The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Une mouche peut perdre une odeur et pourtant revenir vers elle. Dans un panache virtuel, une direction mémorisée l'a aidée

Des drosophiles attachées revenaient à plusieurs reprises vers une frontière odorante après avoir marché dans de l'air propre. Le comportement, la modélisation et les perturbations neuronales soutiennent l'existence d'une mémoire compacte de direction, et non d'une carte complète. Le résultat provient d'un test contrôlé en réalité virtuelle et ne montre pas encore la même stratégie en vol libre dans la nature.

Written by Matteo · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Matteo, Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *A vector-based strategy for olfactory navigation in Drosophila*, Andrew F. Siliciano, Sun Minni, Chad Morton, Charles K. Dowell, Noelle B. Eghbali, Silas E. Busch, Juliana Y. Rhee, L. F. Abbott and Vanessa Ruta, Nature (2026) · DOI: 10.1038/s41586-026-10827-7

Une mouche peut perdre une odeur et pourtant revenir vers elle

La mouche avait laissé l'odeur derrière elle.

Elle continuait à marcher dans de l'air propre, parfois pendant des dizaines de secondes et sur des centaines de millimètres virtuels. Puis elle se tournait vers la frontière qu'elle avait franchie et retrouvait l'odeur. À cet instant, l'odeur elle-même ne pouvait pas lui indiquer le chemin du retour.

C'est l'observation centrale d'une nouvelle étude publiée dans Nature sur la navigation des drosophiles. Les chercheurs soutiennent que les mouches utilisaient une mémoire compacte de direction : non pas une carte de tout le panache odorant, ni une mémoire de la distance parcourue, mais une orientation mémorisée vers une frontière devenue indétectable.

Le résultat est frappant parce qu'il montre à quel point une faible quantité d'information stockée peut suffire. Il est aussi facile à exagérer. Ces mouches ne volaient pas librement dans un paysage naturel. Elles marchaient, attachées, sur une boule soutenue par de l'air dans un monde virtuel strictement contrôlé. L'étude soutient une stratégie fondée sur un vecteur dans cet appareil ; elle ne montre pas que les mouches construisent des cartes mentales, n'explique pas toutes les manières dont les animaux suivent des odeurs et n'identifié pas les cellules où la mémoire est physiquement stockée.

