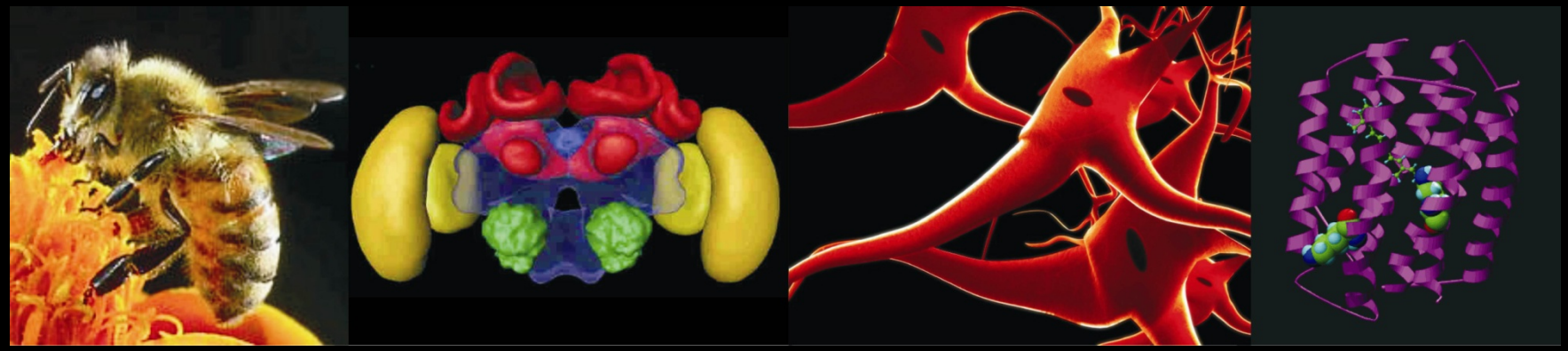
Dans le cerveau des abeilles: nouvelles découvertes, nouveaux émerveillements



Martin Giurfa

UNIVERSITE TOULOUSE III PAUL SABATIER
Université de Toulouse
Faculté des Sciences et d'Ingénierie

Centre de Recherches sur la Cognition Animale

Toulouse, France

http://cognition.ups-tlse.fr

Deux Cerveaux en Vue Frontale

Le cerveau humain

1350 cm^3

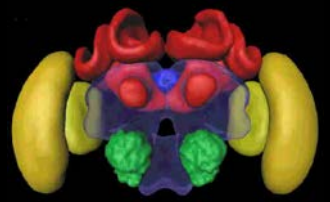
90~100 milliards de neurones



Le cerveau de l’abeille

1 mm^3

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.



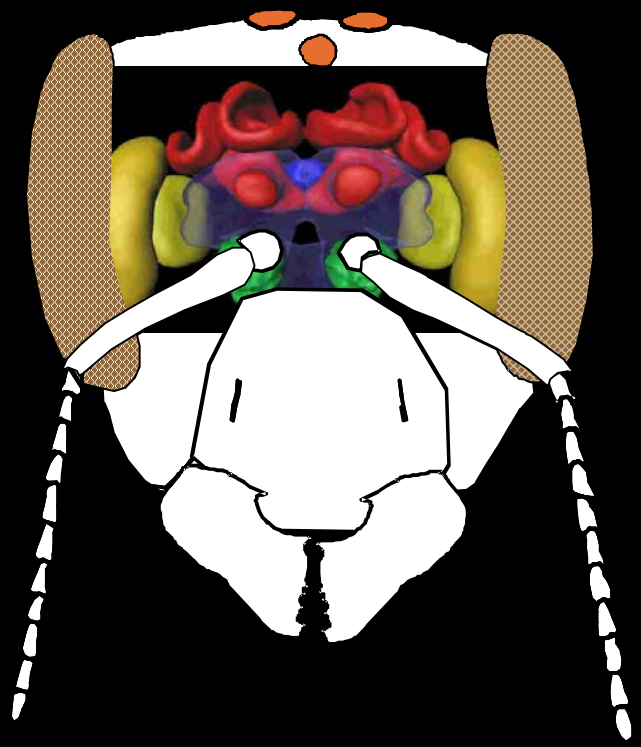
- Possibilité d'**entraînement** et donc de recherche expérimentale sur l'apprentissage: les abeilles sont **coopératives** tant qu'elles sont récompensées avec du sucre.

- ***Des méthodes invasives disponibles pour accéder au cerveau, un génome entièrement séquencé.***

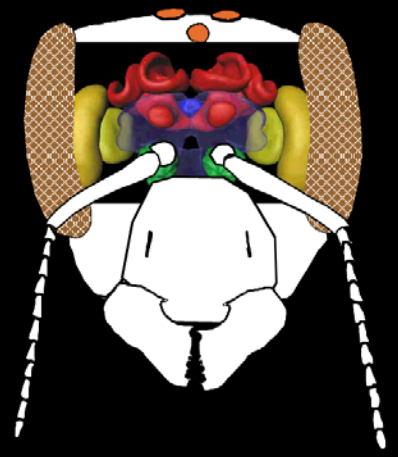
- Un système nerveux relativement 'simple' ***:*** 950 000 neurones au lieu de 100 milliards…

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? La motivation affecte t-elle la mémoire?
- 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 évènements 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.***

L'Apprentissage de Concepts

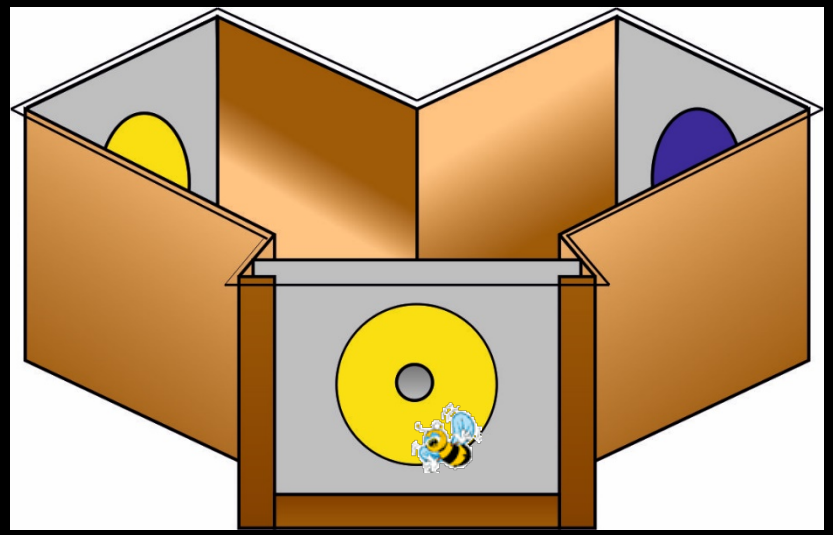
- Les abeilles peuvent-elles apprendre un '**concept d'équivalence**'?

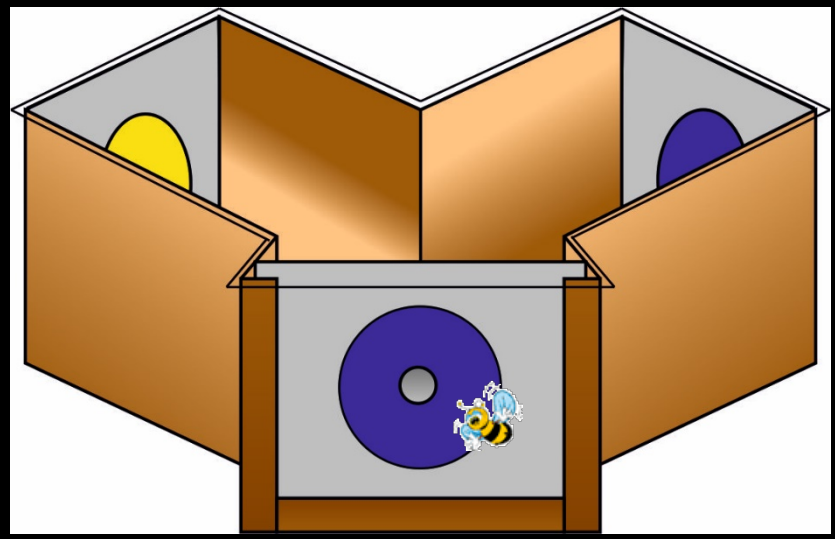


- De telles capacités les éloigneraient clairement des apprentissages associatifs simples….

Entrainement

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



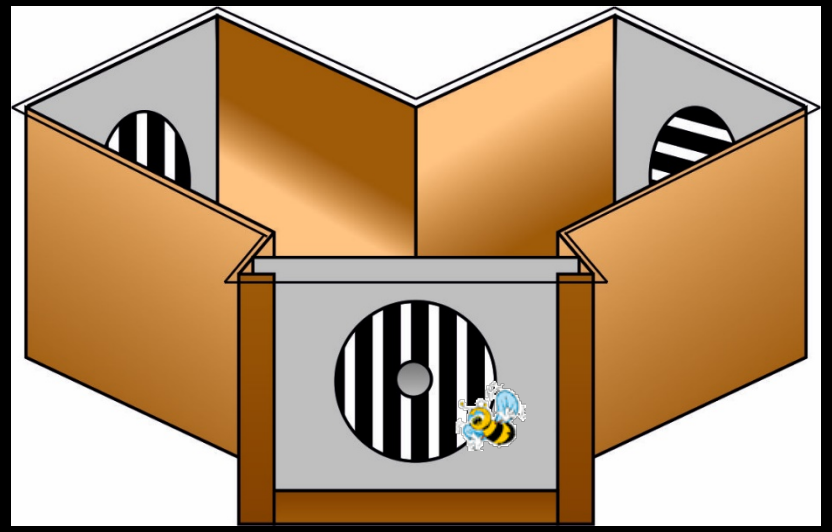


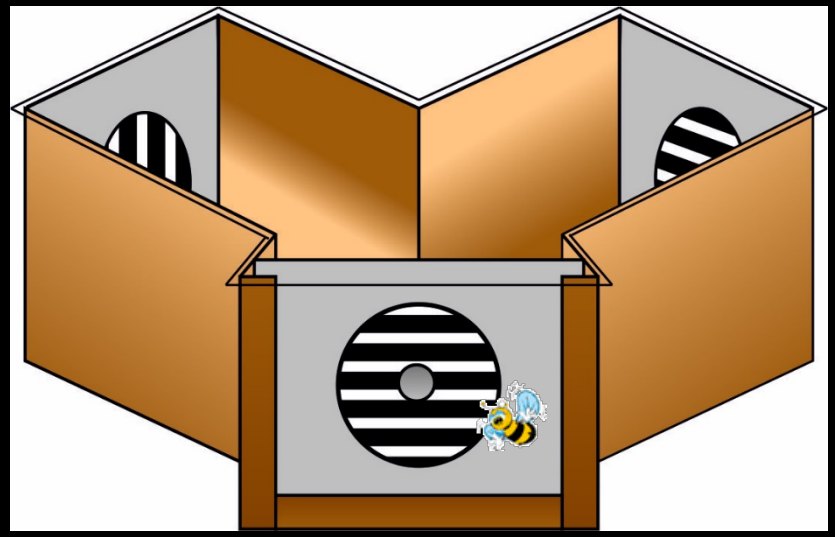
Mais ceci ne suffit pas: un test de transfert est nécessaire afin de prouver que les abeilles emploient une règle abstraite

