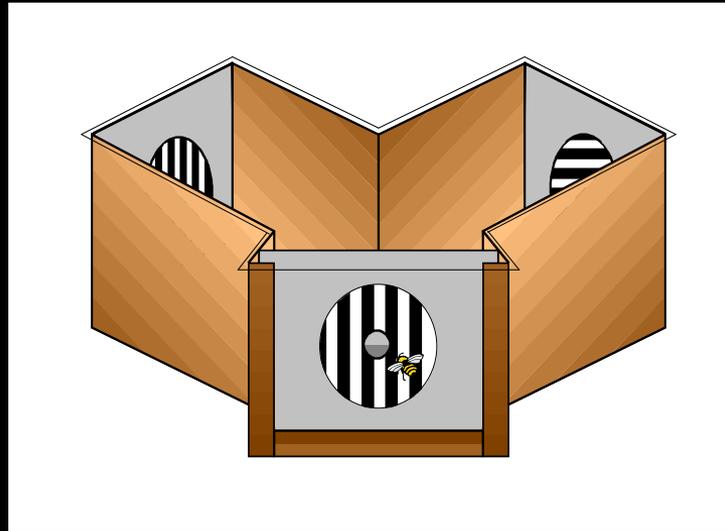


« Choisis jaune à l'intérieur quand l'échantillon d'entrée est jaune, et bleu, quand l'échantillon d'entrée est bleu ».

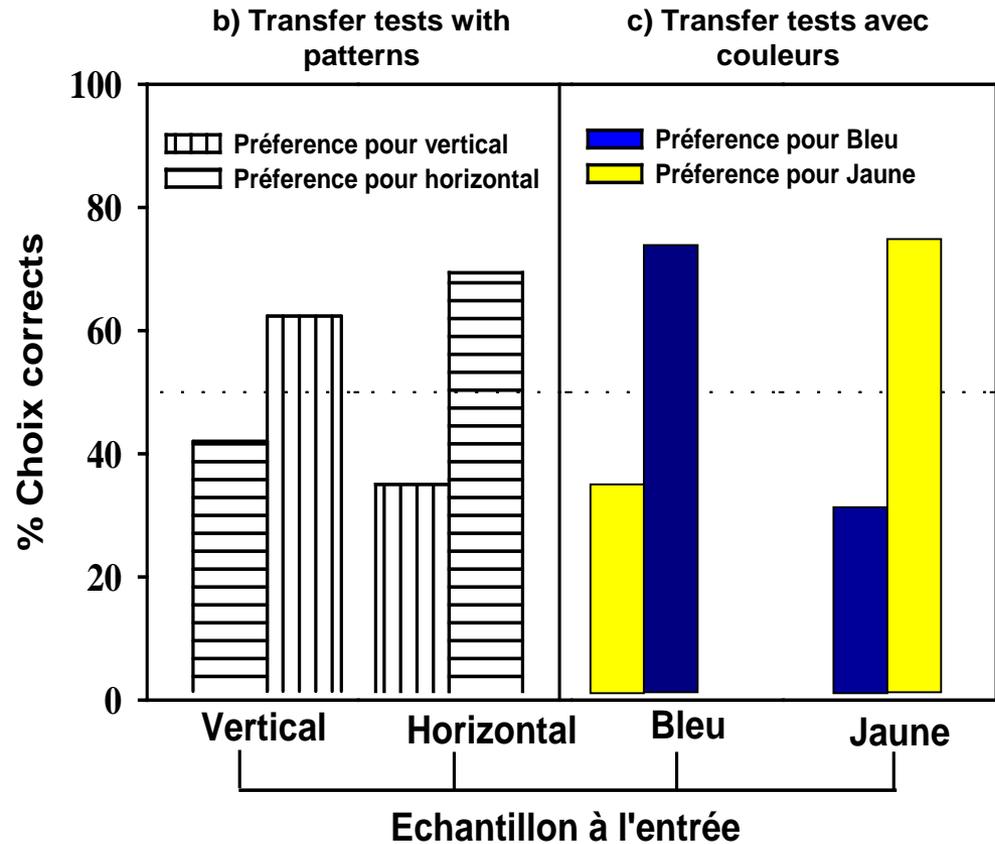
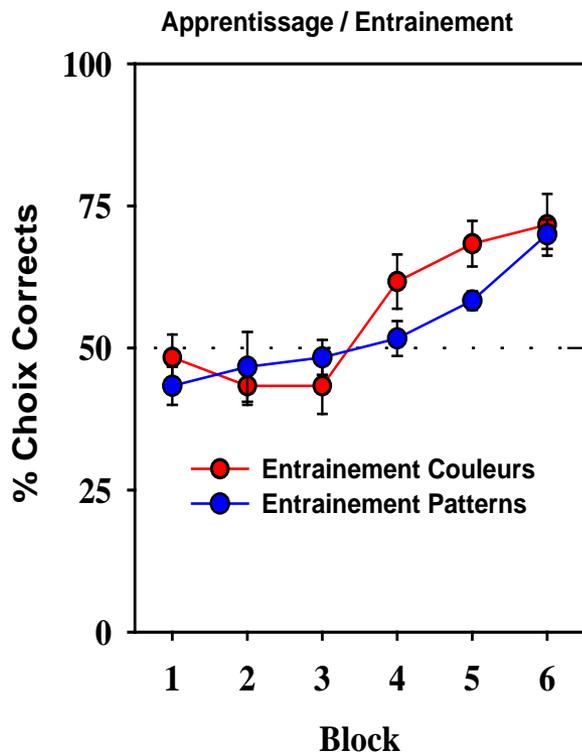
Mais ceci ne suffit pas: un test de transfert est nécessaire afin de prouver que les abeilles emploient une règle abstraite