Le corridor invisible était créé par un logiciel

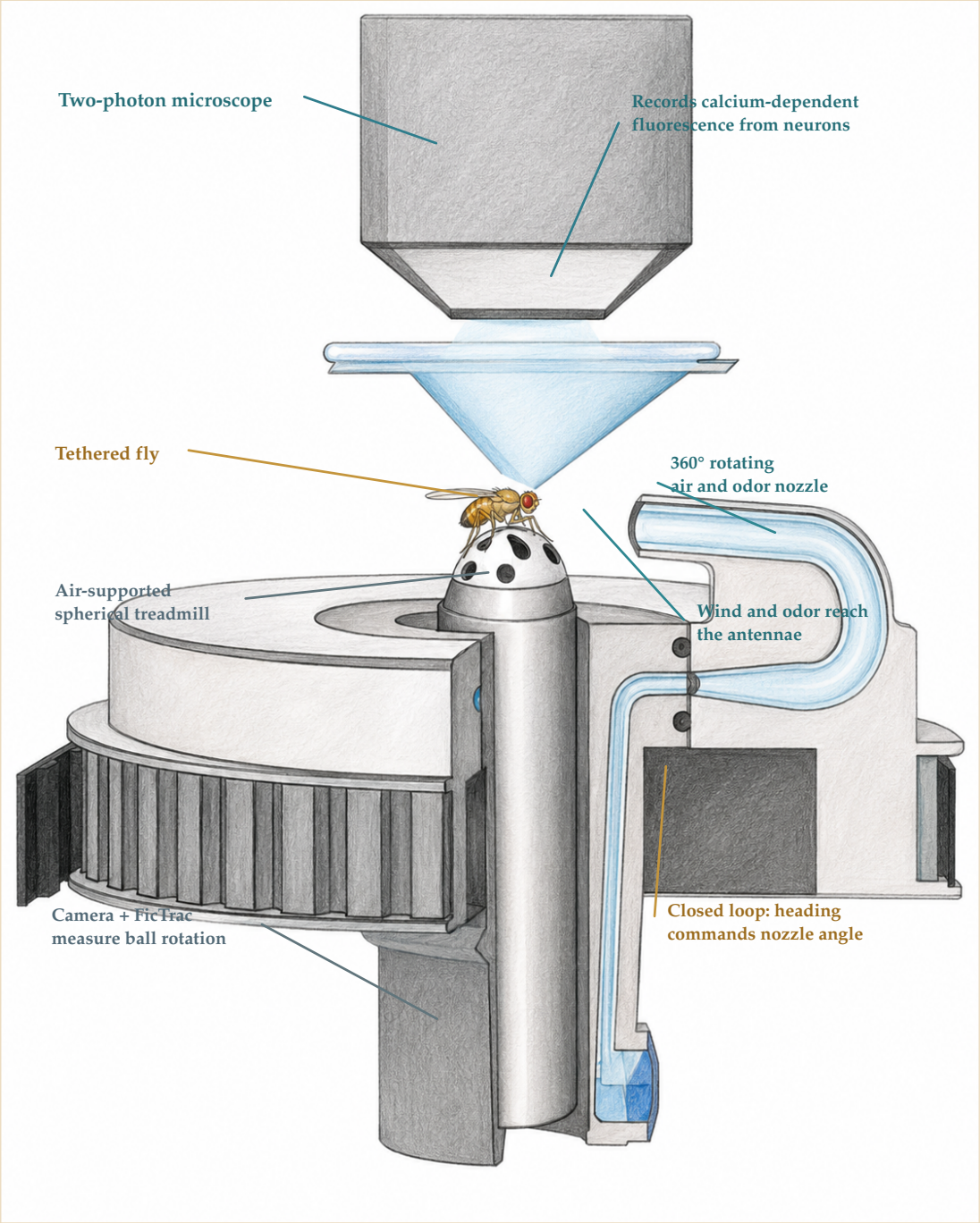
Un panache odorant est la région mobile d'odeur transportée par l'air. À l'extérieur, un panache se courbe, se fragmente et se reconnecte lorsque le vent change. Il devient alors difficile de savoir exactement ce qu'un animal a senti à chaque instant.

Les chercheurs ont rendu le problème contrôlable grâce à une **réalité virtuelle en boucle fermée**. Le corps de la mouche était attaché au-dessus d'une boule légère flottant sur un coussin d'air. Pendant qu'elle marchait, une caméra mesurait la rotation de la boule environ 60 fois par seconde. Un logiciel convertissait cette rotation en position et orientation virtuelles dans un espace bidimensionnel.

Cette orientation contrôlait une buse motorisée capable d'effectuer une rotation complète de 360 degrés. Lorsque la mouche changeait de cap virtuel, la buse se déplaçait autour d'elle pour maintenir le vent aligné avec une direction stable dans son monde virtuel. En parallèle, des contrôleurs de débit massique modifiaient la quantité d'air propre ou d'odeur de vinaigre de cidre arrivant aux antennes en fonction de la position virtuelle de la mouche. Le franchissement d'une frontière définie par logiciel activait ou désactivait donc l'odeur, créant un corridor fictif de 50 millimètres de large et un mètre de long, même si la mouche ne quittait jamais la boule.