Giurfa et al (2001) Nature

Test

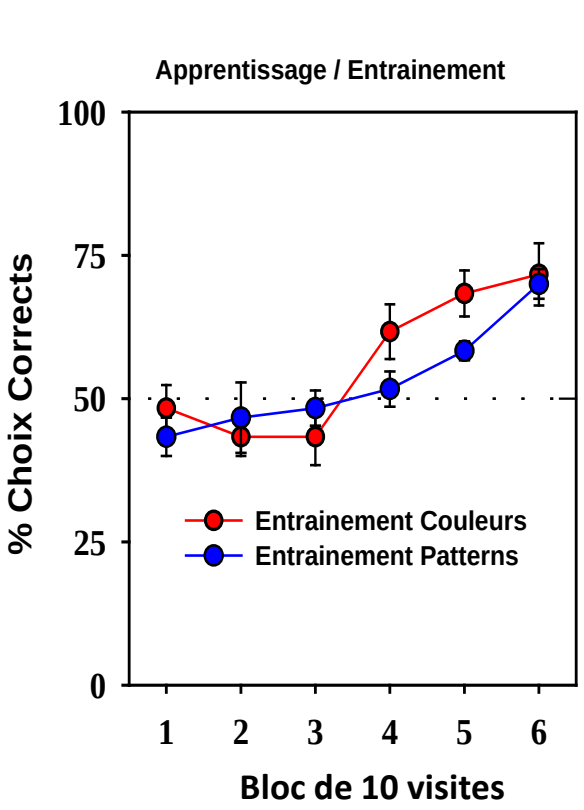
Les abeilles sont confrontées à des stimuli nouveaux qu'elles n'ont jamais vu auparavant

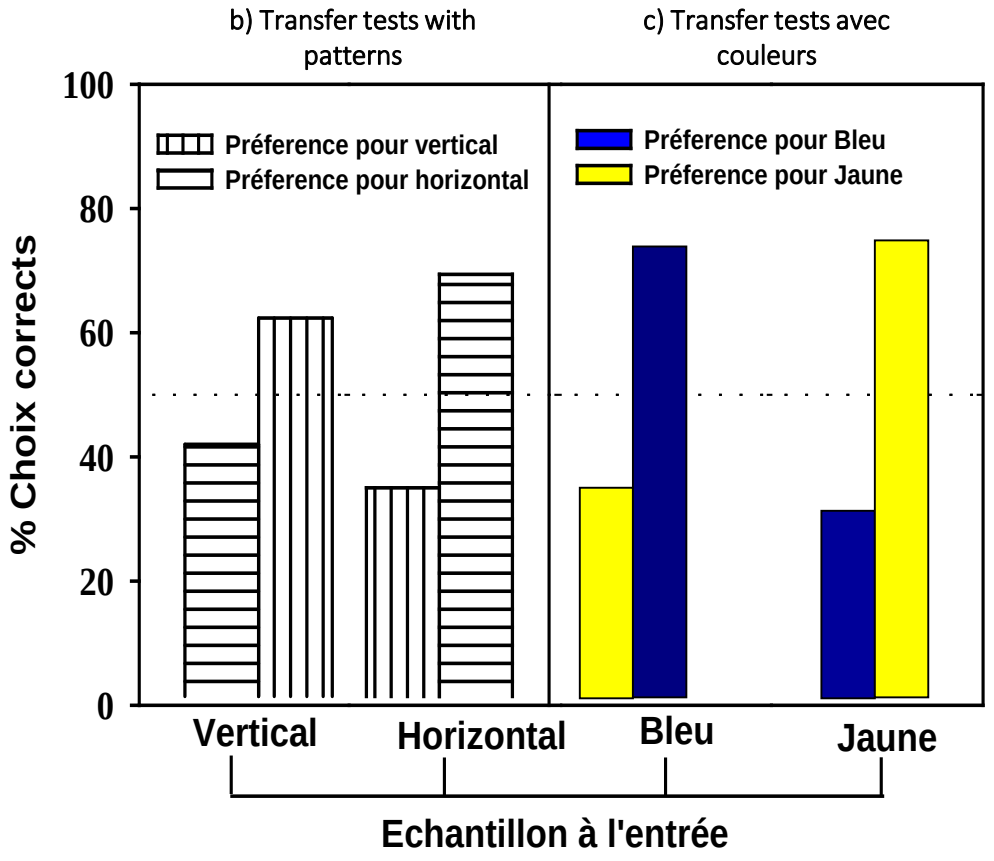




Giurfa et al (2001) Nature

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





Giurfa, Zhang, Jennett, Menzel, and Srinivasan (2001) Nature 410:930-933

I. Conclusions

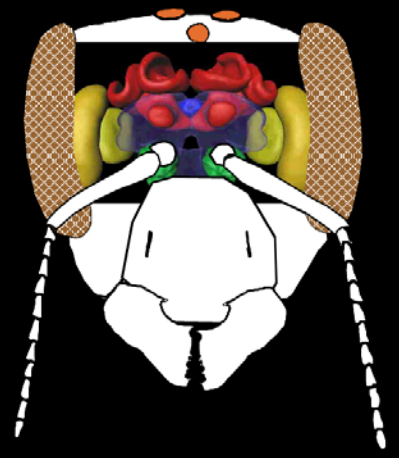


- Les abeilles sont capables de résoudre le problème, indépendamment du type de stimuli employé. Elles sont donc capables d'apprendre un concept d'équivalence.
- Transfert entre couleurs et motifs blancs et noirs, mais aussi entre couleurs et odeurs.
- Les abeilles peuvent aussi apprendre à choisir en 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 petit que', etc.

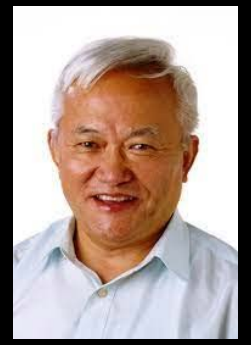


Avarguès-Weber et al. (2012) PNAS

II. Les nombres et leur représentation dans l’espace : la ligne mentale numérique

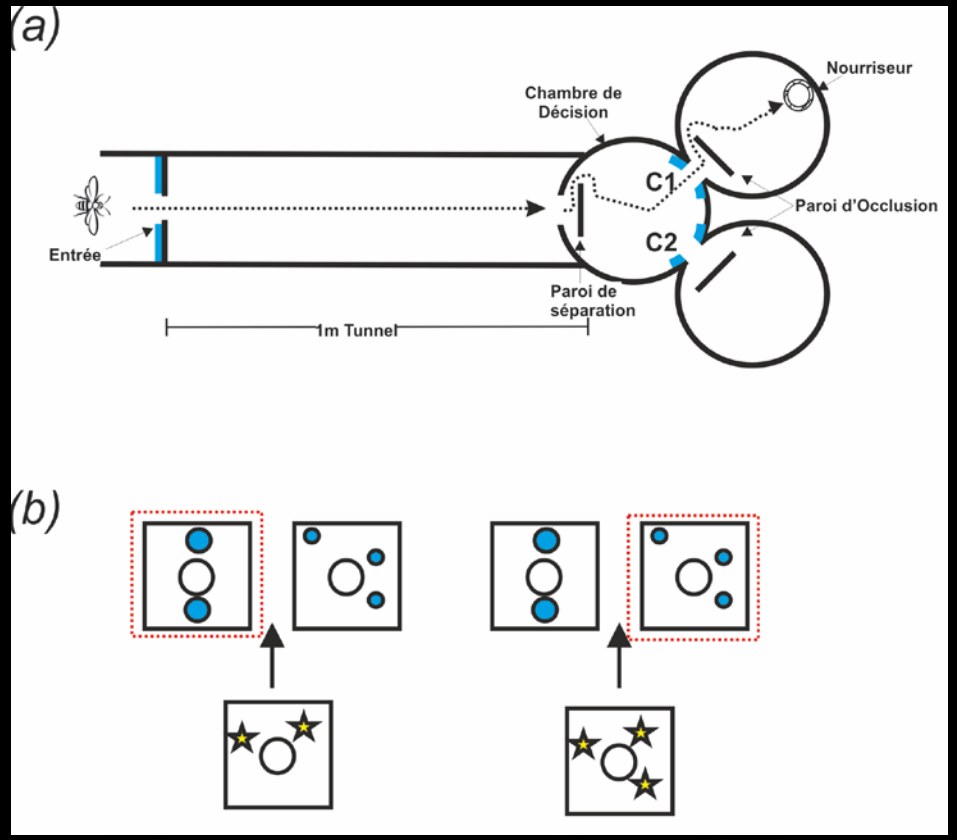


Les abeilles ont aussi des concepts numériques



Shaowu Zhang

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



- 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.

Giurfa, Trends Cogn Sci 2019

Gross et al, PLoS One 2009



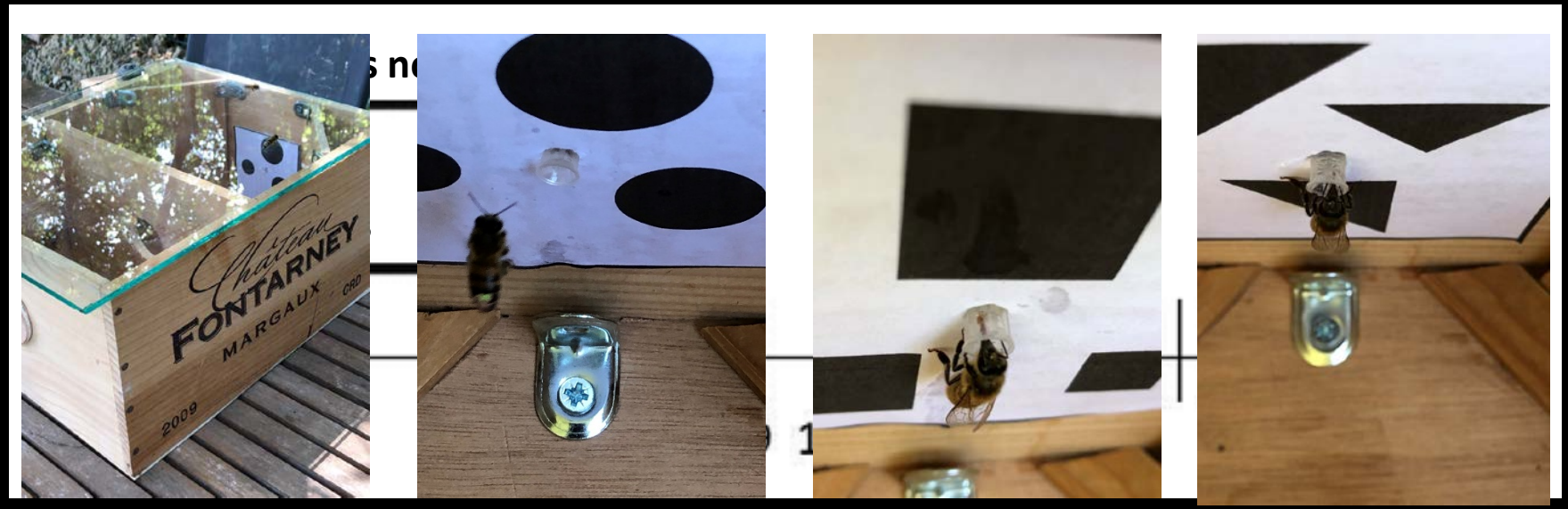
Rosa Rugani

Ma question pendant les confinements COVID (et plus tard): Les abeilles ont-elles une ligne mentale numérique?

