

Le pivot copernicien

par Richard Taillet, sur le blog Signal sur bruit

On présente souvent Copernic comme un visionnaire qui aurait bouleversé notre vision du cosmos, en remplaçant une Terre centrale et immobile par une Terre en mouvement autour d'un Soleil central et fixe. Sans vouloir diminuer le rôle qu'a joué la publication du *De Revolutionibus* en 1543 dans l'évolution des sciences et de notre vision du cosmos, il est intéressant de revenir sur la façon dont cette œuvre s'inscrit dans l'astronomie médiévale.

Avant Copernic, c'est le point de vue ptoléméen qui fait autorité : la Terre est au centre de l'Univers, entourée d'une grande sphère céleste qui porte les étoiles et tourne sur elle-même. La Lune, le Soleil et des planètes tournent sur des cercles (épicycles) dont les centres tournent eux-mêmes sur des cercles (déférents), ces derniers n'étant pas exactement centrés sur la Terre (excentricité). L'un des apports de Ptolémée fut de proposer que certains cercles étaient décrits à une vitesse variable : ce n'est que vu depuis un point distinct du centre du cercle, l'équant, que le mouvement paraissait régulier. Plus de mille ans d'astronomie ont affiné cette vision sans la remettre en cause.

On sait peu de chose sur les motivations de Copernic, mais la plupart des historiens des sciences mettent en avant le désir de se débarrasser de cet équant qu'il jugeait abominable et de refonder l'astronomie sur des mouvements circulaires uniformes. En ce sens, cela ressemble davantage à un pas en arrière qu'à une révolution ! On tombe là sur un premier paradoxe : c'est la recherche de mouvements « parfaits » et non des causes physiques qui pousse Copernic à placer le Soleil près du centre de son système (et non au centre, pour reproduire l'excentricité de l'orbite terrestre) ... ce qui permettra à Kepler, quelques décennies plus



Le système solaire présenté par Copernic dans *De Revolutionibus* en 1543.

tard, de remplacer les orbites circulaires par des ellipses, ruinant ainsi la perfection géométrique revendiquée par Copernic.

Second paradoxe : il semble que les astronomes prénewtoniens s'intéressaient surtout à la description du mouvement des astres et non à leur cause physique. En réalité, Ptolémée avait considéré l'hypothèse que le mouvement apparent des étoiles puisse être dû à la rotation de la Terre et non à celle de la sphère céleste, avant de l'écarter sur la base d'une discussion physique (fausse). Ces arguments ont par la suite été contredits à plusieurs reprises, ce que rappelle Copernic. Toutefois, l'opposition entre ces modèles cosmologiques repose en partie sur un malentendu : il est vain de chercher à savoir qui, de la Terre ou du Soleil, est immobile, car l'immobilité est une notion relative. Ce concept de relativité sera mieux compris au siècle suivant, après Galilée.

D'un point de vue technique, le modèle de Copernic n'a pas franchement simplifié la description des mouvements célestes. Il comprenait au moins autant d'épicycles et de déférents que celui de Ptolémée, et les calculs proposés dans le *De Revolutionibus* sont complexes. Il faudra attendre que d'autres astronomes les simplifient et dressent des tables astronomiques pour que des éphémérides soient élaborées, dont le pouvoir prédictif ne surpasse que modestement ceux de Ptolémée (contrairement à celles établies après Kepler). En revanche, une avancée majeure du modèle de Copernic est l'ordre des planètes et la taille relative de leurs orbites, des quantités arbitraires dans la vision ptoléméenne. Cette propriété sera cruciale pour Kepler.

Un pied dans le Moyen Âge, un autre dans un futur dont il ne verra pas les promesses, Copernic a révolutionné l'astronomie sans révolutionner la physique : il a fourni un pivot sur lequel elle a pu basculer et se reconstruire. Il faudra attendre Kepler pour que cesse l'obsession du cercle, Galilée pour que germe l'idée de relativité du mouvement, puis Newton pour que les trajectoires des planètes soient étudiées en termes de forces de gravitation, et non de figures géométriques ayant tel ou tel mérite. C'est alors seulement que prend fin la science médiévale. ■



Richard TAILLET est professeur à l'université Savoie-Mont-Blanc et chercheur au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique (LAPTh). Il est l'auteur du blog Signal sur bruit (www.scilogs.fr/signal-sur-bruit).

Retrouvez tous nos blogueurs sur www.SciLogs.fr et suivez-les sur les réseaux sociaux.



LA MARCHÉ DES SCIENCES

DÉCOUVERTES, INVENTIONS, AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE

AURÉLIE LUNEAU
CHAQUE JEUDI
16H - 17H



© RADIO FRANCE / CHRISTOPHE ABRAMOWITZ

en partenariat avec **POUR LA
SCIENCE**

Écoute, réécoute, podcast
franceculture.fr



Le GPS de notre cerveau

May-Britt Moser et Edvard Moser



Le sens de l'orientation n'est pas un mythe : notre cerveau est bien doté d'un système de localisation et de navigation hors pair. La découverte récente de ce GPS biologique a valu le prix Nobel aux époux Moser, qui nous décrivent ici ce système et son fonctionnement élaboré.

L' invention du GPS (*Global Positioning System*, c'est-à-dire « système de localisation global ») a entièrement transformé notre capacité à conduire une voiture, à piloter un avion ou même à parcourir à pied les rues de la ville. Mais comment naviguions-nous avant d'avoir un appareil GPS ? De récents travaux ont montré que le cerveau des mammifères est doté d'un système de navigation incroyablement élaboré, qui nous guide d'un endroit à un autre.

Comme le GPS de nos téléphones et de nos voitures, notre cerveau évalue où nous sommes et où nous allons en intégrant des signaux multiples concernant notre position et le temps qui s'écoule. Normalement, le cerveau effectue ces calculs avec un minimum d'effort, de sorte que nous en avons à peine conscience. C'est seulement lorsque nous sommes perdus ou lorsque notre aptitude à naviguer est dégradée par une lésion ou une maladie neurodégénérative que nous prenons conscience de l'importance de ce système de cartographie et de navigation pour notre existence.