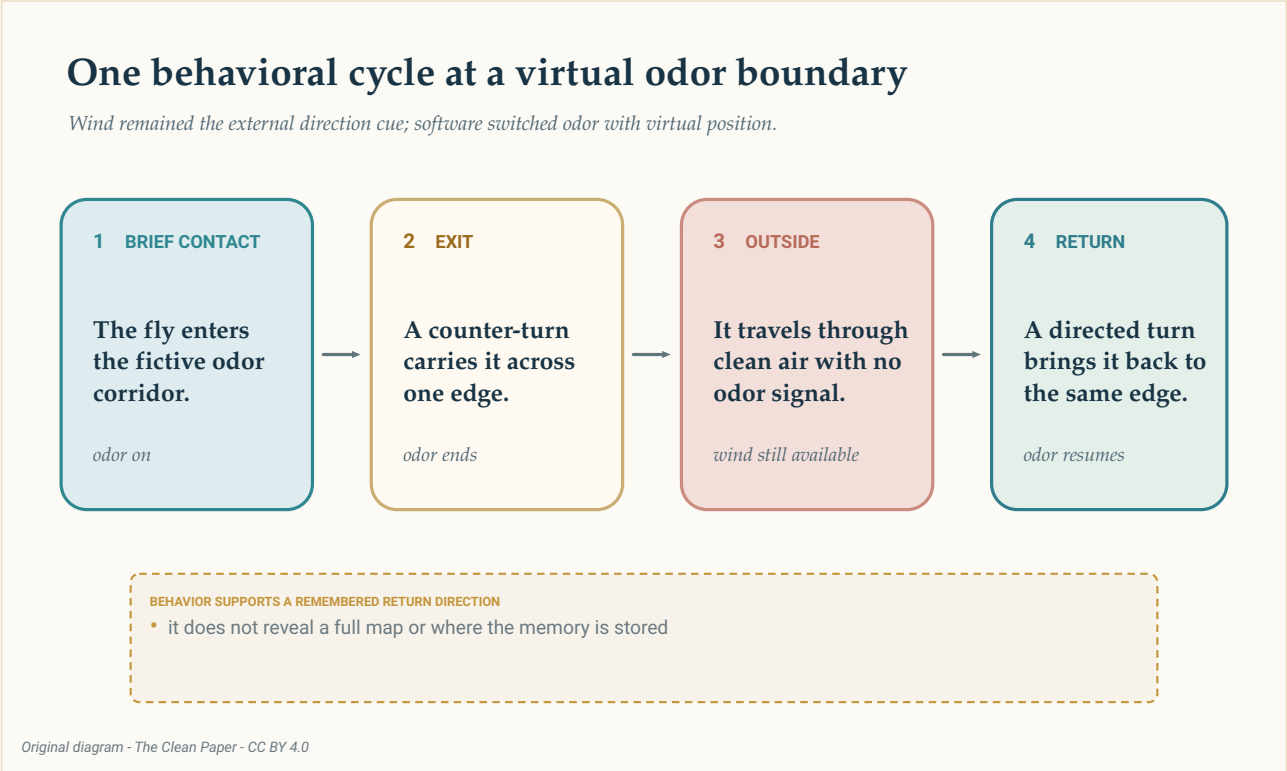
L'appareil produisait à chaque instant un enregistrement synchronisé de la position virtuelle, du cap, de l'état de l'odeur et des commandes de flux d'air. À partir de cet enregistrement, les chercheurs ont reconstruit les trajectoires, marqué chaque entrée et chaque sortie et mesuré à quel point les retours étaient directs. Le vent fournissait le repère directionnel externe ; le mouvement propre de

la mouche déterminait quand elle rencontrait l'un ou l'autre bord de la frontière odorante virtuelle.



La mouche restait attachée au-dessus d'une boule soutenue par de l'air. Une caméra et FicTrac convertissaient la rotation de la boule en déplacement et cap virtuels ; le logiciel faisait ensuite tourner la buse d'air et d'odeur et activait l'odeur selon la position virtuelle. Pendant des essais séparés d'imagerie neuronale, le microscope biphotonique situé au-dessus de la mouche enregistrait la fluorescence dépendante du calcium dans les neurones EPG ou FC2, ce qui permettait d'aligner l'activité neuronale sur le comportement. Le microscope n'était pas nécessaire pour chaque essai comportemental.