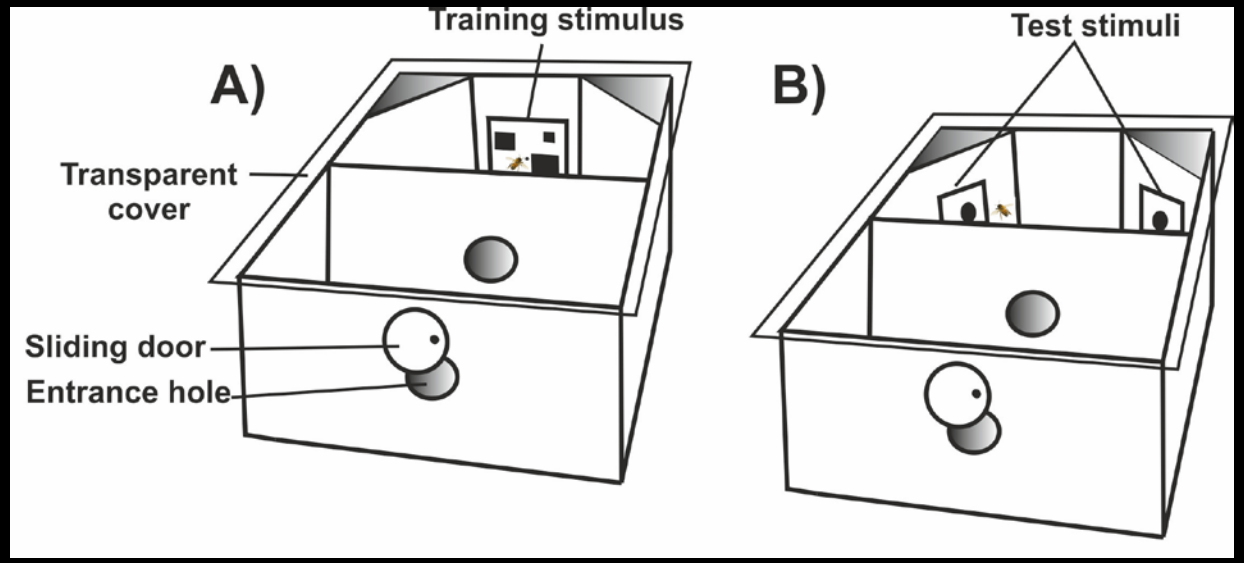


Catherine Thevenot

- 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?



La caisse à vins transformée en dispositif expérimental



- Entraînement à un nombre donné (les images changent, le nombre reste fixe) présenté en position centrale. *P. ex. entrainement 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.*