La capacité de savoir où nous sommes et où nous devons aller est essentielle à notre survie. Sans elle, nous-mêmes, comme tous les autres animaux, serions incapables de trouver de la nourriture et de nous reproduire.

Le caractère perfectionné du système utilisé par les mammifères ressort lorsqu'on le compare à celui d'autres animaux. Le petit ver nématode *Caenorhabditis elegans*, muni de seulement 302 neurones, navigue presque exclusivement en réaction à des signaux olfactifs, en suivant une concentration d'odeur croissante ou décroissante spatialement (un gradient d'odeur).

Les animaux dotés de systèmes nerveux plus élaborés, telles les fourmis du désert ou les abeilles domestiques, trouvent leur chemin à l'aide de stratégies supplémentaires. L'une de ces dernières s'appelle l'intégration du trajet. C'est un mécanisme similaire à celui du GPS, au cours duquel les neurones déterminent la position sur la base d'un suivi continu de la direction et de la vitesse du déplacement de l'animal par rapport à un point de départ. Cette tâche est effectuée sans référence à des indices externes, tels que des points de repère physiques.

Chez les vertébrés, et en particulier chez les mammifères, le répertoire des comportements qui permettent à un animal

de se repérer dans son environnement est encore plus étendu.

Plus que toute autre classe d'animaux, les mammifères s'appuient sur leur capacité à former des cartes neurales de leur environnement. Il s'agit de profils d'activité électrique dans le cerveau, où des groupes de cellules nerveuses s'activent de façon à refléter l'agencement du milieu environnant et la position qu'y occupe l'animal. On présume que la formation de ces cartes mentales a lieu principalement dans le cortex, cet ensemble de couches supérieures du cerveau qui forment des replis sinueux et qui sont apparues très tardivement dans l'évolution.

Au cours des dernières décennies, les scientifiques ont acquis une connaissance approfondie de la façon dont le cerveau forme ces cartes et les révisé quand l'animal se déplace. Les récents travaux, menés principalement chez des rongeurs, ont révélé que les systèmes de navigation sont constitués de plusieurs types de cellules spécialisées, qui calculent en permanence la position de l'animal, la distance qu'il a parcourue, la direction dans laquelle il avance et sa vitesse. L'ensemble de ces différentes cellules élabore ainsi une carte dynamique de l'espace local, qui non seulement fonctionne au présent, mais peut également être mémorisée pour une utilisation ultérieure.

L'ESSENTIEL

■ **Savoir se localiser et s'orienter est une capacité essentielle à la survie d'un animal.**

■ **Plusieurs réseaux de cellules profondément enfouis dans le cerveau se conjuguent pour établir une carte mentale de l'environnement, constituant ainsi un système de localisation.**

■ **Les régions cérébrales intervenant dans l'orientation sont aussi intimement liées à la création de souvenirs.**

■ **Chez les patients atteints de la maladie d'Alzheimer, ces réseaux d'orientation sont souvent touchés.**

Les neurosciences de l'espace

L'étude des cartes spatiales du cerveau a commencé avec Edward Tolman, un professeur de psychologie de l'université de Californie à Berkeley, de 1918 à 1954. Auparavant, des expériences de laboratoire sur le rat semblaient indiquer que les animaux trouvent leur chemin en répondant à des stimuli successifs le long de leur trajet et en les mémorisant. En apprenant à parcourir un labyrinthe, par exemple, ils étaient supposés se souvenir des séquences de virages qu'ils avaient effectués entre le point de départ du labyrinthe et son arrivée. Cependant, on n'envisageait pas que les animaux puissent se faire une image globale de la totalité du labyrinthe pour être à même de prévoir le meilleur chemin.

Tolman a radicalement rompu avec les idées prévalant alors. Il a observé des rats prenant des raccourcis ou faisant des détours, des comportements qui seraient

■ LES AUTEURS



May-Britt MOSER et Edvard I. MOSER sont professeurs de psychologie et de neurosciences à l'université norvégienne de science et technologie, à Trondheim. Ils sont lauréats du prix Nobel de physiologie ou médecine pour 2014, partagé avec l'Américano-Britannique John O'Keefe.

peu probables s'ils n'avaient appris qu'une longue séquence de réponses motrices. Sur la base de ces observations, il émit l'hypothèse que les animaux établissent des cartes mentales qui reflètent la géométrie spatiale de leur environnement. Ces cartes cognitives fournissaient aux animaux plus qu'une aide pour trouver leur chemin; elles semblaient également enregistrer des informations relatives aux événements vécus par les animaux en des endroits précis.

Les idées de Tolman, avancées pour la première fois vers 1930, sont restées controversées des décennies durant. Elles n'ont été acceptées que peu à peu, en partie parce qu'elles reposaient entièrement sur l'observation du comportement d'animaux de laboratoire, lequel était interprétable de diverses façons. Tolman ne disposait pas des concepts ou des outils nécessaires pour vérifier s'il existait réellement une carte interne de l'environnement dans le cerveau d'un animal.

Il a fallu attendre près de quarante ans avant que des études de l'activité neurale apportent une preuve directe de l'existence d'une telle carte. Dans les années 1950, grâce aux progrès dans le développement de microélectrodes, il est devenu possible d'enregistrer l'activité électrique de neurones individuels chez des animaux en état d'éveil. Ces électrodes très fines ont permis aux chercheurs d'identifier la décharge de neurones individuels, pendant que les animaux vquaient à leurs occupations. Une cellule « décharge » lorsqu'elle déclenche un potentiel d'action, une brève modification de la tension électrique qui parcourt la membrane cellulaire du neurone. Des potentiels d'action provoquent la libération par les neurones de molécules de neurotransmetteurs, qui véhiculent les signaux d'un neurone à un autre.