The Clean Paper CC BY 4.0



Dans l'essai contrôlé, une mouche entrait brièvement dans le corridor odorant virtuel, en sortait, parcourait de l'air sans odeur puis effectuait un retour dirigé. Le comportement soutient l'idée d'une direction de retour mémorisée ; il ne révèle pas où cette information est stockée.

The Clean Paper CC BY 4.0

Dans l'expérience principale du **corridor vertical**, **40 mouches** entraient à plusieurs reprises dans l'odeur, effectuaient un contre-virage pour en sortir, puis revenaient au même bord. « Vertical » est le nom donné dans l'article à la géométrie à 0 degré : l'axe long du corridor était parallèle à la direction du vent remontée. Cela ne signifie pas que l'appareil était dressé verticalement.

Les auteurs appellent ce comportement **suivi de bord**. Un **épisode** est une période continue entre deux franchissements de frontière : un épisode intérieur va de l'entrée à la sortie, et un épisode extérieur de la sortie au retour. Sur 755 épisodes intérieurs, une visite durait en moyenne 4,9 secondes. Pendant les retours, la distance moyenne à la frontière était de 10,4 millimètres. Moins de 4 % des 793 épisodes traversaient tout le corridor jusqu'au bord opposé.

Ces deux derniers nombres décrivent des épisodes, et non des centaines de mouches indépendantes. La distinction compte, car un même animal peut contribuer à de nombreux épisodes.

Les retours n'étaient pas simplement un réflexe fixe face au vent

Plusieurs expériences ont testé des explications plus simples.

Les chercheurs ont d'abord modifié ce qui se passait **le long** du corridor lorsque la mouche marchait face au vent. L'odeur pouvait devenir plus forte vers la source virtuelle, rester constante ou s'affaiblir. Les mouches ont produit des trajectoires similaires dans les trois cas. Une règle simple comme « continue là où l'odeur devient plus forte » ne peut donc pas expliquer le suivi de bord dans cet appareil.

Ils ont ensuite adouci le bord **latéral** du corridor pour former un profil gaussien, où la concentration variait graduellement au lieu de basculer brutalement. Les mouches se concentraient près du flanc où la concentration changeait le plus vite, et non au centre où l'odeur était la plus forte. Le repère pertinent était donc la variation latérale marquant une frontière effective, plutôt qu'une augmentation obligatoire vers la source le long du corridor.

Cela ne signifie pas que les gradients de concentration ne comptent jamais dans la nature. Cela signifie qu'une augmentation vers la source n'était pas nécessaire à ce comportement dans les conditions testées.

Les chercheurs ont également changé l'orientation du corridor. Des groupes distincts ont suivi des corridors verticaux, à 45 degrés et à 90 degrés, tandis qu'un autre groupe rencontrait un corridor qui se déplaçait latéralement après les sorties. Les tailles des groupes étaient respectivement de 40, 21, 20 et 24 mouches. Leurs trajectoires extérieures changeaient avec la géométrie. Une règle générale comme « tourne toujours face au vent » ne peut pas expliquer cette flexibilité.

Dans ce dispositif, l'odeur atteignait les deux antennes à environ deux millisecondes d'intervalle. Une activation optogénétique bilatérale associée au vent pouvait reproduire un motif semblable au suivi de bord. L'**optogénétique** utilise des protéines sensibles à la lumière pour modifier l'activité de cellules choisies. Ici, le résultat suggère qu'une différence gauche-droite dans l'arrivée de l'odeur n'était pas nécessaire à ce comportement. Il ne rend pas la comparaison bilatérale inutile chez des animaux se déplaçant librement dans d'autres panaches.