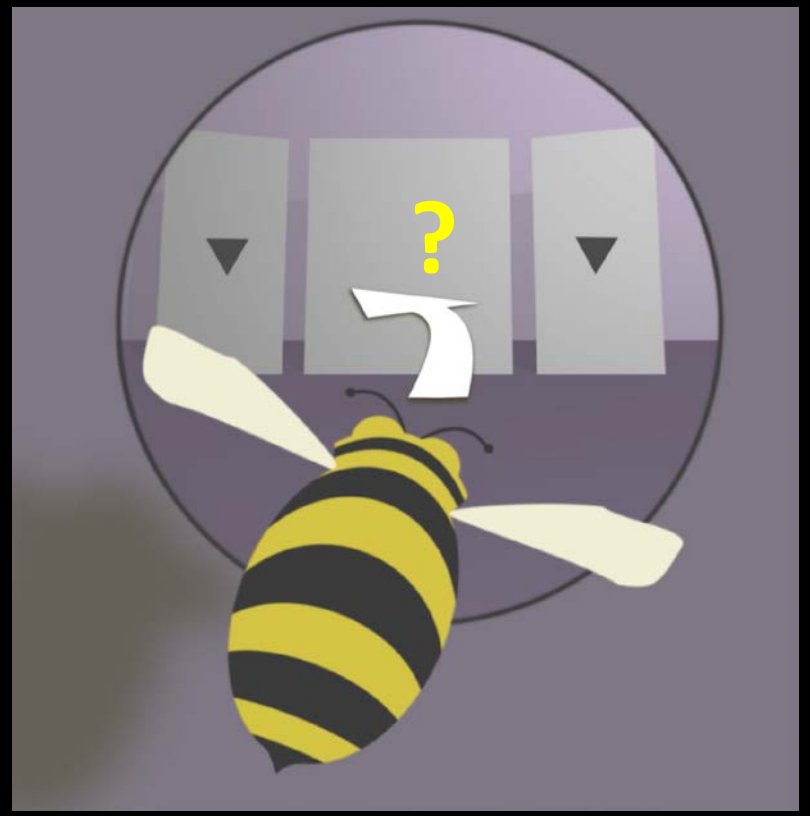
Questions

- ❑ **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?**

Giurfa et al (2022) PNAS

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

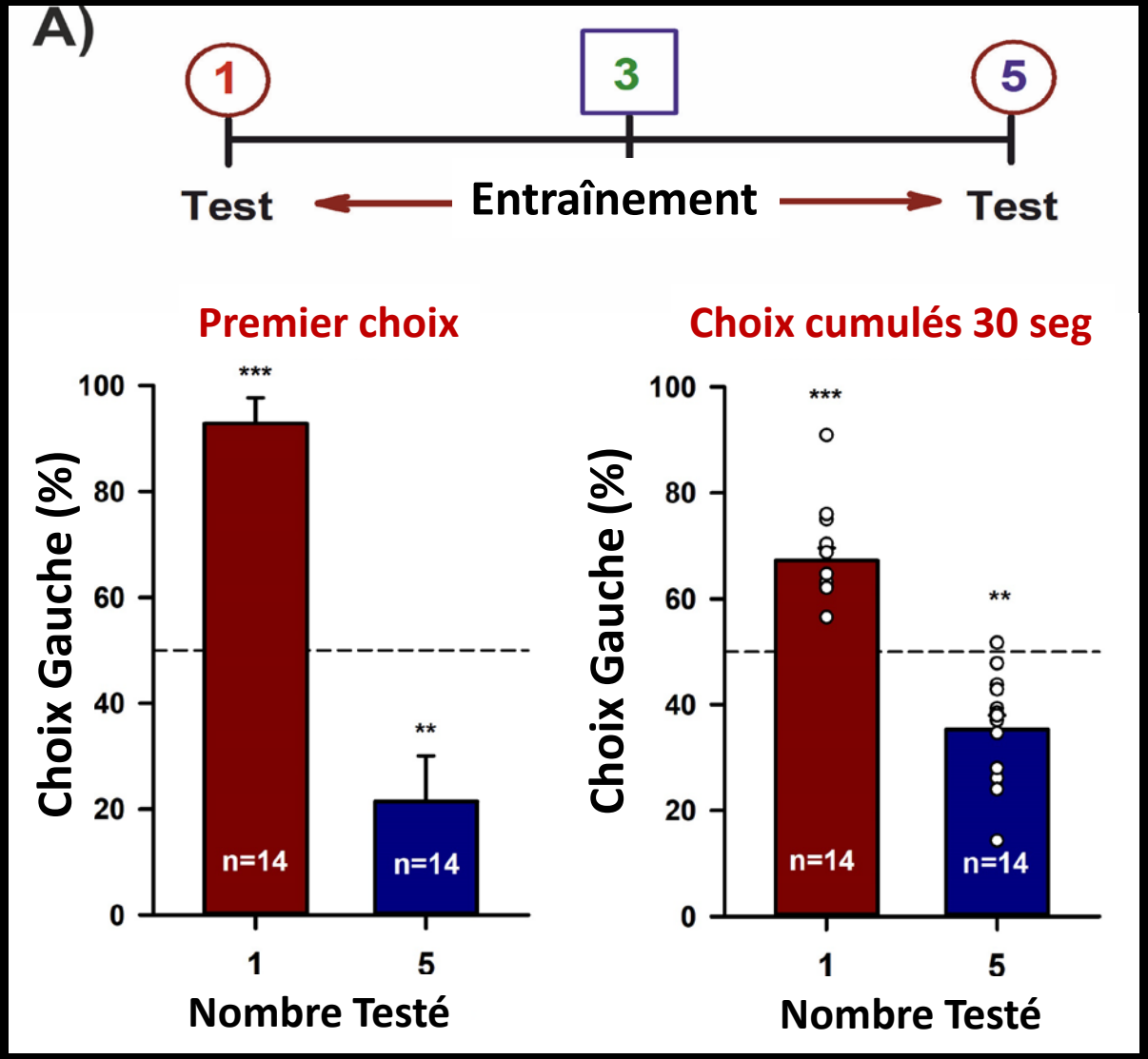


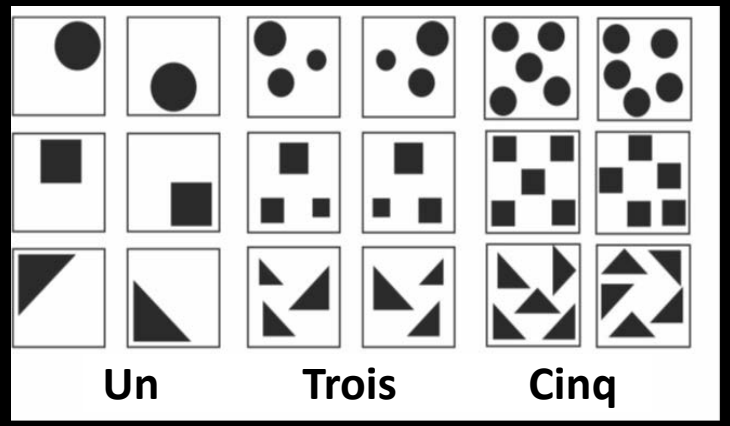




Giurfa et al (2022) PNAS

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

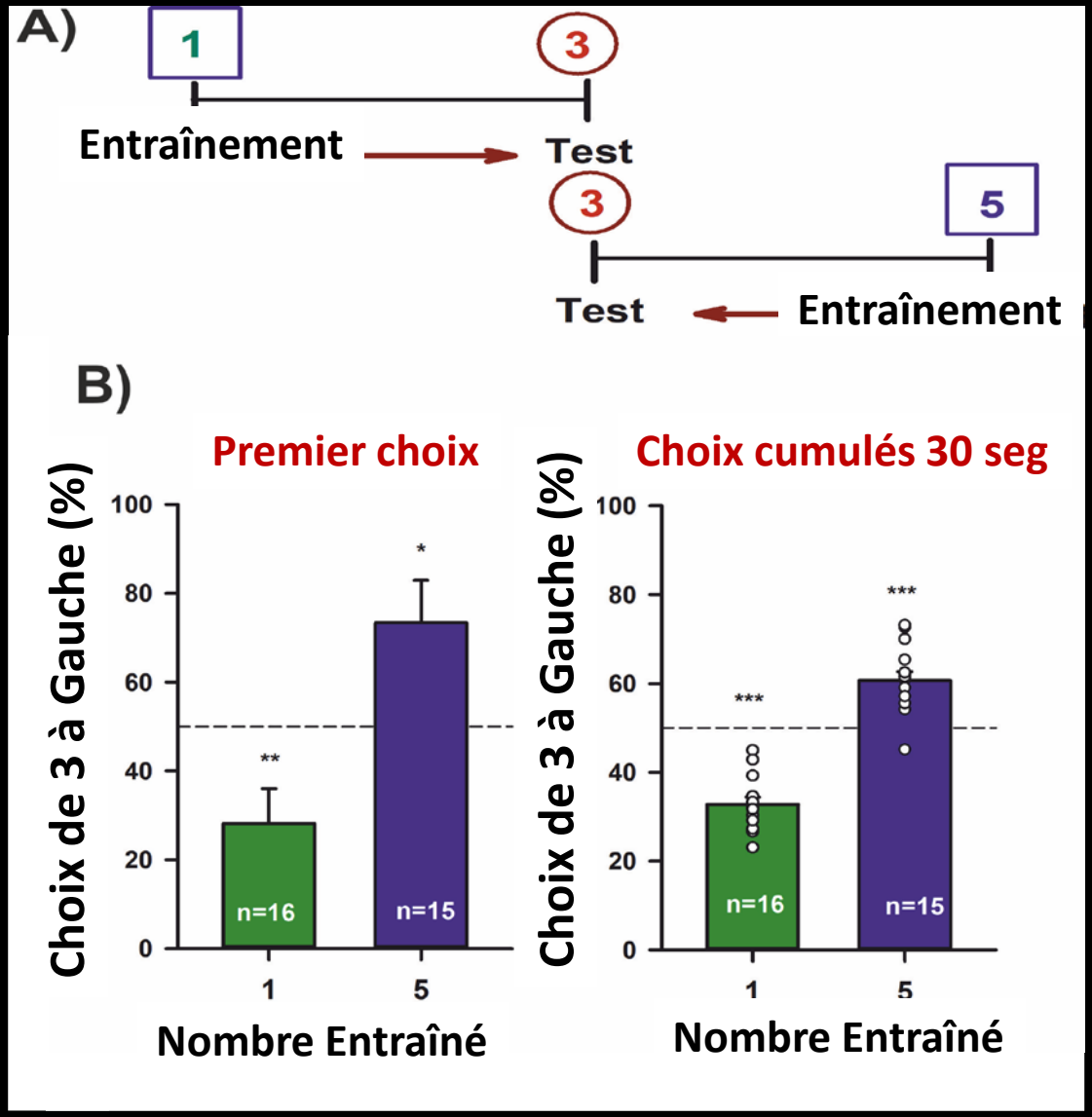




Les abeilles entraînées à 3 ont **préféré 1 à gauche** et **5 à droite** par rapport à leur numéro de référence (3).

Giurfa et al (2022) PNAS

Changement du nombre de réference



- 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.

Giurfa et al (2022) PNAS

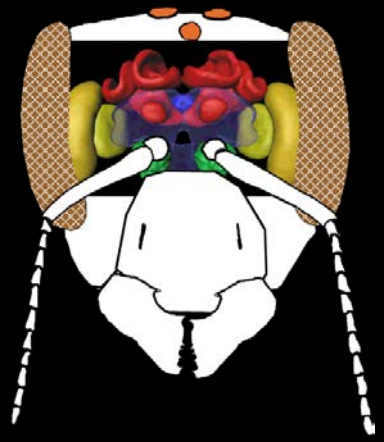
II. Conclusions: une ligne mentale numérique chez les abeilles

- 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. Motivation 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.

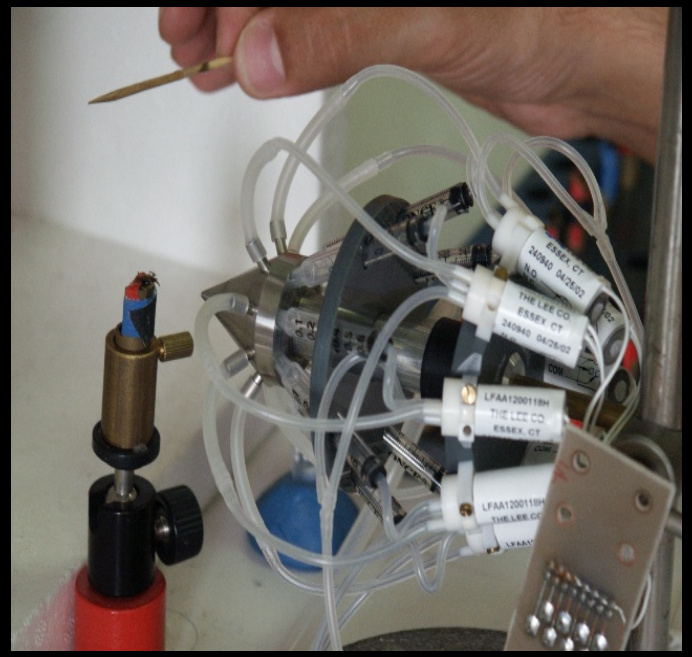
Cette information est cruciale pour reconnaître les fleurs exploitées et assurer ainsi la constance florale.



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

Les abeilles immobilisées apprennent à associer une odeur au sucre





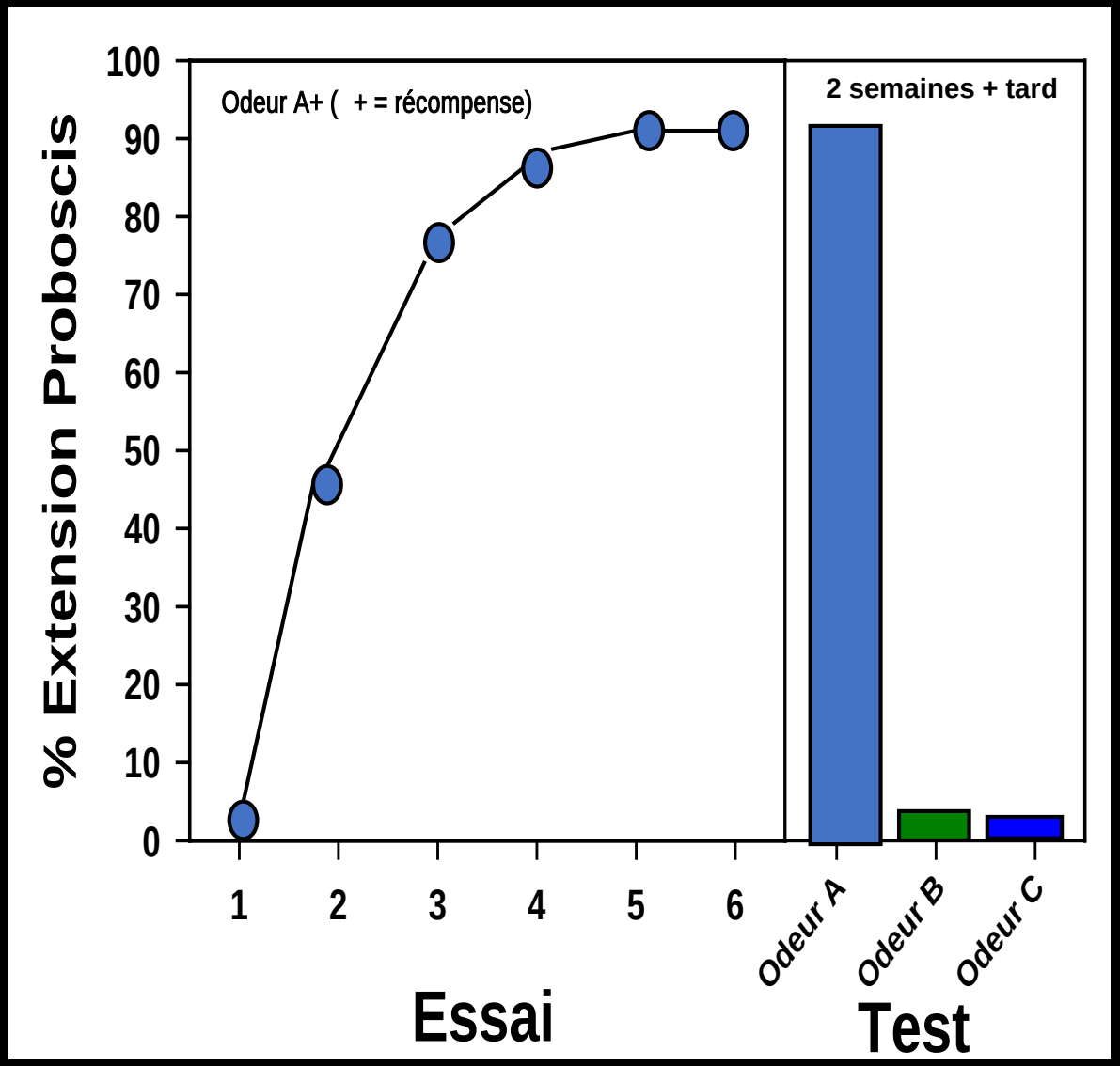


Association Odeur – Saccharose

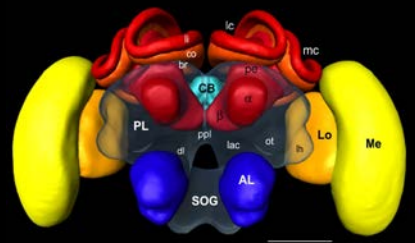
L'odeur doit précéder le saccharose pour que l'apprentissage se produise

Apprentissage rapide en peu d'essais

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



+ accès au cerveau....