John O'Keefe, de l'University College de Londres, a utilisé des microélectrodes pour mesurer chez des rats les potentiels d'action dans l'hippocampe, une région du cerveau connue depuis des décennies pour son importance dans les fonctions de mémorisation. En 1971, il annonça que des neurones s'y activaient lorsqu'un rat placé dans une boîte restait un certain temps en un endroit donné; il a donc nommé ces

neurones « cellules de lieu ». John O'Keefe a observé que différentes cellules de lieu s'activaient en différents endroits dans la boîte et que le schéma des cellules activées formait, collectivement, une carte des différents endroits de la boîte. On pouvait lire grâce aux électrodes l'activité combinée de nombreuses cellules de lieu et, ainsi, identifier l'endroit précis où se trouvait l'animal à un instant donné. En 1978, John O'Keefe et son collègue Lynn Nadel ont suggéré que les cellules de lieu faisaient en fait partie intégrante de la carte cognitive que Tolman avait envisagée.

Des positions codées dans l'hippocampe

La découverte des cellules de lieu a ouvert une fenêtre sur les parties les plus profondes du cortex, dans les régions les plus éloignées des cortex sensoriels (celles qui reçoivent les signaux des organes des sens) et du cortex moteur (qui émet les signaux déclenchant ou contrôlant le déplacement). À la fin des années 1960, lorsque John O'Keefe débutait ses travaux, la compréhension des instants auxquels les neurones étaient actifs ou inactifs se limitait aux cortex sensoriels primaires, régions du cerveau où l'activité neurale est contrôlée directement par des signaux sensoriels entrants tels que la lumière, le son et le toucher.

À l'époque, les neurobiologistes conjecturaient que l'hippocampe était trop éloigné des organes sensoriels pour traiter leurs informations de quelque manière qui pût être facilement comprise à partir d'un enregistrement par des microélectrodes. La découverte dans l'hippocampe de cellules créant une carte de l'environnement immédiat d'un animal a totalement démenti cette hypothèse.

Bien que la découverte fût remarquable et qu'elle suggérât que les cellules de lieu jouaient un rôle dans la navigation, personne ne savait quel pouvait être ce rôle, une ignorance qui a persisté des décennies. Les cellules de lieu se trouvaient dans une région de l'hippocampe nommée CA1, qui était le dernier relais d'un circuit commençant ailleurs dans l'hippocampe. On a émis l'hypothèse que les cellules de lieu recevaient un grand nombre des informations essentielles relatives à la navigation en provenance d'autres régions de l'hippocampe.

Au tournant du millénaire, nous avons tous deux décidé d'étudier plus en détail

cette idée dans le nouveau laboratoire que nous avons créé à l'université norvégienne des sciences et technologies, à Trondheim. Cette recherche nous a finalement conduits à une découverte majeure.

En collaboration avec Menno Witter et quelques étudiants astucieux, nous avons commencé par utiliser des microélectrodes pour suivre l'activité de cellules de lieu dans l'hippocampe de rats, après avoir perturbé une partie d'un circuit neuronal hippocampique, connu pour leur fournir des informations. Nous nous attendions à ce que cela confirme que ce circuit était important pour le bon fonctionnement des cellules de lieu. À notre grande surprise, les neurones terminaux de ce circuit, situés dans la région CA1, continuaient à décharger lorsque les animaux arrivaient en des endroits précis.

La conclusion inéluctable était que les cellules de lieu ne dépendaient pas de ce circuit hippocampique interne pour déterminer les positions d'un animal. Nous avons alors porté notre attention sur la seule voie neurale qui avait été épargnée par notre intervention : les connexions directes entre la région CA1 et le cortex entorhinal, une région contiguë qui sert d'interface avec le reste du cortex.

Des neurones actifs aux nœuds d'un réseau

En 2002, nous avons inséré des microélectrodes dans le cortex entorhinal, toujours en collaboration avec Menno Witter, et nous avons procédé à l'enregistrement lorsque les animaux effectuaient des tâches similaires à celles que nous avons utilisées lors de nos études des cellules de lieu. Nous avons placé des électrodes dans une région du cortex entorhinal présentant des connexions directes avec les parties de l'hippocampe où des cellules de lieu avaient été enregistrées dans presque toutes les études antérieures aux nôtres.

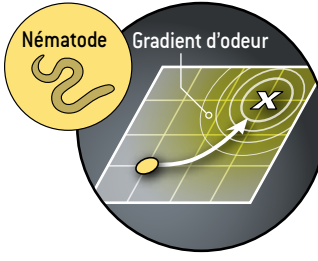
Nous avons constaté que de nombreuses cellules du cortex entorhinal déchargeaient lorsqu'un animal se trouvait en un endroit particulier de l'enceinte, comme c'est le cas pour les cellules de lieu dans l'hippocampe. Toutefois, contrairement à une cellule de lieu, une cellule individuelle du cortex entorhinal déchargeait non seulement en un endroit visité par un rongeur, mais en de nombreux endroits.

La propriété la plus frappante de ces cellules était cependant la manière dont

COMMENT LES ANIMAUX S'ORIENTENT

Pour survivre, un animal, quelle que soit l'espèce à laquelle il appartient, doit être capable de tenir compte du milieu environnant et de déterminer, ne serait-ce que grossièrement, à quel endroit il se trouve et où il doit aller. L'évolution a fait apparaître chez certaines espèces des systèmes dits d'intégration du trajet, qui permettent à l'animal d'effectuer cette tâche sans avoir besoin de localiser l'endroit où il se trouve par rapport à des repères externes. Les mammifères ont trouvé une solution encore plus élaborée, qui met en jeu des cartes mentales internalisées.

Simple

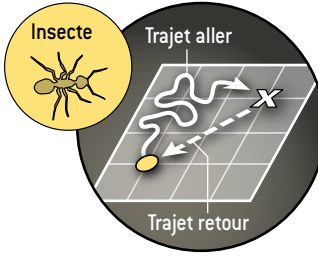


Nématode

Gradient d'odeur

En suivant une odeur

Le petit ver nématode *Caenorhabditis elegans* présente peut-être le système de navigation animal le plus rudimentaire. Son monde est organisé en fonction des odeurs. Équipé de seulement 302 neurones, ce ver avance droit devant lui vers une source de nourriture en suivant une odeur dont l'intensité augmente.