Un vecteur est plus petit qu'une carte

Un **vecteur** associe une direction et une grandeur. La quantité stockée utile ici était surtout directionnelle : vers où la mouche devait-elle tourner pour retrouver la frontière du panache ? L'étude n'a pas trouvé d'indice montrant que la mouche stockait une représentation complète du panache ou de sa propre position à l'intérieur.

Les auteurs ont d'abord fabriqué des trajectoires artificielles en mélangeant les composantes des déplacements réels. Ils ont tiré au hasard des longueurs de course et des angles de virage observés, puis les ont assemblés. Certains de ces marcheurs synthétiques finissaient par retrouver la frontière odorante, mais s'éloignaient davantage et empruntaient des chemins moins directs que les vraies mouches. Même l'ajout de la tendance ordinaire des mouches à se tourner face au vent ne reproduisait pas les retours courts et dirigés. Le comportement réel contenait donc une information directionnelle supérieure à celle d'un réassemblage aléatoire des mêmes mouvements.

Les chercheurs ont ensuite construit un modèle à deux modes : **quitter la frontière** et **revenir à**

la frontière. Ces modes n'étaient pas des étiquettes attribuées à chaque instant à l'intérieur ou à l'extérieur de l'odeur, mais des règles de direction alternatives pouvant basculer pendant le déplacement.

Chaque franchissement de frontière donnait au modèle une direction à mémoriser. À la sortie, il mettait à jour une direction utilisée pour s'éloigner. À l'entrée, il mettait à jour une direction de retour distincte : en pratique, « lorsque j'ai trouvé la frontière, je me déplaçais dans cette direction ». Lors d'un retour ultérieur, cette direction mémorisée orientait la mouche simulée vers le bord.

Les chercheurs ont ajusté le modèle aux trajectoires des corridors à 0, 45 et 90 degrés. Dans la comparaison synthétique, 72 vraies mouches et 75 simulations produisaient des statistiques de trajectoire similaires. Lorsque la direction de retour apprise à l'entrée était supprimée, le suivi devenait moins efficace pour toutes les orientations. Cela soutient l'utilité d'une mémoire de la direction d'entrée ; cela ne prouve pas que le cerveau de la mouche exécute littéralement les équations du modèle.

> **Que signifie « mémoire » dans cet article ?**
>
> Les chercheurs n'ont pas lu directement une flèche stockée dans le cerveau de la mouche. La « mémoire directionnelle » est une inférence soutenue par le comportement, un modèle et des mesures neuronales. Le modèle dit que quelques directions changeantes peuvent reproduire d'importantes statistiques de trajectoire. Il ne prouve pas que la mouche applique littéralement les équations ni qu'un groupe précis de neurones constitue le site de stockage.

Une expérience supplémentaire avec un segment à 45 degrés orienté dans le sens opposé a modifié le comportement ultérieur de 10 mouches, parallèlement à 29 simulations du modèle. Cela rend l'explication directionnelle plus précise qu'une description construite après coup, tout en restant une interprétation fondée sur un modèle.

Un repère de cap et un objectif courant

L'étude a ensuite mesuré et perturbé l'activité du **complexe central** de la mouche, une région cérébrale impliquée dans la navigation.

> **Deux signaux aux fonctions différentes**
>
> EPG et FC2 désignent deux populations neuronales du complexe central. L'activité EPG agit comme une lecture de boussole : elle suit la direction dans laquelle la mouche est orientée par rapport au vent. L'activité FC2 est associée à la direction dans laquelle la mouche essaie de se déplacer. Un circuit de commande en aval peut comparer le cap actuel à cet objectif. L'étude teste les deux populations, mais ne montre pas que l'une ou l'autre stocke seule toute la mémoire.