La répétition est importante

1 essai : juste des mémoires à court et moyen terme

Od. / Suc. → MCT, MMT

3 essais : mémoires à court, moyen et long terme

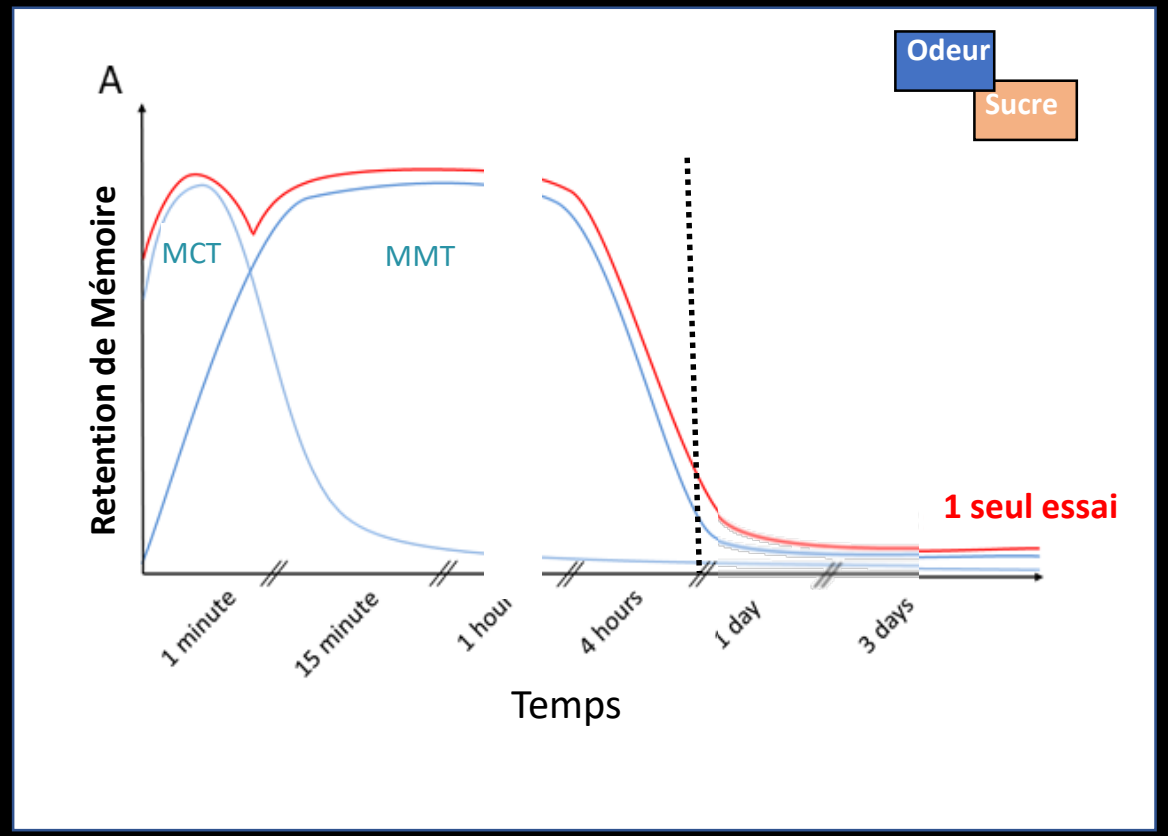
Od. / Suc. ; Od. / Suc. ; Od. / Suc → MCT, MMT, MLT

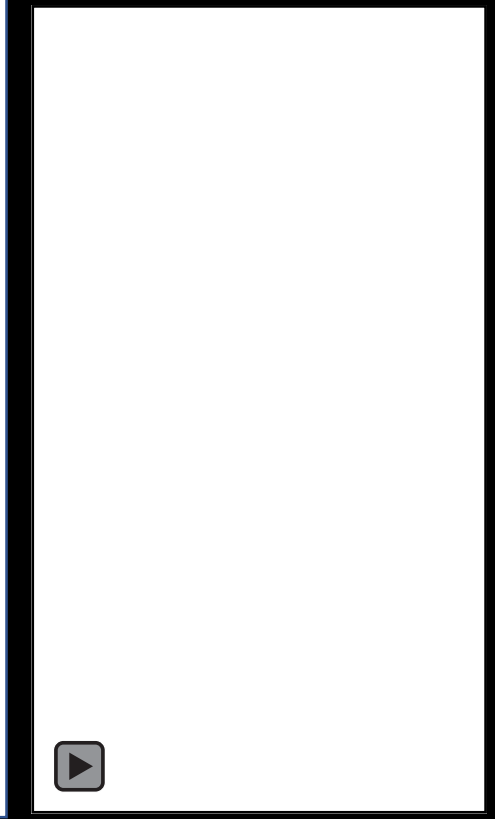
Giurfa & Sandoz Learn & Mem 2012

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


Maru Villar


Paul Marchal



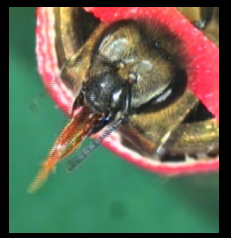


L’utilisation de vraies butineuses a montré qu’une seule expérience olfactive récompensée crée des mémoires à long terme qui dépendent de la synthèse des protéines et qui sont donc stabilisés dans le temps.

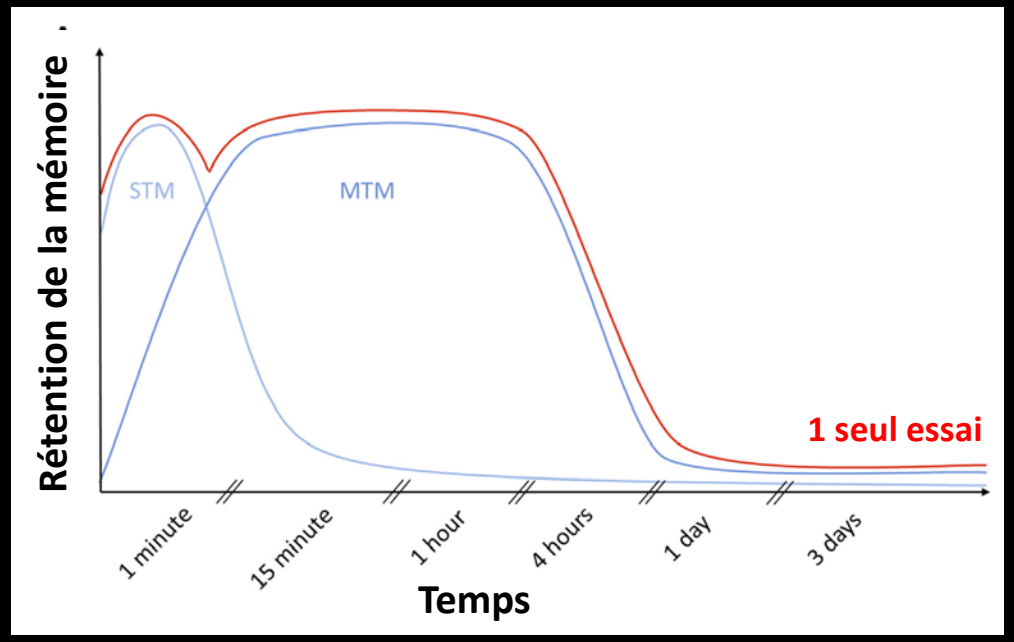
=> Mémoires ultra rapides si la motivation est appropriée

Villar et al Cell Reports 2020

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

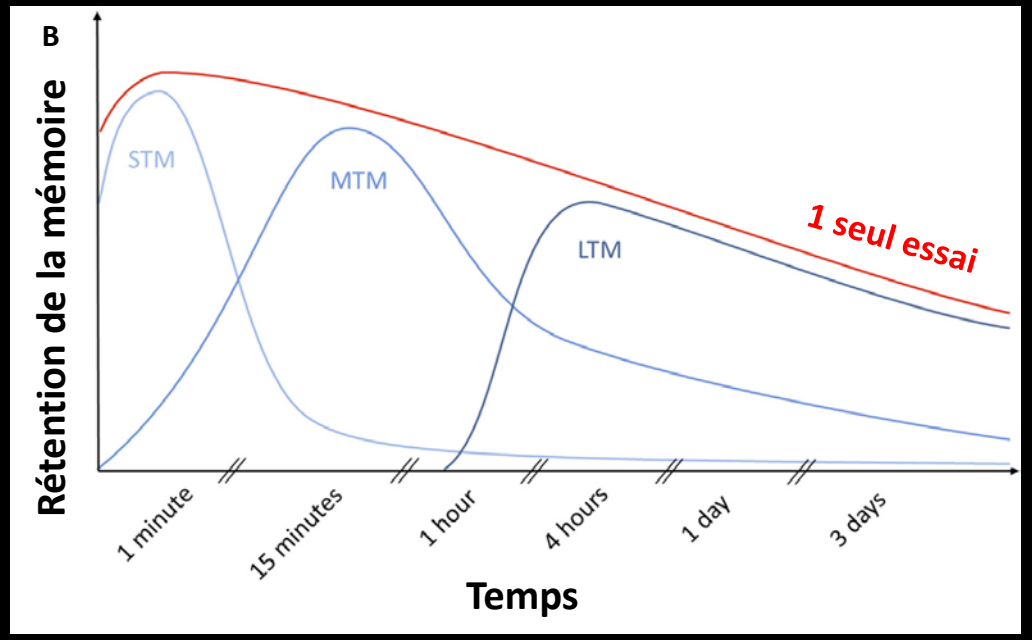


L'idée précédente



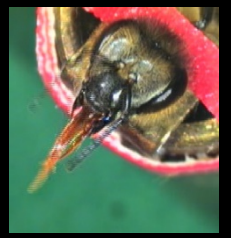
Un seul essai de conditionnement induit des MCT et des MMT et à partir de là, dans des délais plus longs, des mémoires défaillantes qui ne dépendent pas de la synthèse des protéines .

L'idée actuelle



- 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.**

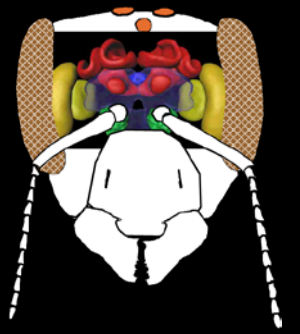
Quelles sont les principales différences entre les Les études précedentes et notre travail actuel?



- 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...

III. Conclusions : la mémoire robuste des abeilles



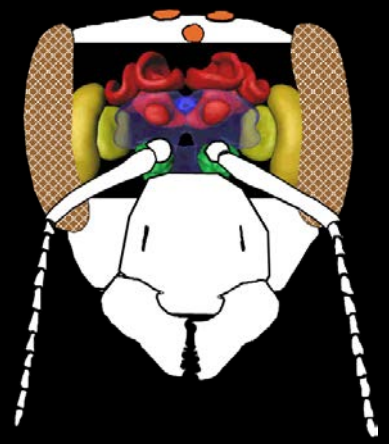
- Les abeilles mellifères développent des mémoires à long terme robustes, ce qui leur permet de suivre et exploiter les sources de nourriture pendant de longues périodes.

- **Une seule expérience olfactive récompensée** induit la formation d'une **mémoire à long terme** qui peut durer plusieurs jours en l'absence d'informations contradictoires.

- Seule une **motivation appétitive appropriée** permet la formation de ces mémoires spectaculaires.

- Le cerveau des butineuses d'abeilles motivées est « **prédisposé** » pour construire des souvenirs robustes d'une manière incroyablement rapide.