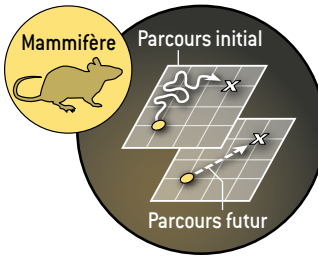
Insecte

Trajet aller

Trajet retour

Un GPS interne

L'évolution a même équipé certains insectes de capacités de navigation élaborées. Ils peuvent déterminer de façon interne leur vitesse et la direction par rapport à un point de départ. Cela leur permet de trouver un itinéraire plus efficace, par exemple un retour en ligne droite au lieu des zigzags effectués à l'aller.



Mammifère

Parcours initial

Parcours futur

Des cartes mentales

Les mammifères ont acquis au fil de l'évolution des capacités d'orientation encore plus complexes. Leur système de localisation fait intervenir la décharge de neurones cérébraux par séquences reflétant les trajectoires suivies. Ces neurones élaborent ainsi des cartes mentales du monde physique. Les animaux mémorisent des trajets et utilisent ces souvenirs pour planifier leurs déplacements.

Complex

elles déchargeaient. Leur profil d'activité n'est devenu évident à nos yeux qu'en 2005, lorsque nous avons agrandi l'enceinte de l'expérience. Nous avons alors trouvé que les divers endroits où une cellule entorhinal déchargeait formaient les nœuds d'un réseau d'hexagones (plus précisément, un réseau triangulaire dessinant des hexagones). Autrement dit, lorsque l'animal passait par l'un des points du réseau, la

cellule, que nous avons nommée cellule de grille, déchargeait.

Les hexagones, qui recouvraient la totalité de l'enceinte, constituaient les unités individuelles d'un réseau ou d'une grille, un peu comme le réseau de carrés formé par les lignes de coordonnées sur une carte routière. Le profil de décharge suggérait que les cellules de grille, à la différence des cellules de lieu, fournissent

des informations relatives à la distance et à la direction, aidant ainsi un animal à connaître sa trajectoire à partir d'indices internes relatifs aux mouvements de son corps, sans référence à des informations fournies par l'environnement.

Plusieurs aspects de la grille changeaient également quand nous examinons l'activité des cellules dans différentes parties du cortex entorhinal. Dans la partie dorsale, près du sommet de cette structure, les cellules avaient un profil d'activité correspondant à une grille de l'enceinte formée d'hexagones peu espacés. La taille des hexagones (ou le pas du réseau) augmentait par étapes successives – ou modules – à mesure qu'on allait vers la partie inférieure ou ventrale du cortex entorhinal. Dans chaque module, les éléments hexagonaux de la grille présentaient un espacement propre.

Des réseaux au pas de plus en plus grand

On pouvait déterminer le pas du réseau dans les modules successifs, de haut en bas, en multipliant le pas du réseau correspondant au module précédent par un facteur d'environ 1,4, soit à peu près la racine carrée de 2. Un rat dont s'activait une cellule de grille du module situé au sommet du cortex entorhinal, lorsque l'animal se trouvait à l'un des nœuds du réseau, devait parcourir 30 à 35 centimètres jusqu'au nœud voisin. Dans le module suivant, le rat devait parcourir 42 à 49 centimètres. Et ainsi de suite. Dans le module le plus bas, la distance entre deux nœuds successifs du réseau d'hexagones atteignait plusieurs mètres de longueur.

Nous étions enthousiasmés par les cellules de grille et cet ordre sous-jacent à leur activité. Dans la plupart des parties du cortex, les profils de décharge des neurones paraissent chaotiques et inaccessibles. Ici, en revanche, dans les profondeurs du cortex, on avait un système de cellules s'activant selon un schéma prévisible et ordonné. Nous étions impatients d'en savoir plus, mais ces cellules et les cellules de lieu n'étaient pas les seules en jeu dans la cartographie du monde des mammifères : d'autres surprises nous attendaient.

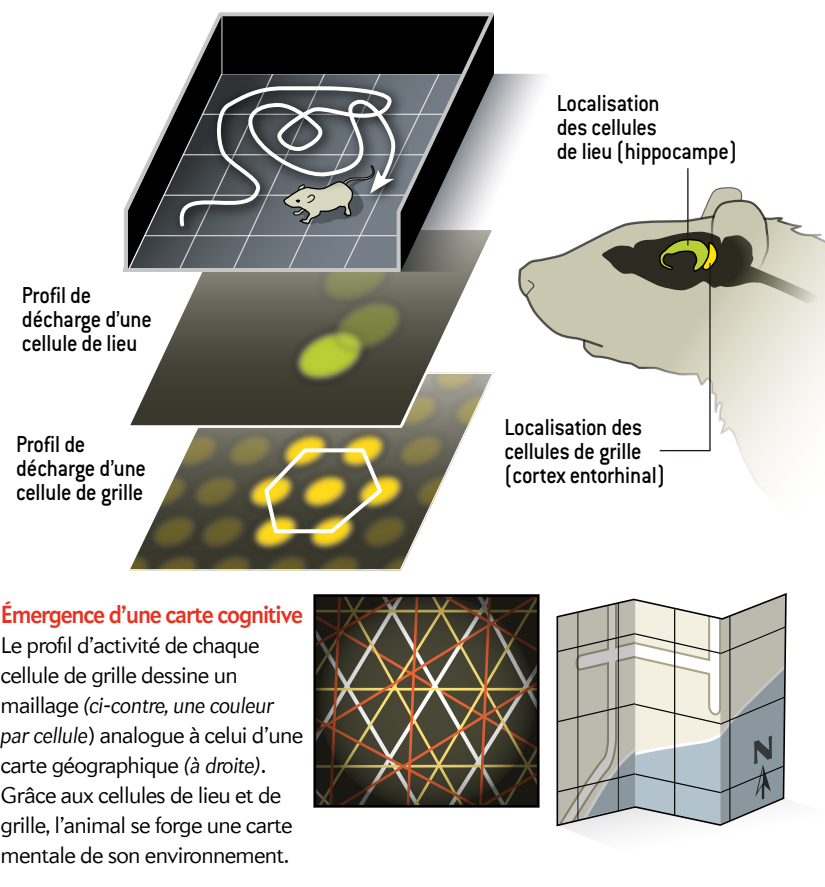
Vers le milieu des années 1980 et au début des années 1990, James Ranck, du centre médical Downstate de New York, et Jeffrey Taube, aujourd'hui au Dartmouth

College, ont décrit des cellules qui déchargeaient lorsque le rongeur était orienté dans une direction particulière. James Ranck et Jeffrey Taube avaient découvert ces « cellules de direction de la tête » dans le présubiculum, une autre région du cortex adjacente à l'hippocampe.