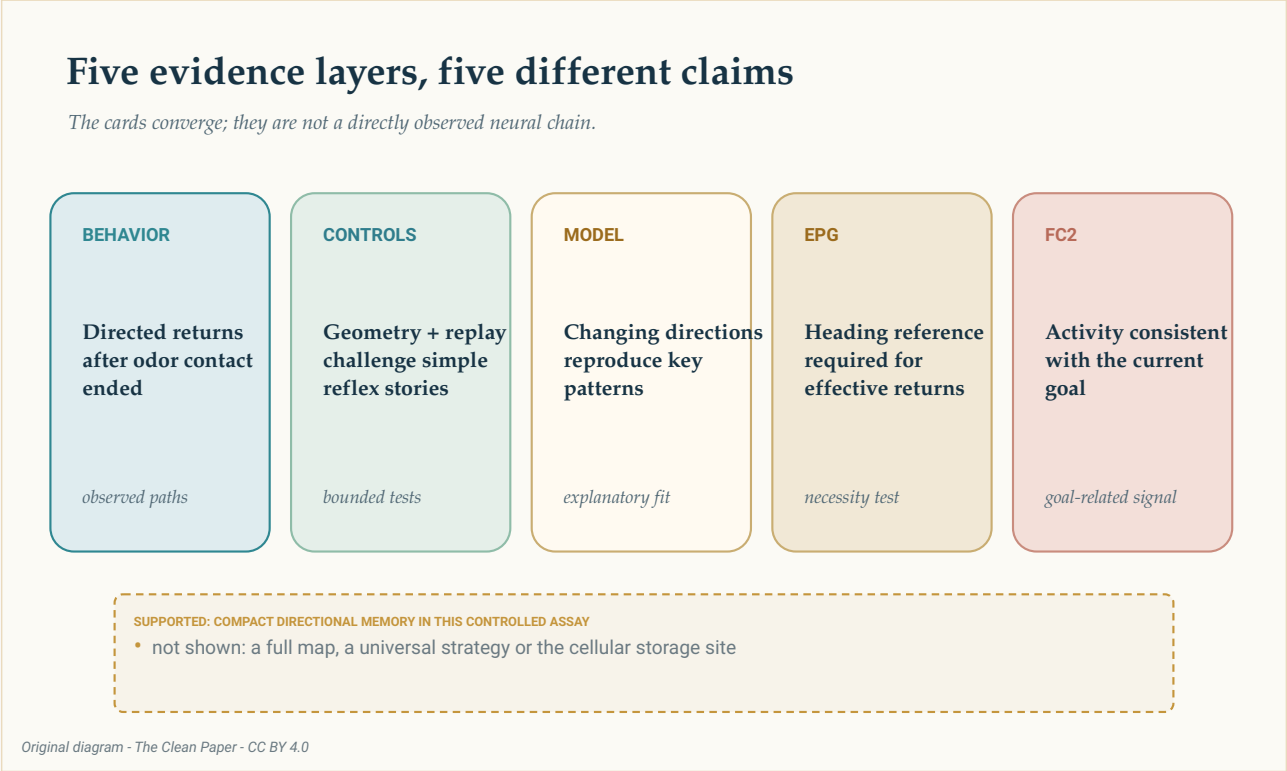
Les **neurones EPG** portent un signal de cap : leur motif d'activité suit la direction dans laquelle la

mouche est orientée par rapport à un repère externe. À l'aide de l'imagerie calcique, une mesure optique indirecte de l'activité neuronale, les chercheurs ont constaté que la phase d'activité EPG suivait le cap par rapport au vent pendant le suivi de bord. Cette analyse portait sur 16 essais provenant de 9 mouches.

Pour inhiber les neurones EPG, les chercheurs les ont modifiés afin qu'ils expriment **GtACR1**, un canal anionique activé par la lumière verte. Une LED restait allumée tout au long de l'essai, activant ce canal et inhibant les neurones sélectionnés ; le même éclairage n'altérait pas les mouches témoins génétiques.

Lorsque les neurones EPG étaient ainsi inhibés, 12 mouches expérimentales effectuaient des retours dirigés moins efficaces que 6 mouches témoins génétiques. La conclusion circonscrite est que le repère de cap porté par l'activité EPG était nécessaire à un suivi efficace du bord dans les conditions testées. Ce n'est pas la preuve que les neurones EPG stockaient à eux seuls la direction de la frontière.