L'Apprentissage de Concepts Abstraits: Test

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



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



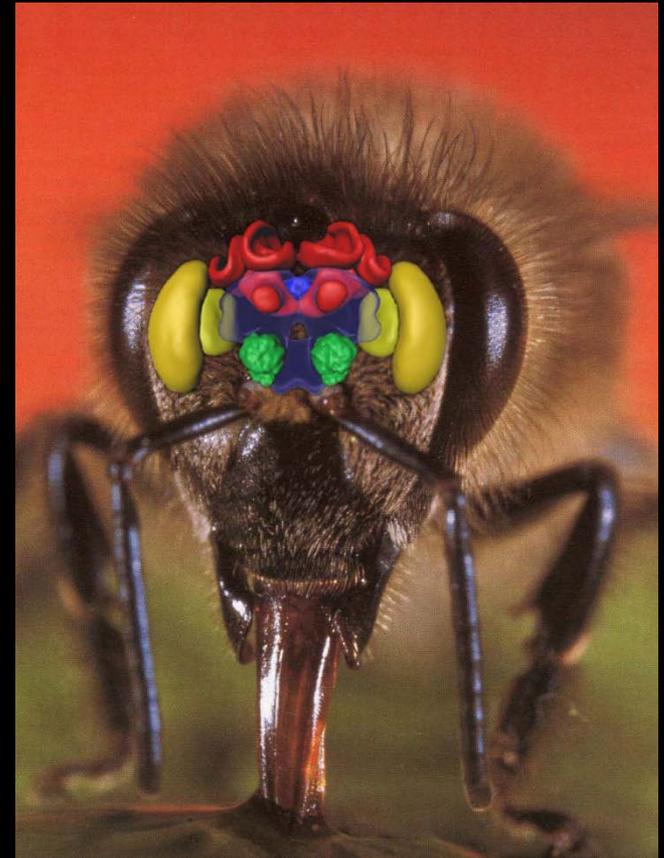
Conclusion

- Les abeilles sont capables de résoudre le problème, indépendamment du type de stimuli employé
- → Elles sont donc capables d'apprendre un concept d'équivalence
- Elles peuvent aussi apprendre à choisir en fonction d'un concept de différence
- Elles sont aussi capables d'apprendre d'autres concepts : 'au dessus de', 'au dessous de', 'à droite de', 'à gauche de', 'plus grand que', etc.

Mais quand il s'agit d'abeilles en libre vol...

La performance est attirante mais elle ne dévoile pas les mécanismes neuraux sous-jacents.

Afin d'accéder à ces mécanismes, **des protocoles contrôlés de laboratoire, avec des abeilles immobilisées** sont nécessaires...



L'étude de l'apprentissage associatif dans le laboratoire

*Protocoles de conditionnement contrôlés chez
l'animal immobilisé*

L'apprentissage et la mémoire olfactive

Le conditionnement olfactif du réflexe d'extension du proboscis

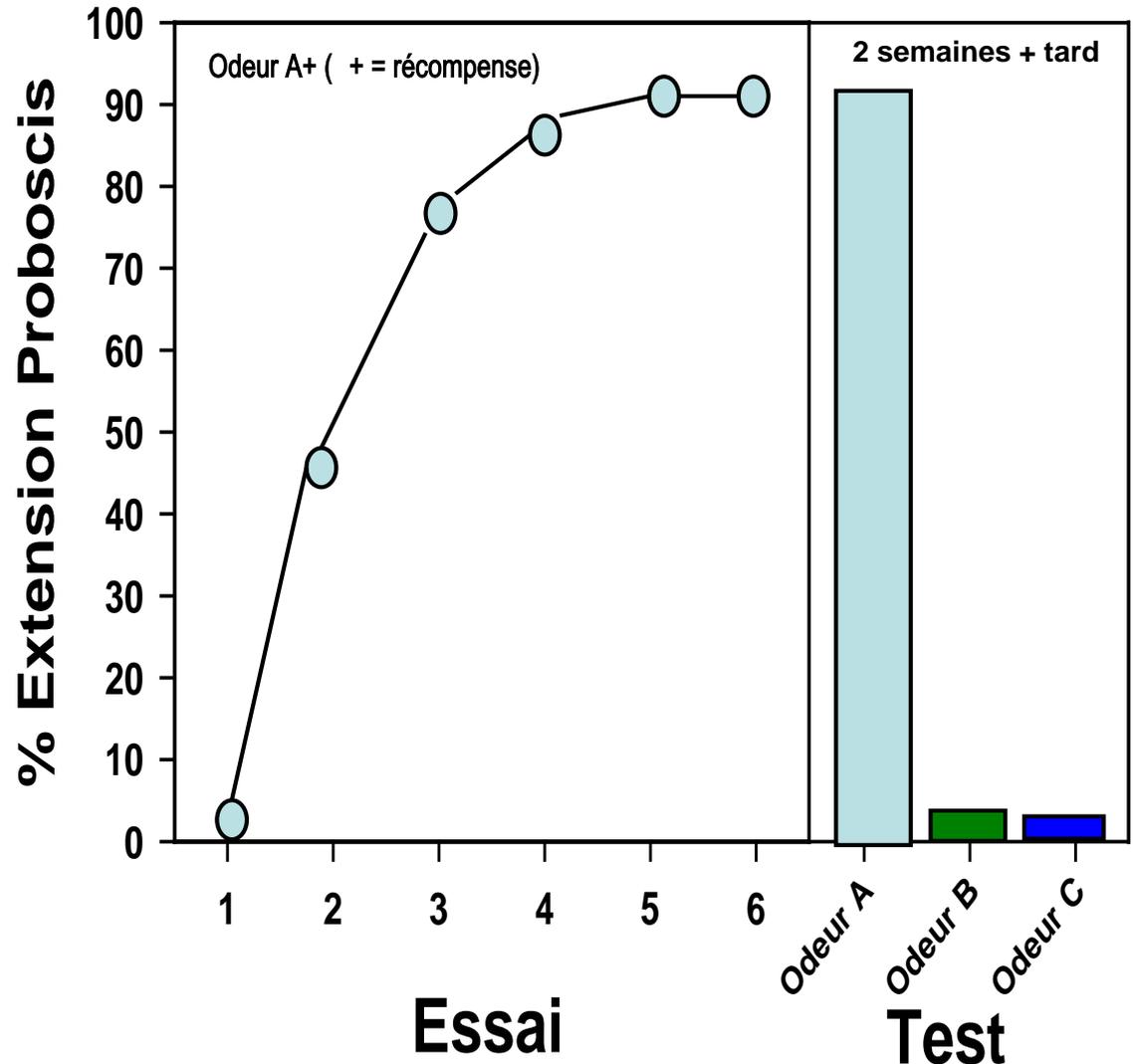
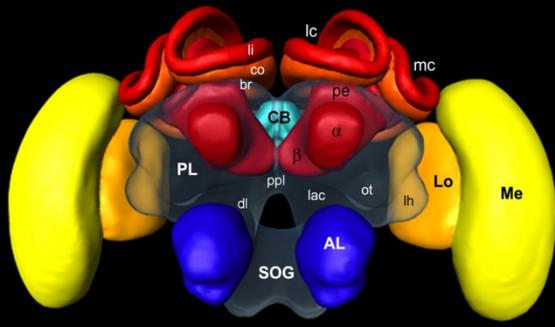