Nos études ont montré que ces cellules étaient aussi présentes dans le cortex entorhinal, mélangées à des cellules de grille. Beaucoup d'entre elles fonctionnaient aussi comme des cellules de grille : les endroits

COMMENT LE CERVEAU PREND SES REPÈRES

L'idée que le cerveau des mammifères forge une carte mentale qui reflète la géométrie spatiale du milieu où se trouve l'animal a été proposée vers 1930. Les neurobiologistes ont par la suite identifié des réseaux de cellules qui fonctionnent de concert pour dresser ces cartes. Une avancée majeure a eu lieu en 1978, quand John O'Keefe a découvert que des « cellules de lieu » dans l'hippocampe du rat s'activent lorsque l'animal se trouve en certains endroits particuliers. En 2005, les auteurs (May-Britt et Edvard Moser) ont découvert des cellules de grille, qui permettent à l'animal de déterminer l'endroit où il se trouve, disons par rapport aux murs d'une enceinte. Chaque cellule de grille décharge en plusieurs endroits qui correspondent à des sommets d'hexagones.



D'après O. Klein et H. Forssberg, avec illustrations de M. Karlen. "Scientific background: The brain's navigational place and grid cell system." www.nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates2014/advanced.html

de l'enceinte où elles déchargeaient formaient eux aussi une grille, mais ces cellules ne s'y activaient que lorsque le rat était face à une direction donnée. Ces cellules semblaient servir de boussole à l'animal ; leur suivi permettait de lire la direction, par rapport au milieu environnant, à laquelle l'animal faisait face à n'importe quel moment.

Quelques années plus tard, en 2008, nous avons découvert un autre type de cellules dans le cortex entorhinal. Ces « cellules de bordure » déchargeaient chaque fois que l'animal s'approchait d'un mur, d'un bord de l'enceinte ou d'une quelconque cloison. Ces cellules semblaient calculer à quelle distance d'une frontière se trouvait l'animal. Cette information pourrait être utilisée par des cellules de grille pour estimer de combien l'animal s'est éloigné du mur et pourrait aussi faire office de point de référence pour rappeler par la suite au rat où se trouvent les murs.

Enfin, en 2015, des cellules du cortex entorhinal d'un quatrième type sont entrées en scène. Elles réagissent spécifiquement à la vitesse de déplacement de l'animal, indépendamment de sa position ou de sa direction. Les rythmes de décharge de ces neurones augmentent proportionnellement à la vitesse de déplacement. Nous pouvions en effet établir à quelle vitesse se déplaçait un animal à un instant donné en observant les fréquences de décharge d'un tout petit nombre de « cellules de vitesse ». En combinaison avec les cellules de direction de la tête, les cellules de vitesse fourniraient ainsi aux cellules de grille des informations mises à jour en permanence sur le déplacement de l'animal (sa vitesse, sa direction et la distance qui le sépare de son point de départ).

Des cellules de grille aux cellules de lieu

Si nous avons découvert les cellules de grille, c'est parce que nous souhaitions mettre au jour les signaux qui permettent aux cellules de lieu de fournir aux mammifères une image interne de leur environnement. Nous savons désormais que, quand le cerveau tente de déterminer le trajet emprunté, les cellules de lieu intègrent

Au moins quatre types de cellules interviennent dans le système d'orientation

■ SUR LE WEB

Vidéo montrant l'activité d'une cellule de grille du cortex entorhinal et qui finit par dessiner un motif hexagonal : <https://www.youtube.com/watch?v=i9GiLBXWAHI>

les signaux provenant de différents types de cellules présentes dans le cortex entorhinal. Cependant, même ces processus ne nous apprennent pas tout sur la façon dont s'orientent les mammifères.

Initialement, nos travaux ont porté sur la partie centrale et médiane du cortex entorhinal. Les cellules de lieu peuvent aussi recevoir des signaux du cortex entorhinal latéral, qui relaie des données provenant de plusieurs systèmes sensoriels, notamment des informations relatives à l'odeur et à l'identité des objets. En intégrant les données en provenance des parties médianes et latérales du cortex entorhinal, les cellules de lieu interprètent les signaux venant de l'ensemble du cerveau.

L'interaction complexe des signaux arrivant dans l'hippocampe et la création de souvenirs spécifiques des lieux qui s'ensuit est encore en cours d'étude par notre équipe et d'autres, et ces recherches dureront sans doute de nombreuses années.

Des cartes changeantes

L'une des façons de commencer à comprendre comment les cartes spatiales associées au cortex entorhinal médian et à l'hippocampe se combinent pour aider l'animal à s'orienter est de se demander quelles sont les différences entre les cartes. John Kubie et Robert Muller, au centre médical Downstate, ont montré dans les années 1980 que les cartes établies par les cellules de lieu de l'hippocampe changent totalement quand l'animal se retrouve dans un nouvel environnement, même lorsque celui-ci ne diffère du précédent que par la couleur.

Des expériences ont été réalisées dans notre laboratoire avec des rats qui parcouraient jusqu'à onze enceintes dans une série de pièces différentes. Elles ont montré qu'en fait, chaque pièce engendre rapidement sa propre carte indépendante, étayant ainsi l'idée selon laquelle l'hippocampe forme des cartes spatiales faites sur mesure en fonction de l'environnement.

En revanche, les cartes forgées par le cortex entorhinal médian sont universelles. Les cellules de grille qui déchargent ensemble en un groupe particulier d'endroits, déchargent aussi en des positions

analogues sur la carte d'un autre environnement, comme si les lignes de latitude et de longitude de la première carte étaient transposées sur le nouveau décor. Il en est de même pour les cellules de bordures et celle de direction de la tête. Par exemple, la séquence de cellules qui se sont activées quand l'animal s'est dirigé vers le nord-est dans l'une des pièces de la cage se répète lorsque le rat avance dans cette même direction dans l'autre pièce. Le profil d'activité des cellules du cortex entorhinal est l'élément que le cerveau utilise pour naviguer dans les différents environnements.

