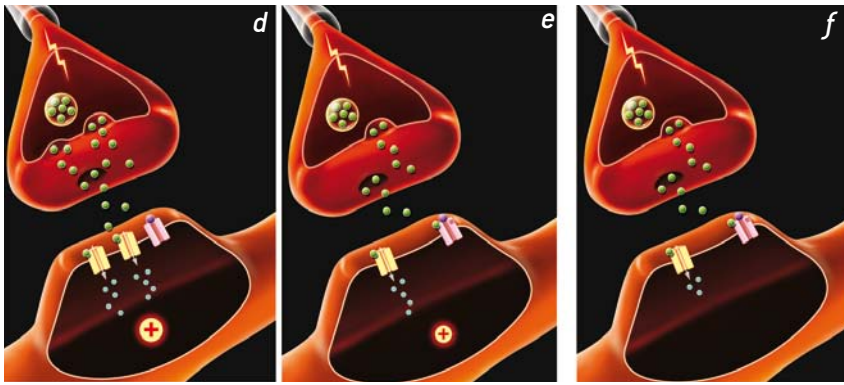




transcription, c'est-à-dire la production de ces ARN messagers. Différentes enzymes, des kinases, servent de signaux transmis de la synapse jusqu'au noyau, où a lieu la production de nouveaux ARN. Simultanément, les synapses activées par une potentialisation ou inhibées par une dépression produisent un marqueur, ou tag. Les ARN messagers et les protéines nouvellement produits par le noyau sont redirigés vers les synapses et capturés spécifiquement par celles qui sont « taguées ». On ignore encore la nature précise de ces « tags ».

Différents niveaux de codage

La mémoire nécessite donc plusieurs niveaux de codage : le niveau moléculaire, qu'il s'agisse des neurotransmetteurs, des canaux récepteurs responsables de la dépolarisation, ou des tags signalant les synapses dont le fonctionnement est modifié. Le codage peut se faire aussi à un niveau supérieur, morphologique, par exemple avec la formation de boutons synaptiques, mais aussi à l'échelle des dendrites. On a longtemps admis que les dendrites étaient des éléments passifs qui servaient seulement à faire la somme des entrées excitatrices et inhibitrices, et à déclencher un potentiel d'action au niveau du segment initial de l'axone quand la somme était adéquate. Mais la surface des dendrites porte aussi des canaux sodium, potassium et calcium voltage-dépendants et des récepteurs NMDA qui en font des éléments actifs, capables de produire des potentiels d'action localisés dans les dendrites.

De plus, l'intégration d'une information (somme des excitations et des inhibitions) ne se fait pas de la même façon tout le long d'une même branche dendritique,

ce qui suggère l'existence de sous-unités dendritiques pouvant intégrer les entrées indépendamment (ou presque) les unes des autres. Chaque branche dendritique peut faciliter la plasticité des synapses activées par une information, la création de nouvelles synapses et leur renforcement à long terme. Les dendrites, par les milliers de synapses qu'elles portent, représentent un niveau de codage de l'information plus riche que le codage moléculaire.

Franchissons un niveau supplémentaire : des informations quasi simultanées pourraient être codées par des groupes (ou clusters) particuliers de synapses portés par des dendrites communes. Inversement, les informations mémorisées qui sont séparées par de longs intervalles de temps seraient plutôt codées par des clusters de synapses portés par des branches dendritiques différentes, voire des neurones différents, d'après Athanasia Papoutsis et ses collègues de la Fondation pour la recherche et la technologie, à Héraklion, en Crète. Cette hypothèse a été confortée par le modèle proposé par Robert Legenstein et Wolfgang Mass, de l'Université de technologie de Graz, en Autriche, montrant qu'un neurone peut s'auto-organiser pour stocker des informations différentes sur différentes dendrites.

Ainsi, l'apprentissage et la mémorisation reposent sur la création et le maintien de réseaux de neurones. Pour étudier le fonctionnement de ces réseaux, il faut pouvoir enregistrer simultanément l'activité d'un grand nombre de neurones et être capable d'analyser leurs interactions. L'équipe de Joe Tsien, de l'Université Georgie des sciences de la santé, aux États-Unis,

a développé un dispositif pour enregistrer simultanément l'activité individuelle de plus de 250 neurones dans une aire spécifique de l'hippocampe d'une souris libre de ses mouvements (rappelons que l'hippocampe est une aire essentielle pour les mécanismes de mémorisation).

Ces neurobiologistes ont soumis les animaux à différentes expériences comportementales, par exemple un jet d'air, une chute dans une boîte ou une secousse dans une cage. Ces événements sont stockés dans la mémoire épisodique de la souris qui dépend de l'hippocampe. En analysant l'activité des neurones de l'hippocampe lors de ces différentes situations, il est apparu un patron d'activité cellulaire spécifique à chaque situation, c'est-à-dire que pour chaque événement, différents ensembles de neurones de l'aire étudiée sont activés. Ces différents réseaux de neurones sont nommés « cliques neuronales ». Un neurone n'appartient qu'à une seule clique, et les neurones d'une même clique ont la même activité lors d'un événement spécifique. Dans ce modèle, la clique est donc l'unité fondamentale de codage. Chaque clique correspond à un aspect plus ou moins précis d'un événement, et les cliques sont organisées de façon hiérarchique, de la plus générale à la plus spécifique.