Association 'Odeur (SC) – Récompense de Sucre (SI)'

Les abeilles apprennent rapidement

La mémoire peut durer toute la vie

Accès simultané au cerveau



Les bases neuronales de l'apprentissage : le traitement des odeurs

Corps pédonculés (centres supérieurs)

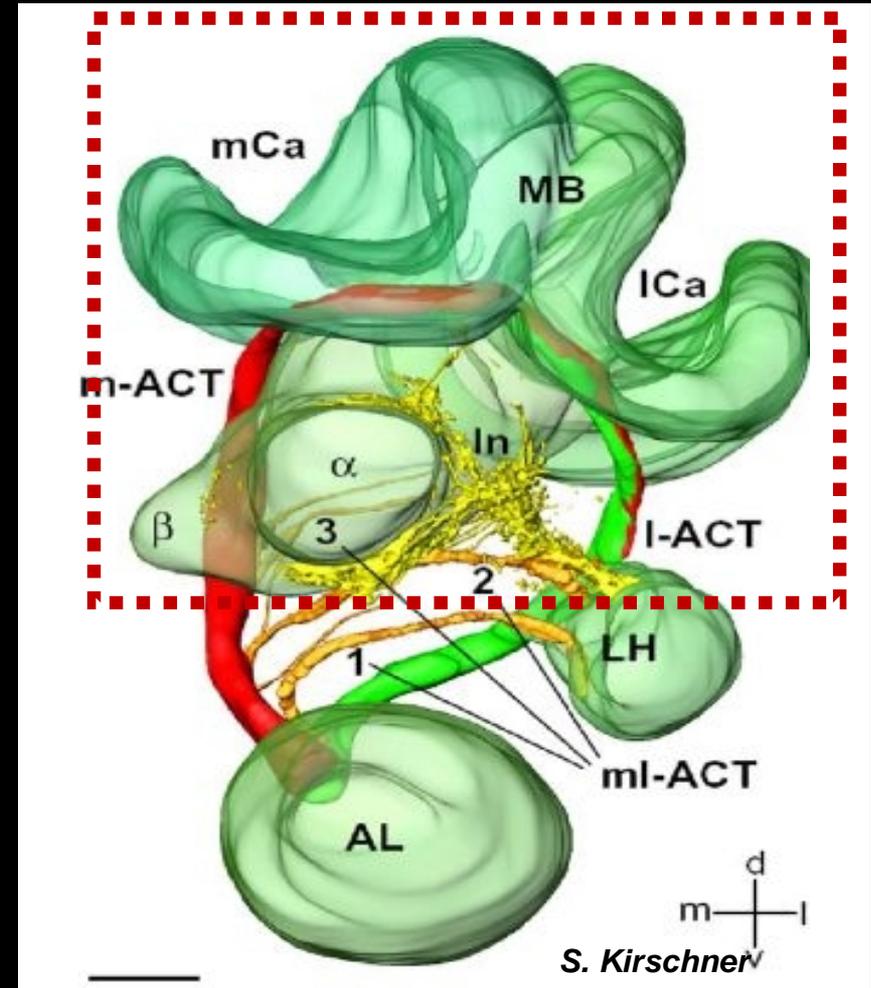
Protocerebrum latéral

Lobe antennaire : 160 glomerules

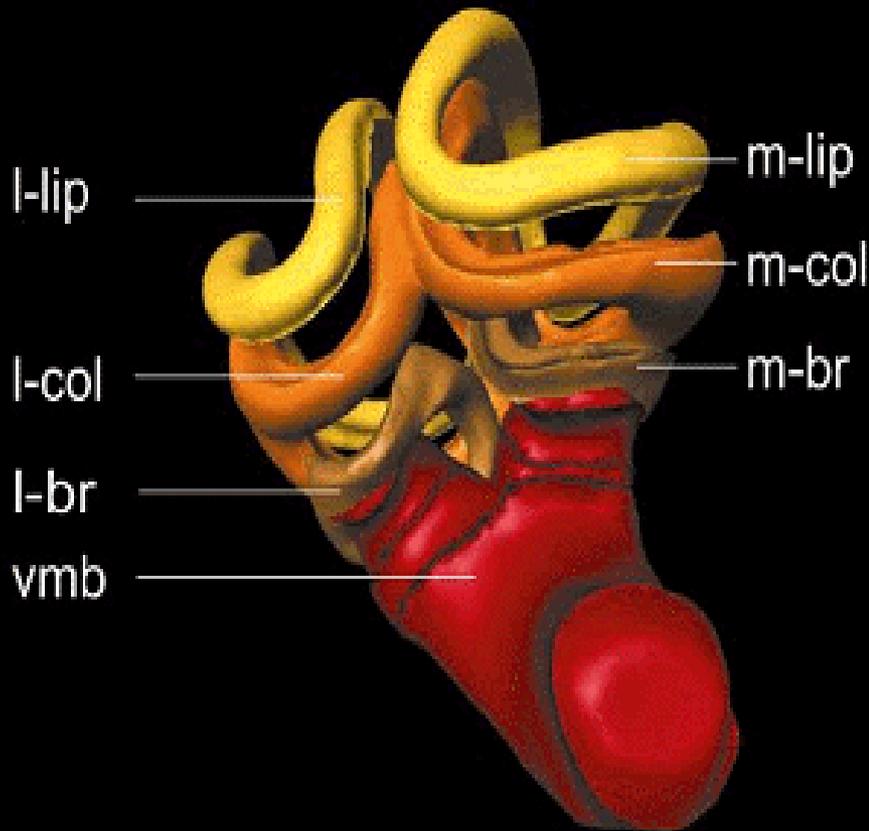
800 neurones de projection

4 000 interneurones locaux

60 000 Récepteurs olfactifs (au niveau
des antennes)