Les **neurones FC2** montraient une autre relation. Leur activité de population était associée à l'objectif de navigation actuel et pointait vers la frontière du panache avant les virages dans l'essai. L'imagerie utilisait 6 mouches, et les comparaisons par inhibition des groupes de 9 à 14 mouches selon l'analyse. L'inhibition perturbait le suivi de bord.



Le comportement, les changements de géométrie du panache, un modèle ajusté et deux perturbations neuronales soutiennent différentes parties de l'explication par mémoire directionnelle. Ensemble, ils soutiennent l'existence d'une direction d'objectif compacte dans ce test contrôlé, pas une carte complète ni un site cellulaire de stockage démontré.

The Clean Paper CC BY 4.0

Il s'agit de preuves convergentes, pas d'une chaîne causale photographiée. L'activité EPG fournissait

un repère de cap nécessaire. L'activité FC2 était compatible avec une direction d'objectif et nécessaire à un comportement efficace. Les expériences n'ont pas localisé un « engramme » mnésique unique et n'ont pas prouvé que les synapses FC2 stockaient physiquement la direction.

Comme analogie grossière à l'échelle humaine, imaginez sortir d'une étroite nappe de brouillard tandis qu'un vent constant vous indique toujours le nord. Une boussole peut vous dire dans quelle direction vous regardez, mais revenir vers le brouillard exige aussi de mémoriser l'orientation de son bord. Comparer le cap actuel à ce cap désiré indique de quel côté tourner. C'est la division du travail suggérée ici pour les signaux EPG et FC2. Il s'agit d'une analogie explicative, pas d'une preuve que les humains utilisent les mêmes cellules ou le même algorithme.

La mémoire dépendait de l'action, pas seulement du calendrier des odeurs

Dans une expérience de relecture, les mouches recevaient la même séquence temporelle d'odeurs qu'auparavant, mais ce calendrier était déconnecté de leurs actions présentes. Le biais directionnel appris s'affaiblissait au fil des épisodes rejoués. Cela soutient une mise à jour **opérante**, liée à l'action : ce qui comptait n'était pas seulement l'exposition passive à une séquence d'odeurs, mais la relation entre l'odeur et le mouvement de la mouche.

Le dénominateur varie entre ces analyses. Les panneaux de données étendues comprennent 8 ou 9 mouches selon la comparaison ; la série d'épisodes successifs en utilise 8 ; les panneaux de trajectoires exigent au moins 10 entrées efficaces ; et les panneaux de modèles appariés utilisent 21 trajectoires simulées satisfaisant elles aussi ce seuil d'entrée. Il ne s'agit pas d'un seul échantillon groupé de huit mouches.

Un panache plus irrégulier était utile, mais restait virtuel

Les chercheurs ont aussi rejoué un panache plus irrégulier enregistré précédemment. Ils l'ont dilaté d'un facteur cinq dans l'espace et le temps afin que les mouches attachées puissent le rencontrer assez souvent. **Dix mouches sur 12** ont atteint une distance de moins de 50 millimètres virtuels de sa source.

Cela ne signifie pas que dix mouches ont trouvé une source réelle en plein air. Il s'agit de performances dans une relecture contrôlée d'un panache naturaliste.

Pour chaque type de panache dynamique, le modèle a généré 2 000 trajectoires. La comparaison du panache dilaté en a analysé 1 850 après avoir exigé une entrée efficace et exclu les trajectoires commençant trop près de la source. La mémoire aidait davantage près de la source, où les rencontres successives conservaient une structure directionnelle cohérente, et moins dans la région plus turbulente sous le vent.

Cette réserve fait partie du résultat. Une direction compacte ne peut aider que lorsque le monde reste suffisamment cohérent pour qu'une rencontre précédente fournisse une information utile sur la suivante.