Ces codes sont ensuite transmis du cortex entorhinal à l'hippocampe, où ils sont utilisés pour établir des cartes spécifiques d'un endroit donné. Du point de vue de l'évolution, l'élaboration de deux ensembles de cartes qui intègrent leurs informations pour guider les animaux semble constituer une solution économique pour un système d'orientation spatiale. Les réseaux que construit le cortex entorhinal médian pour mesurer la distance et la direction ne changent pas d'une pièce à l'autre. En revanche, les cellules de lieu de l'hippocampe créent des cartes particulières à chacune des pièces.

Plusieurs cartes locales

La compréhension du système neural de navigation reste un chantier ouvert. Presque toutes nos connaissances sur les cellules de lieu et de grille ont été acquises au moyen d'expériences où l'on enregistre l'activité électrique des neurones quand l'animal se déplace au hasard dans des environnements très artificiels, tels que des boîtes à fond plat et dépourvues de structures internes pouvant servir de points de repère.

Un tel environnement de laboratoire diffère considérablement des environnements naturels, qui changent en permanence et contiennent de nombreux objets tridimensionnels. Les cellules de lieu et les cellules de grille déchargent-elles de la même façon quand les animaux se trouvent dans le milieu naturel ?

Le système de navigation

est couplé à la mémoire et associe des souvenirs aux lieux visités par l'animal

Des expériences réalisées avec des labyrinthes complexes qui tentent d'imiter l'habitat naturel des animaux fournissent quelques indices. En 2009, nous avons enregistré le comportement de cellules de grille pendant que des animaux se déplaçaient dans un tel labyrinthe, où ils rencontraient un virage en épingle à cheveux à la fin de chaque allée, qui marquait le début du couloir suivant. L'étude a montré, comme prévu, que les endroits du labyrinthe où s'activaient les cellules de grille formaient des réseaux d'hexagones permettant de baliser le parcours dans une allée du labyrinthe. Mais chaque fois qu'un animal tournait pour emprunter l'allée suivante, une transition brutale avait lieu. Un motif de grille distinct se surimposait alors sur la nouvelle allée, presque comme si le rat entrait dans une pièce totalement différente.

Des travaux ultérieurs menés dans notre laboratoire ont montré que les cartes de grille se subdivisent également en cartes plus petites dans des environnements ouverts, si ces espaces sont suffisamment grands. Nous cherchons maintenant à comprendre comment ces cartes plus petites fusionnent pour former une carte intégrée d'une zone donnée.

Même ces expériences sont trop simplifiées, car les enceintes sont plates et horizontales. Des expériences réalisées dans

d'autres laboratoires, consistant à observer des chauves-souris en vol et des rats qui grimpent en divers endroits de leur cage, commencent à fournir quelques indices : les cellules de lieu et les cellules de direction de la tête semblent décharger en des endroits particuliers dans tout espace tridimensionnel, et il est très probable que les cellules de grille en fassent autant.

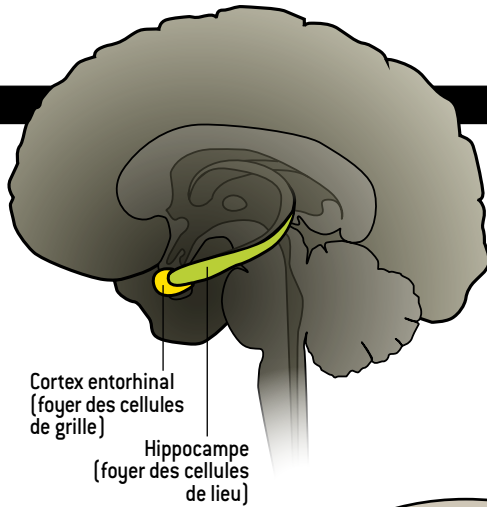
Le système de navigation de l'hippocampe apporte aux animaux bien plus qu'une simple aide pour aller d'un point A à un point B. Outre la réception de données sur la position, la distance et la direction envoyées par le cortex entorhinal médian, l'hippocampe enregistre ce qu'il y a en un endroit donné ainsi que les événements qui y surviennent. La carte spatiale créée par les cellules de lieu ne contient donc pas seulement des informations de positions, mais aussi des détails sur le vécu de l'animal à ces endroits, comme dans la conception de Tolman d'une carte cognitive.

Certaines de ces informations supplémentaires semblent provenir de neurones situés dans la partie latérale du cortex entorhinal. Des informations sur les objets fusionnent avec les positions de l'animal et sont mémorisées. Ce couplage entre lieu et mémoire rappelle une stratégie de mémorisation inventée par les Grecs et les Romains de l'Antiquité. La « méthode des *loci* » permet à une personne de mémoriser une liste d'objets en s'imaginant déposer chaque objet en un endroit précis le long d'un trajet bien connu dans un certain lieu, par exemple un paysage ou un bâtiment, ce qu'on appelle souvent un « palais de la mémoire ». Les participants à des concours de mémoire utilisent encore cette technique pour se souvenir de longues listes de nombres, lettres ou cartes à jouer.