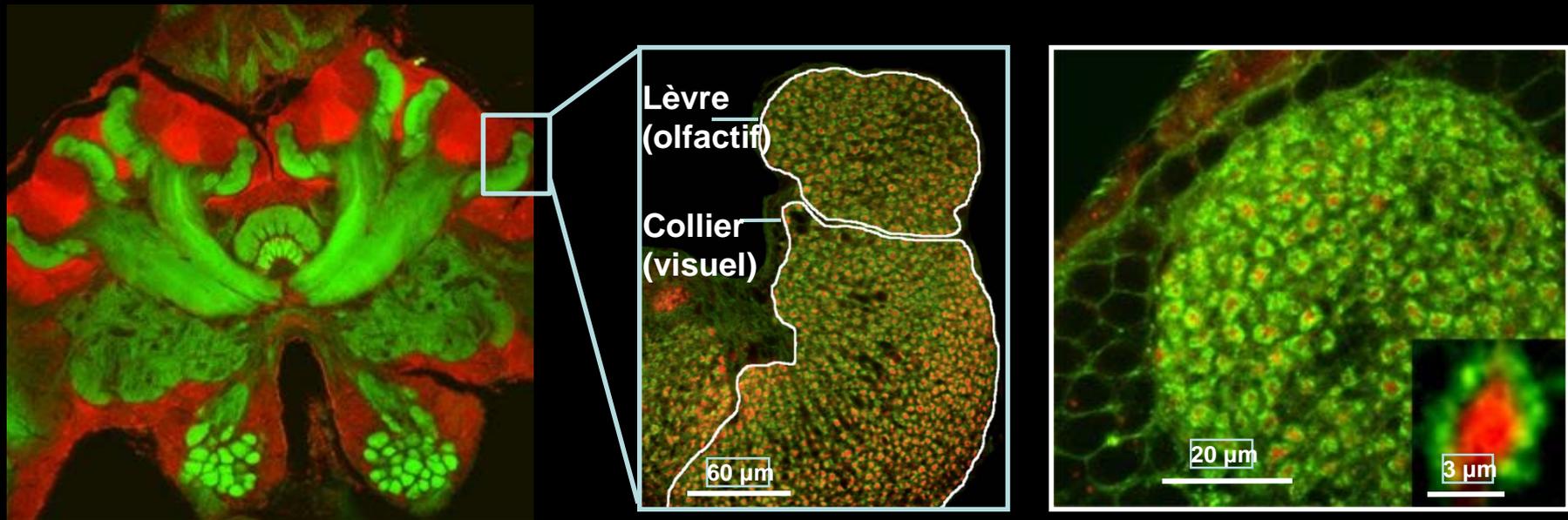
Le cerveau plastique : variations structurales des corps pédonculés lors de la formation des mémoires à long terme



- 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**

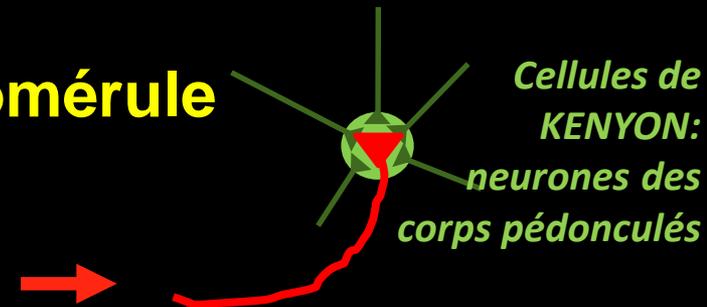
L'organisation cellulaire des corps pédonculés

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



Un microglomérule

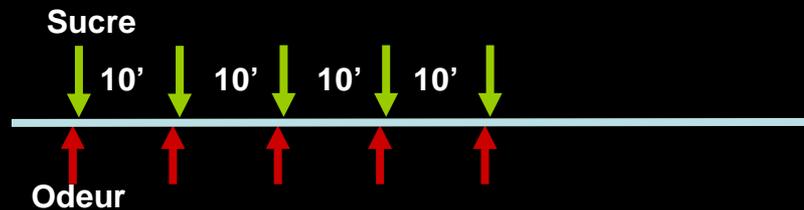
Neurone de projection
(en provenance des aires olfactives du cerveau)



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

Conception de l'Expérience

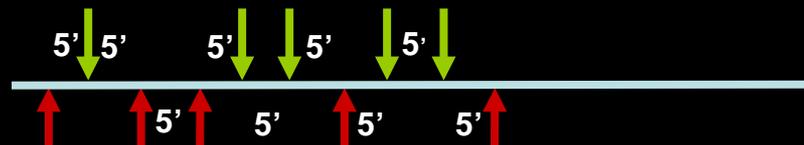
Groupe Apparié (Apprentissage et Mémoire)



3 jours



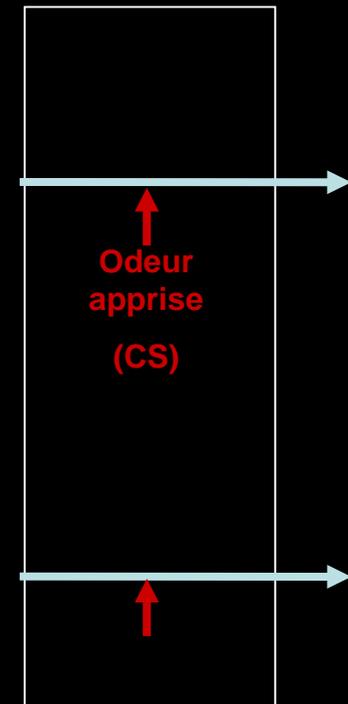
Groupe Non-apparié (Ni apprentissage ni Mémoire)