Ce que l'étude ne montre pas

- Elle ne montre **pas** qu'une mouche construit une carte spatiale complète.
- Elle ne montre **pas** un vol libre à travers un panache naturel non modifié.
- Elle n'établit **pas** que toute navigation guidée par l'odeur utilise cette stratégie.
- Elle ne montre **pas** que les neurones EPG ou FC2 sont le site physique exclusif de stockage de la mémoire.
- Elle ne transforme **pas** le modèle ajusté en algorithme biologique littéral de la mouche.
- Elle ne se généralise **pas** directement à la navigation humaine.

L'étude est la plus forte là où elle est la plus précise. Le contrôle en boucle fermée a donné aux chercheurs un accès exact à chaque rencontre odorante. Les changements de géométrie, la relecture, la modélisation, l'imagerie calcique et l'inhibition ont ensuite testé différentes parties d'une même explication. Mais les cohortes de comportement, d'imagerie et d'inhibition étaient distinctes ; les tailles d'échantillon n'étaient pas prédéterminées ; la collecte et l'analyse des données n'étaient ni randomisées ni réalisées en aveugle ; et moins de 10 % des mouches attachées ont été exclues pour des problèmes d'acclimatation, de réponse ou de suivi.

Ces limites n'effacent pas le phénomène. Elles le définissent.

Résumé clair

Des drosophiles attachées marchant dans un corridor odorant virtuel revenaient à plusieurs reprises vers une frontière après avoir laissé l'odeur derrière elles. Des modifications de la concentration et de la géométrie du corridor, un modèle de commutation ajusté, l'imagerie neuronale et l'inhibition optogénétique soutiennent une explication selon laquelle la mouche utilise une direction mémorisée compacte plutôt qu'une carte complète. Les neurones EPG fournissaient un repère de cap nécessaire, tandis que l'activité FC2 était compatible avec la direction de l'objectif actuel. Le résultat reste circonscrit à un test contrôlé de marche ; il n'identifié pas le site cellulaire de stockage de la mémoire et ne montre pas le même calcul en vol libre naturel.

Mise au point

Ce que montre l'article : Dans un test attaché en boucle fermée, les mouches effectuaient des retours dirigés vers des frontières odorantes virtuelles qu'elles ne pouvaient plus sentir. Plusieurs con-

trôles comportementaux, la modélisation et des perturbations neuronales soutiennent une stratégie fondée sur un vecteur.

Ce qui est inféré : Que le comportement utilise une mémoire directionnelle compacte et que l'activité de population FC2 représente l'objectif de navigation actuel. Le contenu de la mémoire n'a pas été lu directement.

Ce que l'étude ne montre pas : Une carte mentale complète, une stratégie olfactive universelle, des performances en vol libre dans un panache naturel, un site unique de stockage de la mémoire ou un analogue humain.

Principales limites : Une seule espèce et un appareil contrôlé ; des cohortes de mouches et des unités d'analyse différentes entre expériences ; des signaux calciques indirects ; des tests de nécessité qui ne prouvent pas la suffisance ; et un panache naturaliste rejoué et dilaté.

Quel niveau de confiance un lecteur non spécialiste devrait-il avoir ? Une forte confiance dans la réalité du phénomène de retour dirigé dans cet appareil et dans l'importance des activités du complexe central liées au cap et à l'objectif. Une confiance modérée dans le modèle comme explication compacte. Une faible confiance dans toute affirmation l'étendant sans modification au plein air ou l'appelant une carte complète.

Sources

Siliciano et al., A vector-based strategy for olfactory navigation in Drosophila, Nature (2026)
https://doi.org/10.1038/s41586-026-10827-7

Siliciano et al., data archive for A vector-based strategy for olfactory navigation in Drosophila
https://doi.org/10.5281/zenodo.20751812

Ruta Laboratory, Edge-Tracking-Model
https://github.com/rutalaboratory/Edge-Tracking-Model