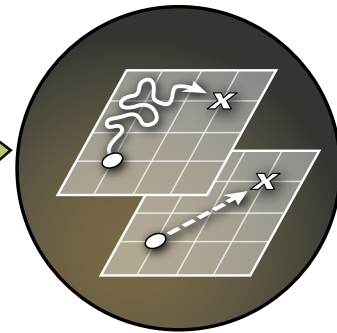
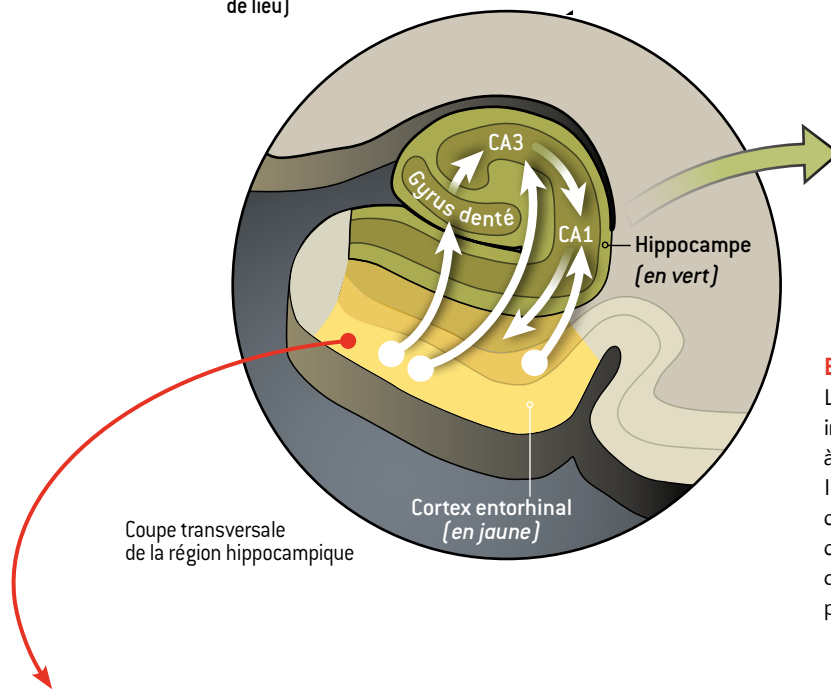
Quand le cortex entorhinal décline

Le cortex entorhinal figure malheureusement parmi les premières régions à décliner chez les personnes souffrant de la maladie d'Alzheimer. La maladie y provoque la mort de cellules cérébrales et une réduction de sa taille est considérée comme un critère fiable d'identification des sujets à risque. La tendance à errer et à se perdre

PLONGÉE À L'INTÉRIEUR DU GPS CÉRÉBRAL



Le système neural de navigation spatiale du cerveau humain est localisé dans les profondeurs d'une région nommée lobe temporal médian. Deux sous-régions, le cortex entorhinal et l'hippocampe, constituent des composantes clés du GPS cérébral. Dans le cortex entorhinal, des réseaux de plusieurs types de cellules spécialisées contribuent à la complexité du système de localisation des mammifères.

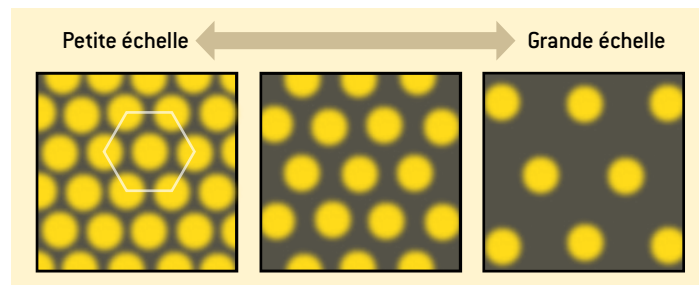


Envoi de messages à l'hippocampe

Le cortex entorhinal transmet des informations des cellules de grille relatives à la direction et à la distance parcourue. Il le fait en envoyant des signaux le long de plusieurs voies vers des sous-régions de l'hippocampe (le gyrus denté, CA3 et CA1), qui créent une carte mentale optimisée pour prévoir de futurs trajets.

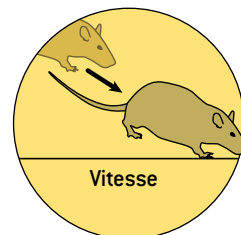
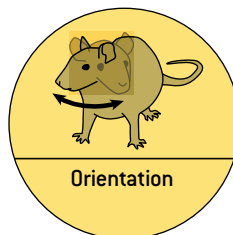
Chaque cellule de grille s'active quand...

... la position de l'animal correspond à l'un des nœuds d'un réseau dessiné par des hexagones. Le pas du réseau change entre le haut et le bas du cortex entorhinal. Un pas plus grand correspond à une distance plus longue que doit parcourir le rat entre deux activations de la cellule de grille. Dans le haut du cortex entorhinal, une cellule de grille s'active à nouveau lorsque le rat a parcouru 30 à 35 centimètres pour atteindre un nœud voisin. Dans le bas du cortex entorhinal, deux activations successives correspondent à un pas de plusieurs mètres.



D'autres cellules spécialisées récemment découvertes...

... dans le cortex entorhinal de rongeurs véhiculent des informations vers l'hippocampe, sur l'orientation de la tête de l'animal, sa vitesse de déplacement et la distance jusqu'aux murs et d'autres obstacles rencontrés. L'hippocampe intègre alors toutes ces données pour créer une carte composite de l'environnement de l'animal.



Cellules de grille : l'espace... et le temps aussi

Les cellules de grille s'activent lorsque la position de l'animal coïncide avec l'un des nœuds d'un réseau périodique constitué d'hexagones. De ce fait, elles jouent un rôle clé dans l'orientation spatiale de l'animal. Une étude publiée en novembre 2015 par Benjamin Kraus et ses collègues, à l'université de Boston, montre que les cellules de grille sont aussi fortement impliquées dans l'intégration des informations temporelles.

Ces chercheurs ont enregistré sur des rats l'activité de cellules de grille pendant que les rongeurs parcouraient un petit labyrinthe simple en forme de 8, où l'un des tronçons était un tapis roulant sur lequel les animaux couraient en faisant du sur

place. Le tapis roulant, de vitesse réglable, fonctionnait pendant une durée fixe (16 secondes) ou roulait pendant une durée telle que la distance parcourue soit fixe (70 mètres). Les enregistrements au cours de différentes sessions expérimentales ont montré

que, lorsque les rats se trouvaient sur le tapis roulant, la quasi-totalité des cellules de grille présentaient un rythme élevé de décharge soit à des instants particuliers, soit pour certaines valeurs de la distance parcourue sur le tapis roulant. Le parcours des rats sur le tapis roulant se déroulant dans un cadre visuel constant, Benjamin Kraus et ses collègues concluent que les cellules de grille fournissent une représentation du temps écoulé et de la distance parcourue qui est indépendante des repères externes dont l'animal peut disposer.

figure aussi parmi les premiers indicateurs de la maladie.