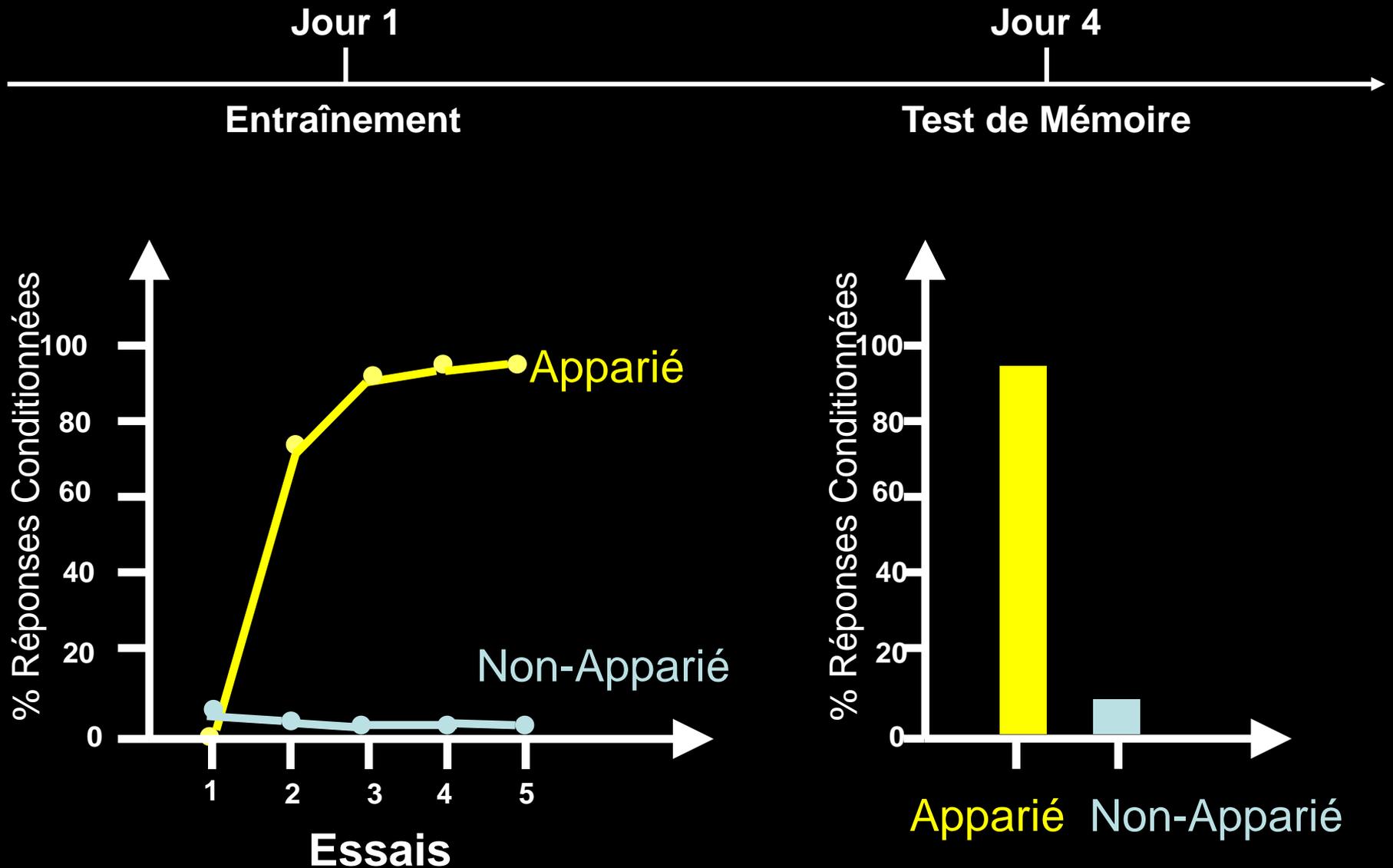
3 jours



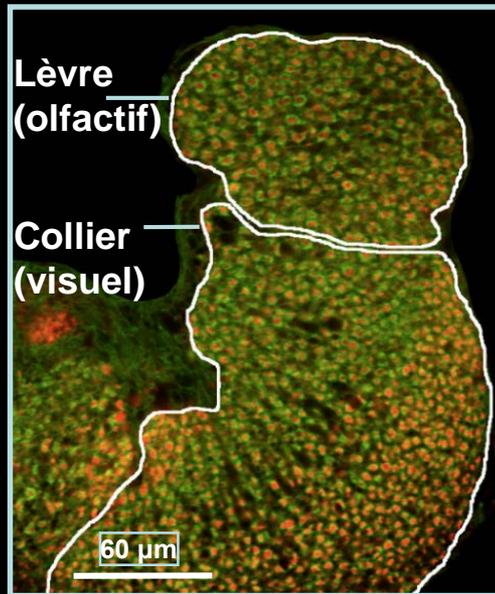
Test de Mémoire (72h)



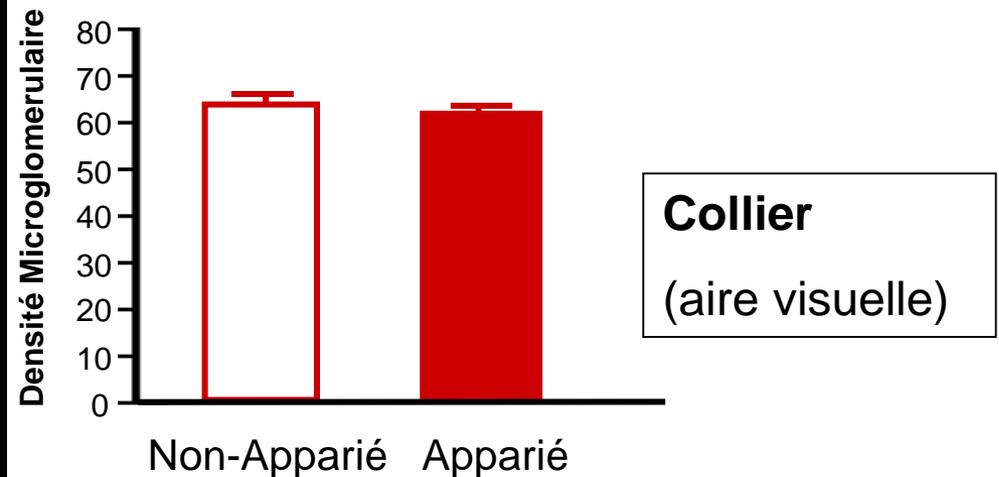
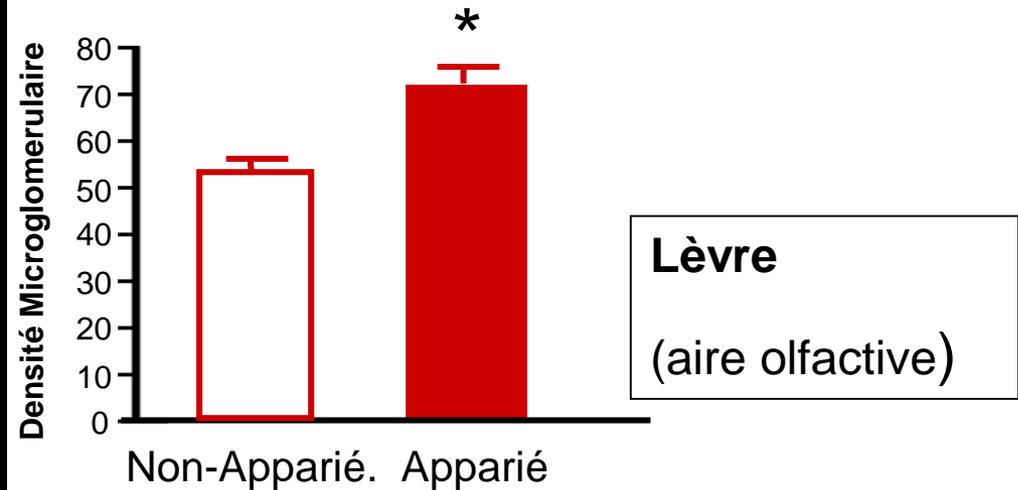
Formation d'une Mémoire Olfactive à Long Terme