IV. Où réside la mémoire de l’abeille?



Les bases neuronales de l’apprentissage olfactif

Corps pédonculés (centres supérieurs)

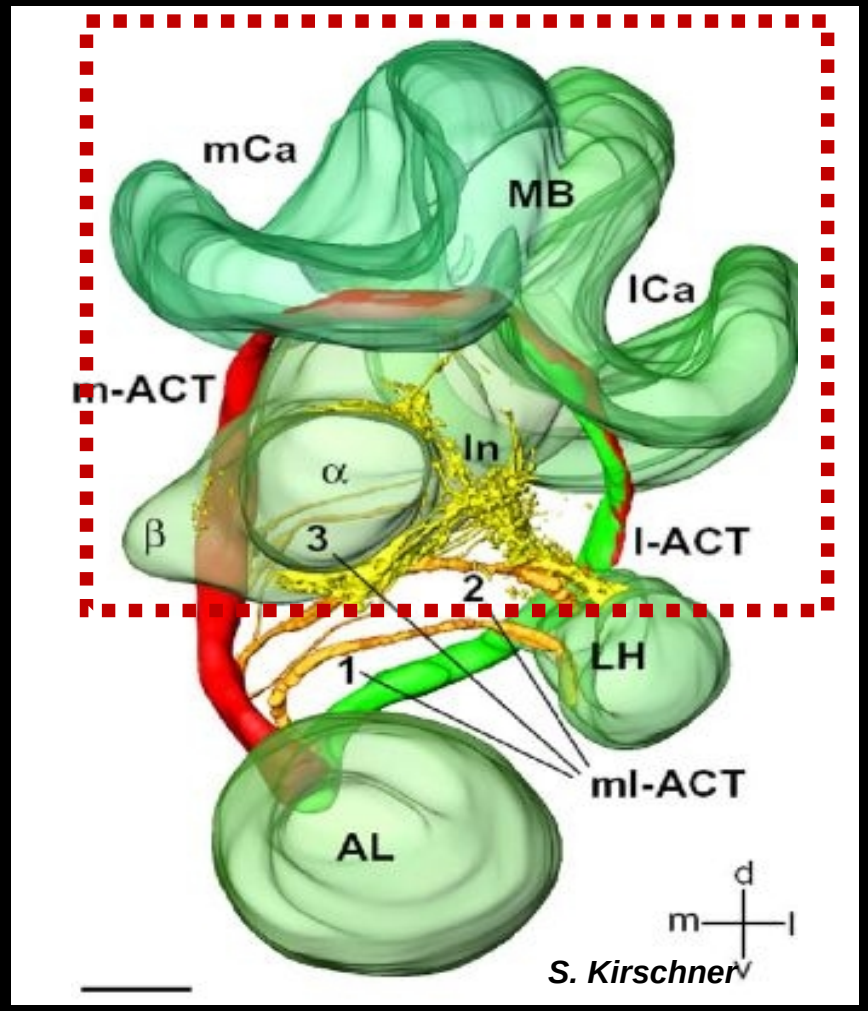
Protocerebrum latéral

Lobe antennaire : 160 glomerules

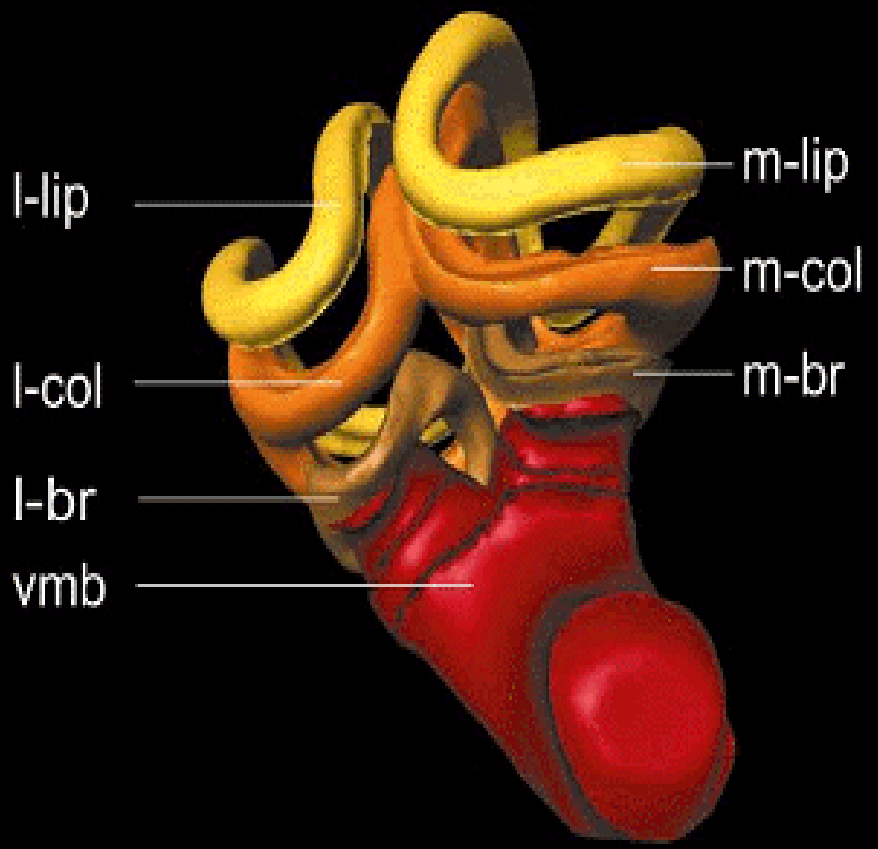
800 neurones de projection

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

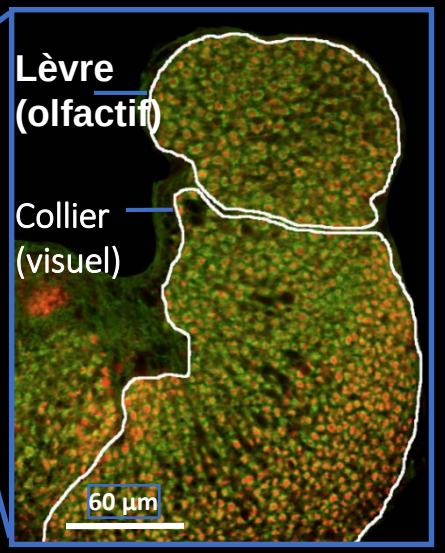


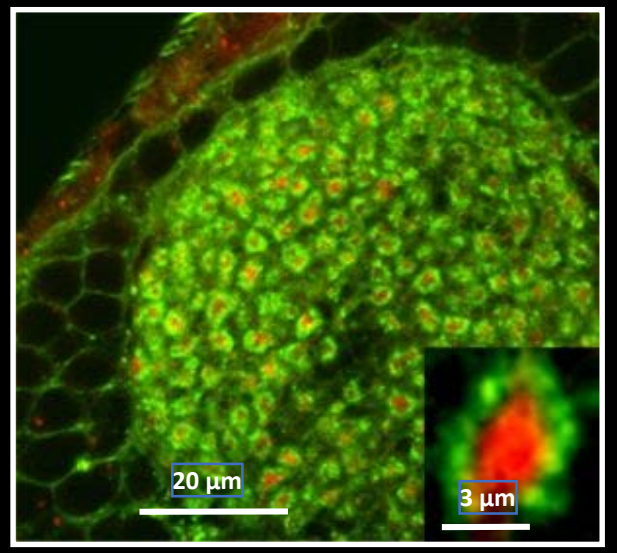
- Centres cérébraux **multimodaux**, avec convergence multi-sensorielle ségrégée et sortie multimodale combinée
- Echanges et transfert entre modules sensoriels différents
- **Substrat de la mémoire**
- Association étroite avec **attention et systèmes de renforcement**

L’organisation cellulaire des corps pédonculés

Dans la région d’entrée des corps pédonculés on trouve des microglomérules

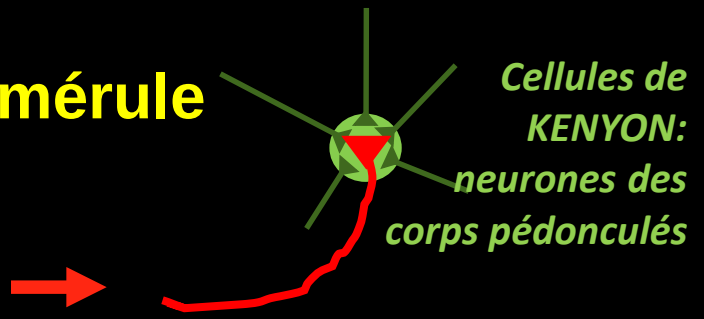






Un microglomérule

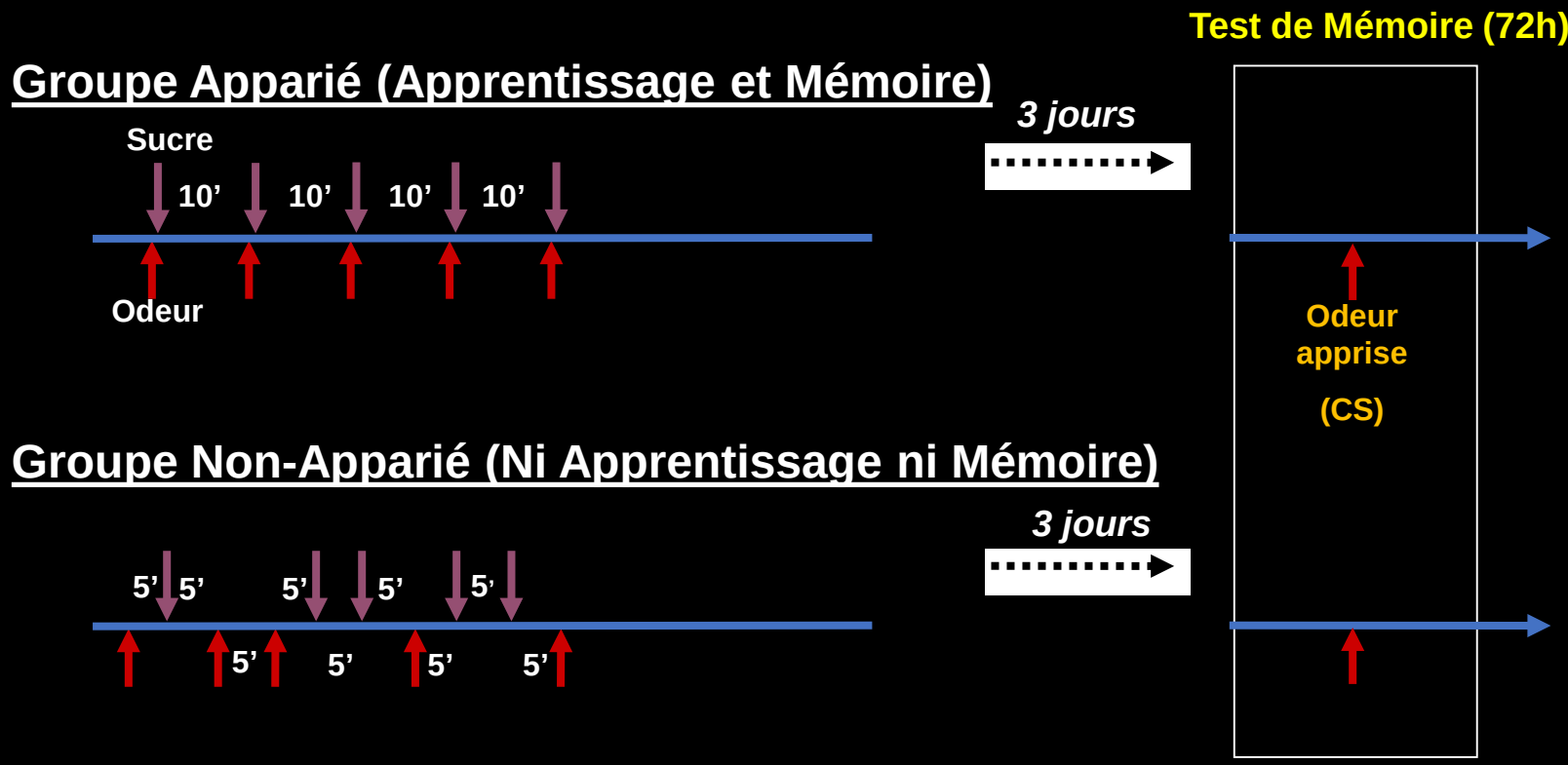
Neurone de projection
(en provenance des aires olfactives du cerveau)