Aux stades plus avancés de la maladie d'Alzheimer, des cellules de l'hippocampe meurent, ce qui conduit à une incapacité à se souvenir d'expériences vécues ou de concepts tels que les noms des couleurs. En fait, une étude récente a apporté des preuves que même des personnes jeunes portant un gène qui leur fait courir un risque élevé de développer la maladie d'Alzheimer présentent parfois des défauts de fonctionnement de leurs réseaux de cellules de grille, une découverte susceptible d'inspirer de nouvelles méthodes pour diagnostiquer la maladie.

Aujourd'hui, plus de quatre-vingts ans après que Tolman a proposé pour la première fois l'existence d'une carte mentale de notre environnement, il est clair que les cellules de lieu ne sont que l'une des composantes d'une représentation complexe que le cerveau se fait de son environnement spatial pour calculer la position, la distance, la vitesse et la direction. Les nombreux types cellulaires découverts dans le système d'orientation et de navigation du cerveau de rongeurs sont également présents chez les chauves-souris, les singes et les êtres humains. Leur existence dans plusieurs ordres taxinomiques de mammifères suggère que les cellules de grille et d'autres intervenant

dans la navigation sont apparues tôt au cours de l'évolution des mammifères et que des processus neuraux similaires servent à l'orientation chez de nombreuses espèces.

Bon nombre des éléments constituant la carte conjecturée par Tolman ont été découverts et nous commençons à comprendre comment le cerveau les crée et les déploie. La représentation spatiale est devenue l'un des circuits les mieux connus du cortex des mammifères et les algorithmes sous-jacents sont en cours d'identification, ce qui aidera à déchiffrer les codes neuraux que le cerveau utilise pour l'orientation et la navigation.

Des cartes géantes pour les migrants ?

Comme dans beaucoup d'autres domaines de la science, de nouveaux résultats soulèvent de nouvelles questions. Nous savons désormais que le cerveau dispose d'une carte interne, mais il nous reste à mieux comprendre comment les éléments de la carte fonctionnent de concert pour produire une représentation cohérente de la localisation et comment les informations sont lues par d'autres systèmes du cerveau pour prendre des décisions quant au lieu de destination et à la manière de s'y rendre.

De nombreuses autres questions se posent. Le réseau spatial associé à l'hippocampe et au cortex entorhinal est-il limité à la navigation dans l'espace local ? Avec les rongeurs, nous examinons des zones qui ne font que quelques mètres de rayon. Les cellules de lieu et de grille servent-elles également aux déplacements sur de longues distances, comme lorsque les chauves-souris migrent sur des centaines ou milliers de kilomètres ?

Enfin, nous nous demandons comment les cellules de grille se forment, s'il existe une période critique de formation pour les cellules de grille au cours du développement d'un animal et s'il existe des cellules de lieu et de grille chez d'autres animaux vertébrés ou invertébrés. Si les invertébrés sont aussi équipés de ces cellules, cela impliquerait que l'évolution a créé ce système de cartographie spatiale il y a des centaines de millions d'années. Le système de localisation et d'orientation dont est doté le cerveau continuera à produire une mine précieuse de sujets pour de nouvelles recherches, qui occuperont des générations de scientifiques dans les décennies à venir. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

B. J. Kraus *et al.*, *During running in place, grid cells integrate elapsed time and distance run*, *Neuron*, vol. 88, pp. 578-589, 2015.

E. I. Moser *et al.*, *Grid cells and cortical representation*, *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 15 (7), pp. 466-481, 2014.

E. I. Moser, *Grid cells and the entorhinal map of space*, conférence de réception du prix Nobel, 7 décembre 2014 (<http://bit.ly/1WPRGPt>).

M.-B. Moser, *Grid cells, place cells and memory*, conférence de réception du prix Nobel, 7 décembre 2014 (<http://bit.ly/1wBRVvt>).

DOSSIER POUR LA SCIENCE

GÉOMÉTRIE

Triangle, rectangle, cercle... Ils n'ont pas livré tous leurs secrets.

FRACTALES

À quoi ressemblent-elles ?
transformé en un tore
toutes les longueurs sont
conservées ?

Actuellement
en kiosque

DOSSIER POUR LA SCIENCE - MATHÉMATIQUES - GÉOMÉTRIE - DESIGN - MORPHOGENÈSE - FRACTALES

Quand les MATHS prennent formes

Formes
élémentaires

Fractales

Naissance
des formes

AVANT-PROPOS
DE CÉDRIC
VILLANI



N° 91 Avril-Juin 2016

pouirlascience.fr

BEL : 8,5 € - CAN : 12,5 \$ CAD - DOMS : 1,9 € - ESP : 1,5 € - FR : 7,50 € - GR : 1,5 € - IRL : 1,5 € - IT : 1,5 € - JAP : 150 ¥ - KOR : 1,5 € - LUX : 8,5 € - MAR : 100 MAD - MEX : 220 MXN - NLD : 1,5 € - NOR : 12,50 NOK - PAK : 1,5 € - PER : 1,5 € - POL : 1,5 € - PRT : 1,5 € - RUS : 1,5 € - SLO : 1,5 € - SLOV : 1,5 € - SWE : 1,5 € - SWI : 1,5 € - TUR : 1,5 € - UK : 1,5 € - USA : 1,5 \$

N° 91 - 120 pages - prix de vente : 7,50 €

www.pouirlascience.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

LES MULTIPLES VISAGES DE LA MATIÈRE NOIRE

Bogdan Dobrescu et Don Lincoln

Pourquoi n'a-t-on toujours pas détecté la matière noire, censée être majoritaire dans l'Univers ? Parce qu'elle n'existe pas ? Ou parce qu'elle est bien plus complexe qu'on ne le pensait, comme le proposent de nouveaux modèles ?



LA GALAXIE D'ANDROMÈDE, comme la plupart des galaxies spirales, tourne trop vite sur elle-même pour que la force gravitationnelle due à sa matière visible assure sa cohésion. Pour expliquer cette rotation rapide, les physiciens supposent que la galaxie est pimbée d'un halo sphérique de matière noire, une substance abondante dans l'Univers mais qui échappe à toute détection directe.