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



Hourcade et al J Neurosci 2010



Mécanisme possible:

Formation de nouvelles synapses

Conclusion

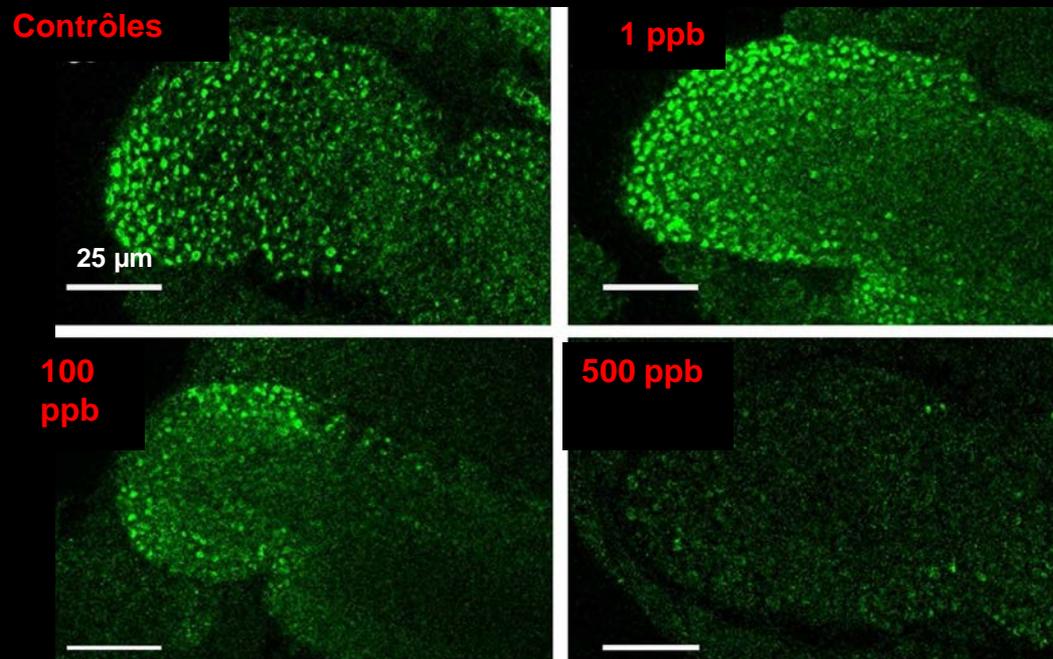
- Le cerveau est **plastique**.
- La région olfactive des corps pédonculés est modifiée suite à la formation d'une mémoire olfactive à long terme ...
- La densité microglomérulaire augmente. De **nouveaux microglomérules apparaissent**.
- Ces structures peuvent donc **stocker la mémoire olfactive**.

L'impact de traitements pesticides

Qu'arrive t-il aux corps pédonculés quand les abeilles sont traitées avec des doses sublétales de pesticides?

Larves de 1 jour, non operculées nourries avec des doses sublétales d'Imidachlopride

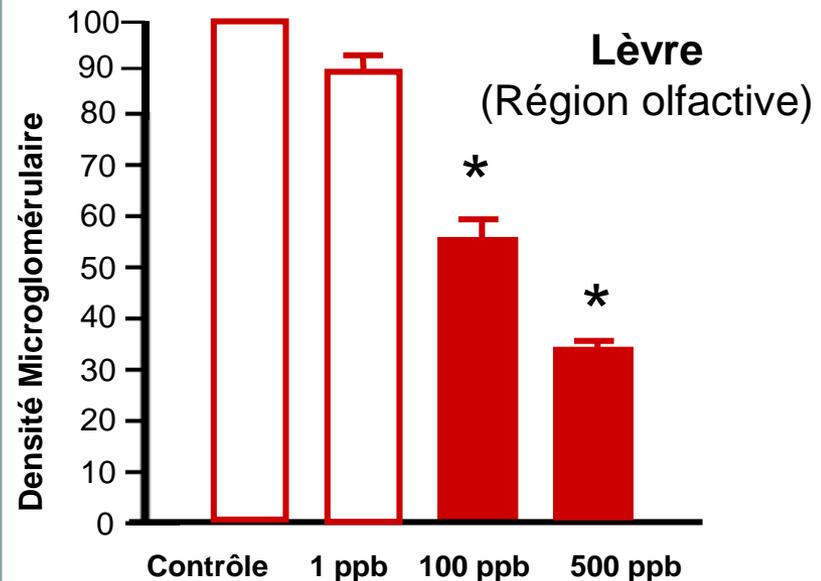
Travaux de Peng & Yang – Sci Reports (2016)
Corps pédonculés analysés à l'âge adulte (abeilles de 20 jours)
→ Analyse Microglomérulaire



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

La quantification des résultats à l'âge adulte (abeilles de 20 jours)