Cellules de KENYON: neurones des corps pédonculés

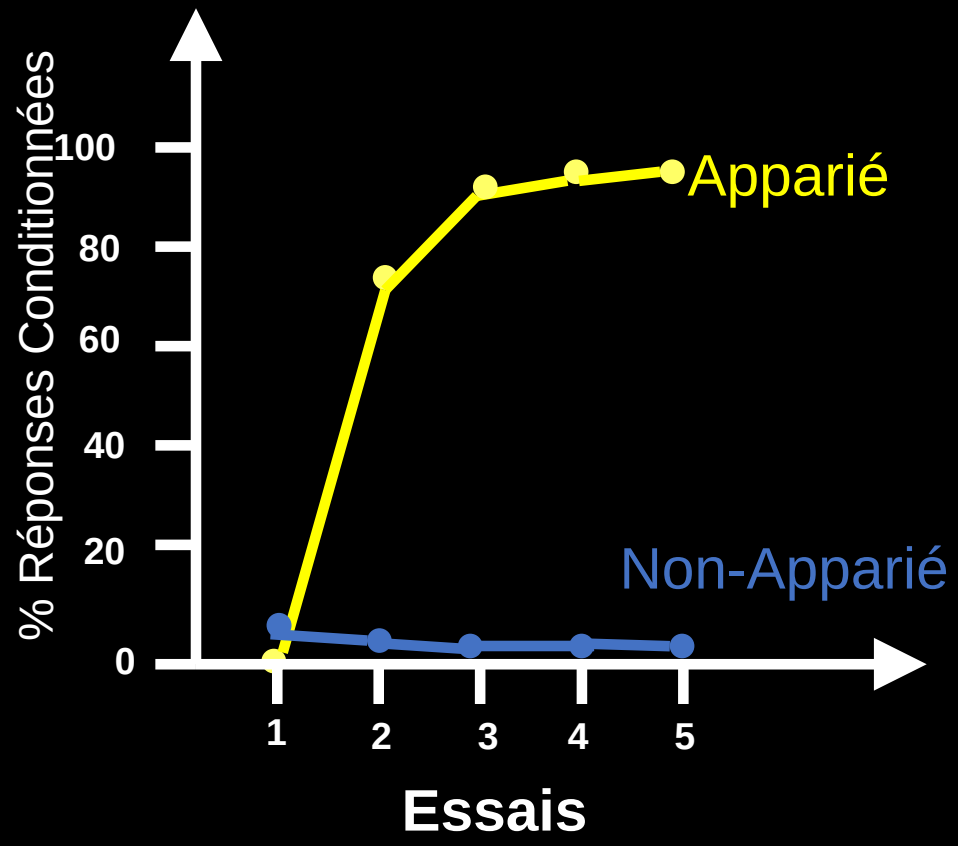
L’apprentissage et la mémoire olfactive modifient-ils les corps pédonculés et plus particulièrement les microglomérules?

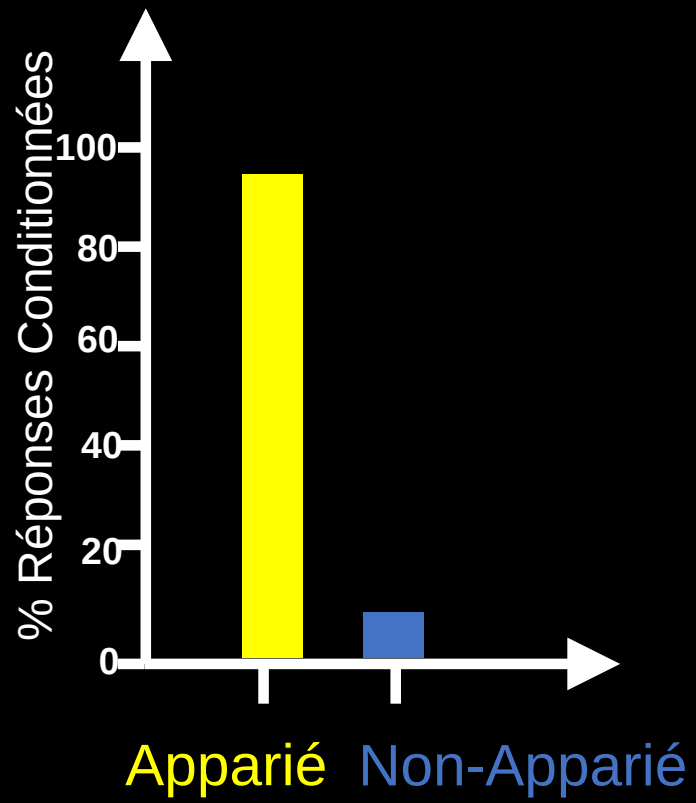
Conception de l’Expérience



Formation d’une Mémoire Olfactive à Long Terme

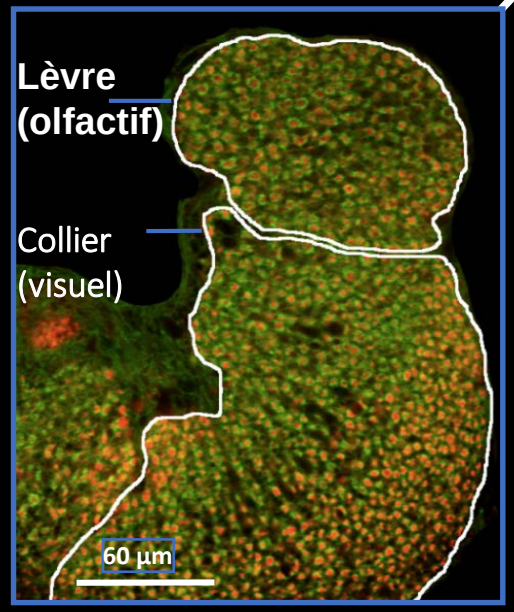






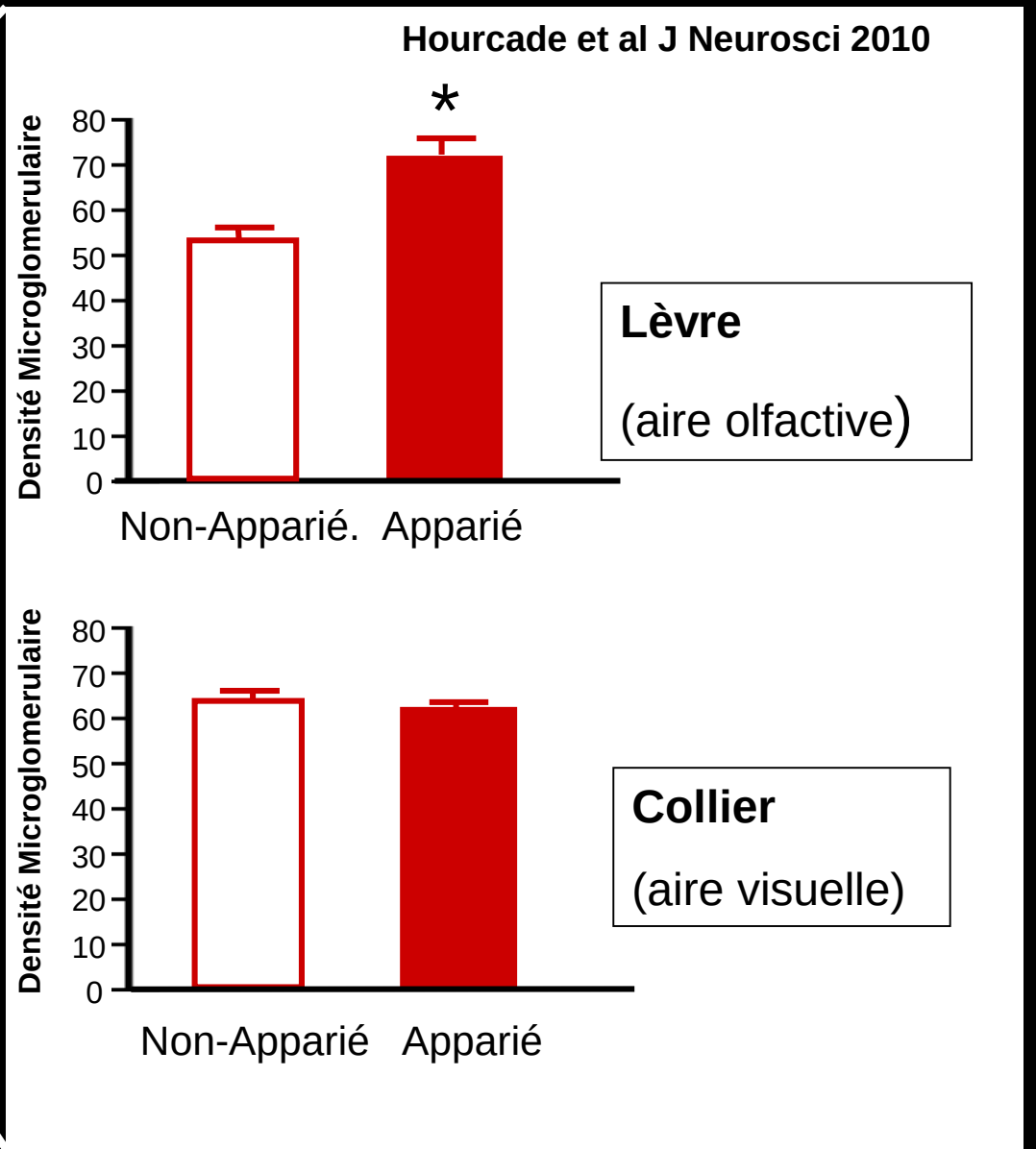
Hourcade et al Learn Mem 2009

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

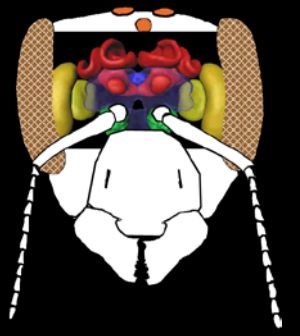


Mécanisme possible:

Formation de nouvelles synapses

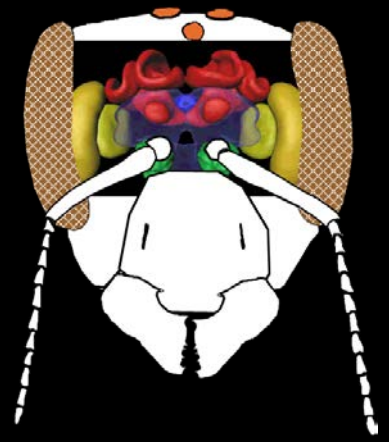


IV. Conclusions : le site de la mémoire

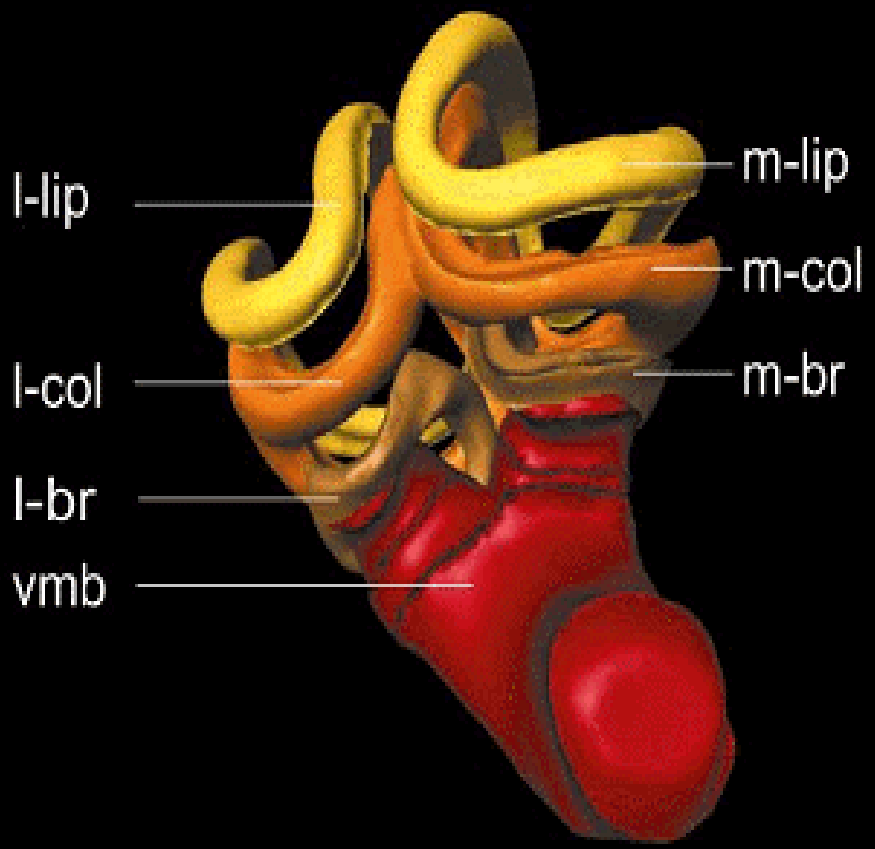


- Le cerveau est **plastique.**
- La région olfactive des **corps pédonculés** est modifiée suite à la formation d'une mémoire olfactive à long terme …
- La densité microglomérulaire augmente. De **nouveaux microglomérules apparaissent.**
- Ces structures peuvent donc **stocker la mémoire olfactive.**

V. L’impact des traitements aux pesticides



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



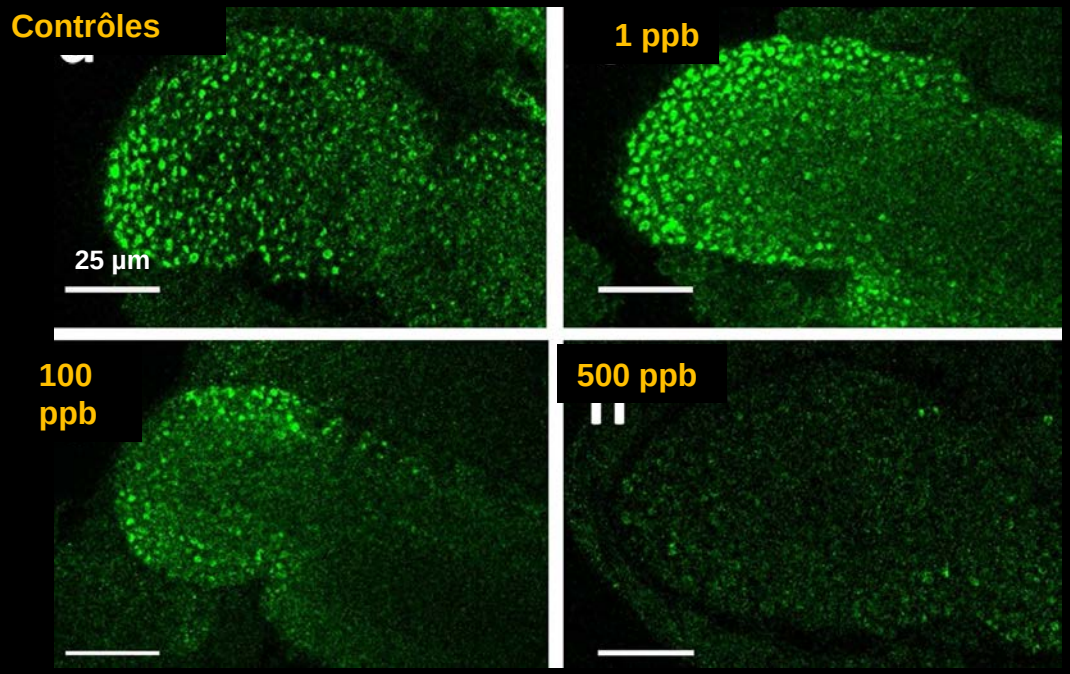
- Qu'arrive t-il à ces structures quand les abeilles sont traitées à l'état larvaire avec des doses sublétales de pesticide?
- Les doses sublétales ne tuent pas. Mais affectent elles la connectique cérébrale?

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).
- Maintenues en incubateur jusqu'à l'Age adulte (20 jours)
- Par la suite, analyse microglomérulaire des corps pédonculés



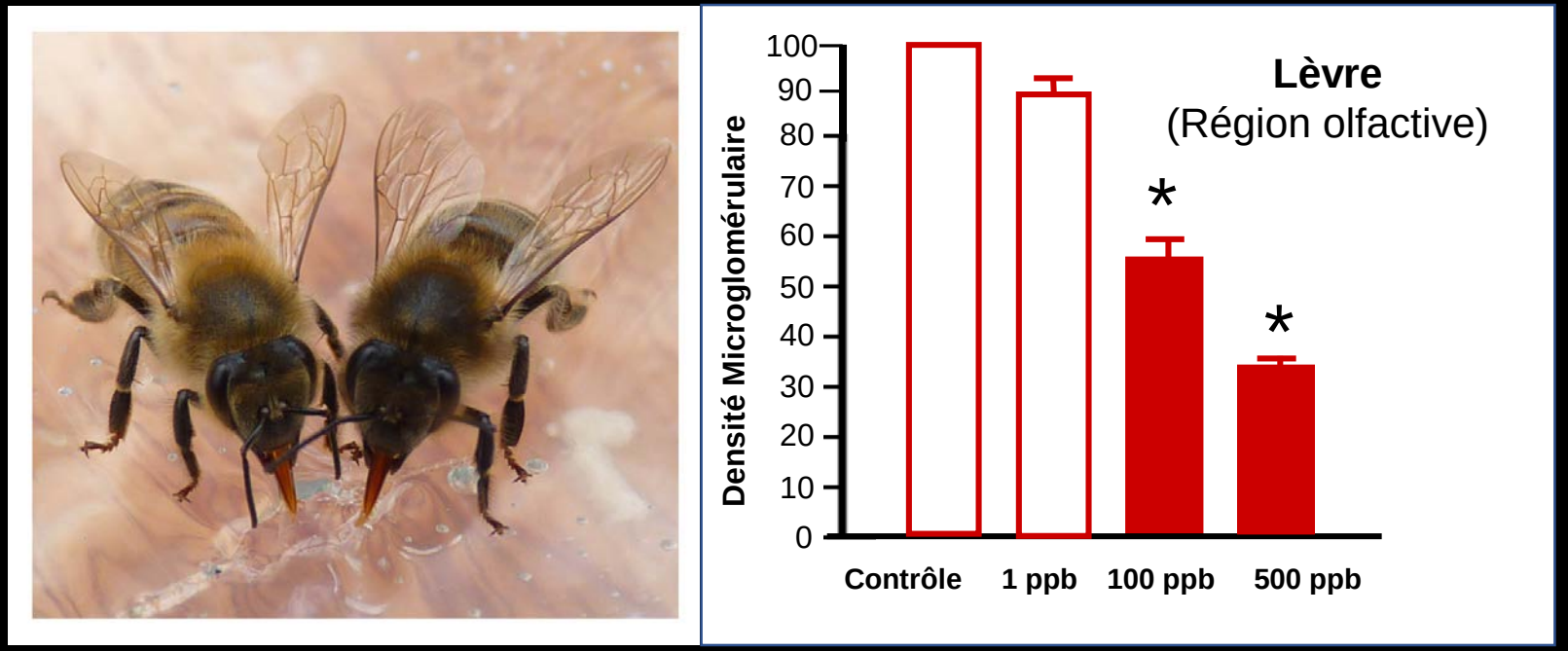




PPB =partie par milliard
10^{-9} (un milliardième)

La densité microglomérulaire à l’âge adulte

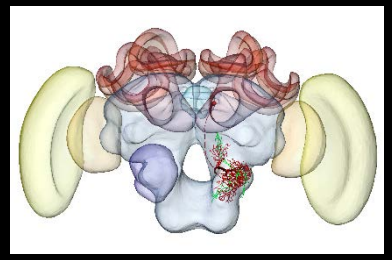
Peng & Yang Sci Reports 2016



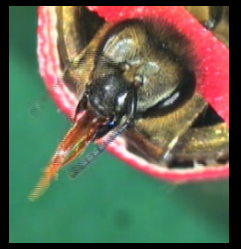
- La densité microglomérulaire est réduite chez les abeilles adultes à cause des doses sublétales d‘Imidaclopride à l‘état larvaire
- → **Conséquences dramatiques pour l‘apprentissage et la mémoire**

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 à long terme. Si la motivation appropriée est présente, une seule expérience olfactive récompensée induit une mémoire à long terme.
- Le cerveau des butineuses motivées est prédisposé pour la formation rapide de la mémoire : si la motivation alimentaire est intacte, une seule expérience suffit pour induire des mémoire stables et robustes.
- 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 append beaucoup sur nous-mêmes et surtout… qui mérite RESPECT ET PROTECTION!**