Peng & Yang Sci Reports 2016

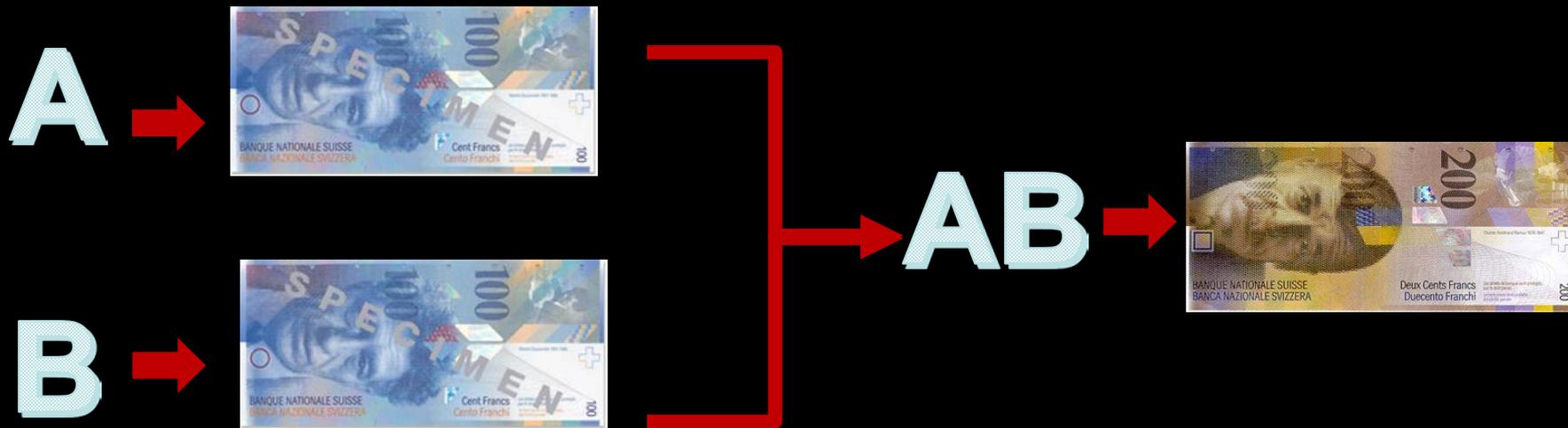


La densité microglomérulaire est réduite chez les abeilles adultes à cause des doses sublétales d'Imidachlopride à l'état larvaire

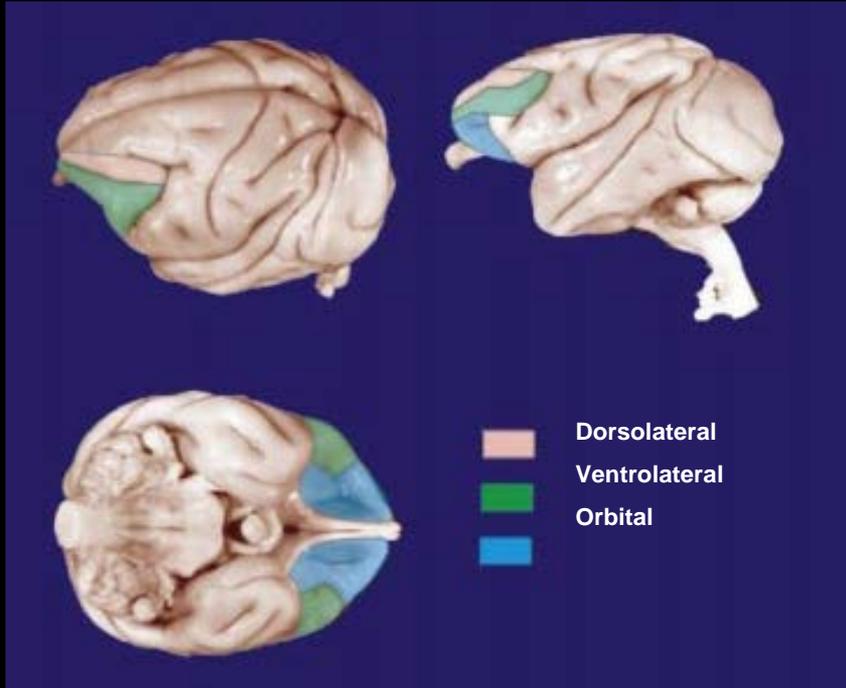
→ **Conséquences dramatiques pour l'apprentissage et la mémoire**

Où réside « l'intelligence » de l'abeille?

La résolution de problèmes non linéaires de haut niveau



Le cerveau humain et les apprentissages de haut niveau



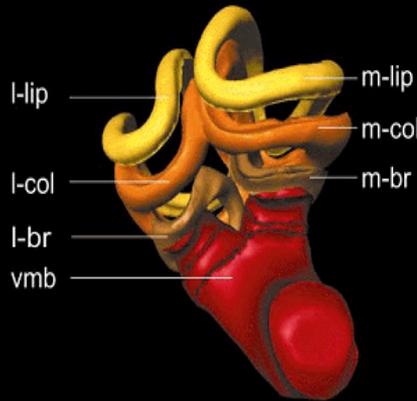
Les bases neurales de plusieurs types d'apprentissage complexe: **le cortex préfrontal (CPF)**

Le CPF intègre différentes régions anatomiques interconnectées avec une grande variété de régions corticales et sous-corticales impliquées dans le traitement *multisensoriel, moteur, émotionnel et de la récompense.*

Les neurones CPF fournissent des informations sur des facteurs internes tels que la motivation et l'**attention**

Association étroite avec *des systèmes de mémoire et de renforcement*

Les corps pédonculés ne se limitent pas à stocker des mémoires



Structures cruciales pour les apprentissages de haut niveau

Une discrimination non linéaire: le patterning négatif

Entraînement

A+, B+ vs. AB-

Une discrimination
ambigüe



Odeur A récompensée

Odeur B récompensée

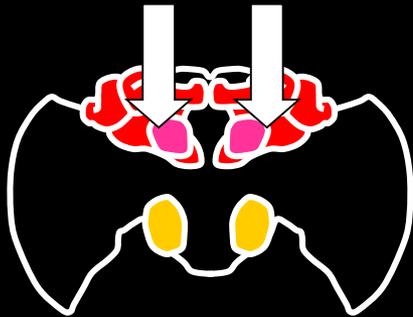
Présentation de AB
non-récompensée

$$AB \neq A + B$$

Le rôle des corps pédonculés dans la résolution de problèmes complexes, non-linéaires

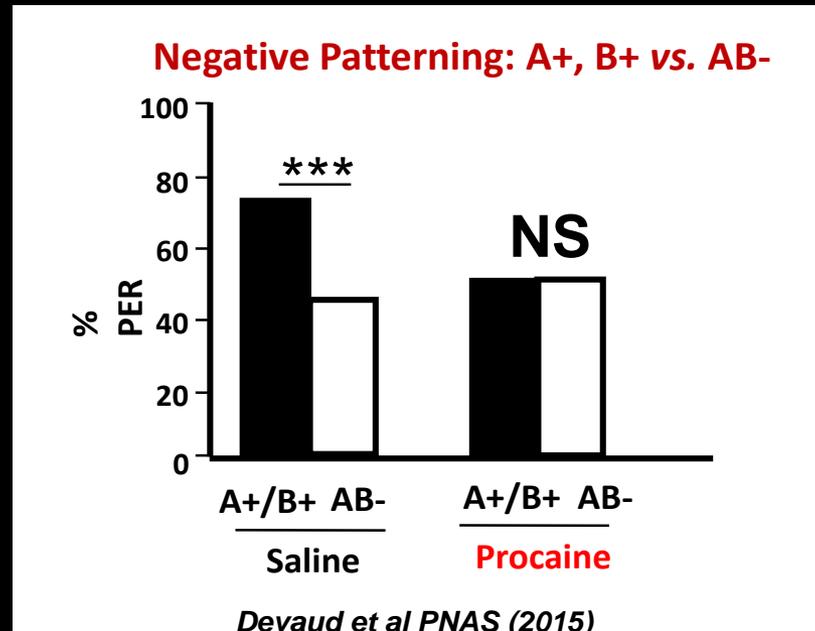
Blocage réversible des corps pédonculés par injection d'anesthésiques locaux

Injection de procaine dans les corps pédonculés



La procaine bloque les courants nerveux des corps pédonculés

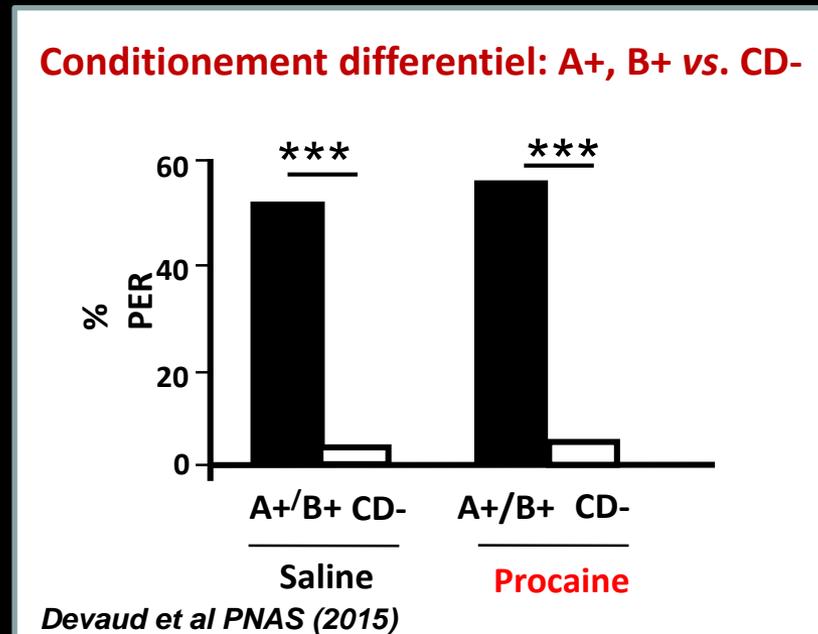
Les abeilles ont besoin des corps pédonculés pour résoudre une discrimination non linéaire



Les abeilles injectées avec de la solution saline apprennent la discrimination.

Les abeilles injectées avec de la procaine sont incapables d'apprendre la discrimination.

Les abeilles n'ont pas besoin des corps pédonculés pour résoudre des problèmes simples



Une expérience contrôle A+B+ / CD-: un problème linéaire simple, sans ambiguïté

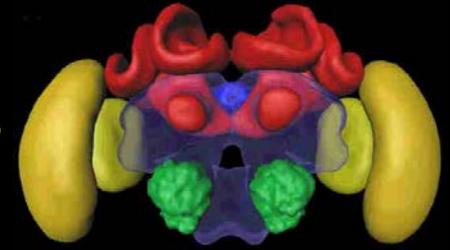
Les abeilles injectées avec de la solution saline maîtrisent la tâche **de même que les abeilles injectées avec de la procaine**

Conclusion

- Les corps pédonculés sont nécessaires pour la résolution de problèmes de haut niveau (ambigus, non-linéaires) mais sont accessoires pour la résolution de tâches simples (linéaires, non ambiguës)
- Hypothèse: **comme chez nous, il existe des structures du cerveau 'dédiées' aux apprentissages de haut niveau et autres intervenant dans des apprentissages simples**



Conclusions Générales

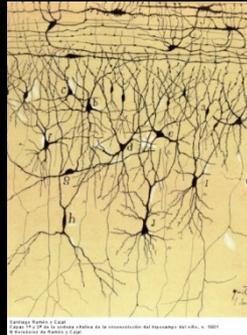


- Le cerveau d'une abeille consiste d'un réseau de neurones et structures neurales identifiables, capables de produire des comportements stéréotypés mais aussi des comportements plastiques allant **au-delà de l'apprentissage élémentaire**.
- Apprentissages visuels en libre vol: **apprentissage de concepts**
- Apprentissages olfactifs **non-linéaires**
- Un cerveau qui apprend et qui mémorise. **Un cerveau plastique**
- Un cerveau performant qui permet de comprendre des mécanismes de base de certains processus cognitifs
- Et qui mérite respect....**ET PROTECTION**

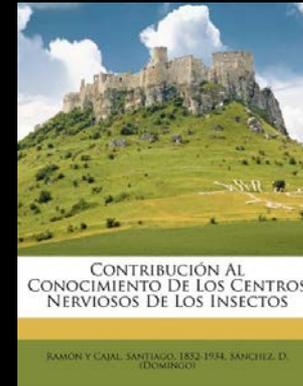
Le partage d'une fascination...



Santiago Ramón y Cajal (1852 – 1934)
1906 Prix Nobel de
Physiologie et
Medicine



Decouverte de
l'existence
des neurones



Contribution à la
Connaissance des Centres
Nerveux des Insectes
(1915, 2010)

“Les insectes possèdent un système nerveux qui est incroyablement complexe et différencié, et dont la sophistication atteint des niveaux ultra microscopiques ... Certainement, la substance grise [du cerveau des vertébrés] a augmenté considérablement en termes de masse, mais quand on compare sa structure avec celle du cerveau des Apidae (abeilles) ou des Libellulidae (libellules), elle apparaît comme excessivement grossière et rudimentaire. C'est comme si on prétendait comparer le mérite limité d'une grosse horloge de parquet avec celui d'une horloge de poche, une merveille de délicatesse et précision. Comme d'habitude, le génie de la vie brille plus dans la construction du plus petit que dans la production de grandes pièces”



Ramón y Cajal (1915)

The Bee Team...