Un événement serait donc toujours composé du même ensemble de cliques (un grand réseau de neurones composé de réseaux plus petits codant différentes informations). Par exemple, dans l'expérience menée par J. Tsien, il y a une clique spécifique d'un mouvement perturbateur, une pour

LA POTENTIALISATION À LONG TERME renforce les signaux, tandis que la dépression à long terme réduit le bruit de fond : le rapport signal sur bruit est amélioré et le système plus efficace.

un tremblement et une autre encore pour un tremblement dans une boîte noire. Selon ce modèle, une clique est soit active (1), soit inactive (0) : chaque événement serait représenté par un code mnésique binaire. De plus, de nouvelles « cliques » peuvent apparaître et se réorganiser selon les expériences du sujet, grâce aux phénomènes de plasticité synaptique.

Progressons encore d'un niveau vers le macroscopique. L'apprentissage d'une

information ou son rappel nécessite la communication et la coordination de cliques intra- et interstructures. Or quand de vastes cliques déchargent simultanément, le courant résultant peut être détecté sur le cuir chevelu quand on enregistre l'activité par électroencéphalographie, EEG. La communication entre les cliques est probablement liée aux oscillations cérébrales. Celles-ci apparaissent quand on enregistre l'activité globale moyenne d'une structure cérébrale.

Ainsi, quand un animal doit apprendre à associer différents contextes à des emplacements où a été déposée une récompense, on observe dans l'hippocampe des ondes dites *thêta*, dont la fréquence est comprise entre quatre et dix hertz. Il existe aussi un rythme nommé *gamma*, dont la fréquence est comprise entre 30 et 150 hertz, et sans doute un code *thêta-gamma* où les deux rythmes s'imbriqueraient. C'est ce qu'ont montré en 2013 John Lisman, de l'Université Brandeis, aux États-Unis, et Ole Jensen, de l'Université Radboud, à Nimègue, aux Pays-Bas : les cellules qui codent diverses informations déchargent à différentes phases du rythme *thêta*, mais tous les neurones (qu'il s'agisse de cliques ou de réseaux) qui codent une même information déchargent au même moment du cycle *gamma*.

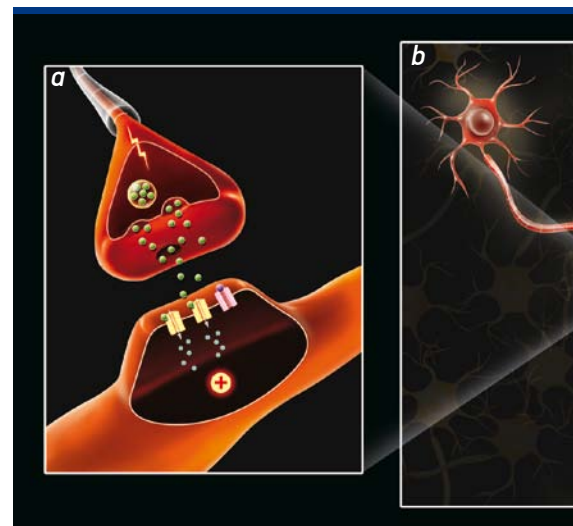
Enfin, ce « couplage oscillatoire » apporte un niveau supplémentaire d'organisation entre les structures de la mémoire. Toutes les structures nerveuses ne sont pas activées en même temps, de la même façon, pour les informations qu'il faut apprendre, mémoriser ou rappeler. L'hippocampe est impliqué dans la mémoire déclarative épisodique qui permet de stocker des informations ayant des repères temporels et spatiaux (mon trajet à moto, par exemple). On peut rappeler consciemment ces informations qui ont des repères contextuels. L'hippocampe est nécessaire pour apprendre et mémoriser les informations épisodiques. La trace mnésique de l'information est ensuite transférée de l'hippocampe vers le cortex pour être stockée à long terme. Simultanément, il y a un désengagement de l'hippocampe, c'est-à-dire que les cliques initialement sollicitées pour la mémorisation de tel ou tel savoir-faire ou connaissance ne sont plus activées (ou le sont plus faiblement) par ce stimulus, et ce sont des cliques présentes dans le cortex qui prennent le relais.

Ainsi, une information épisodique serait d'abord stockée dans l'hippocampe sous forme détaillée, mais, avec le temps, se développerait une version plus schématique de cette information au niveau du cortex. Gordon Winocur et ses collègues, de l'Université Trent, au Canada, ont récemment proposé que l'hippocampe et le cortex étant en interaction permanente, chaque trace mnésique pourrait être réactivée selon le contexte. Dès lors, quand un réseau reliant l'hippocampe et le cortex et correspondant à un souvenir particulier est réactivé, il est légèrement modifié. Les mécanismes de modification – même légère – des cliques neuronales codant les souvenirs expliquent que la mémoire humaine évolue avec le temps.

Mémoire biologique versus mémoire numérique

Après avoir brossé ce tableau de la mémoire biologique, peut-on comparer ses avantages et ses inconvénients avec ceux de la mémoire numérique ? Question simple en apparence, qui appelle une réponse complexe, car on ne compare pas deux « entités » similaires. Au sens strict, la mémoire numérique est le stockage pur et simple d'informations, par un code binaire, sur différents supports. D'un point de vue biologique, c'est un ensemble de processus étroitement liés qui assurent aussi bien l'acquisition que la restitution de l'information et dont on ne connaît pas encore les mécanismes précis. Le concept de mémoire biologique est plus complexe, plus large et plus flou (ou méconnu) que celui de mémoire numérique.

La mémoire doit stocker les informations pendant longtemps et sans altération. Sur ces deux aspects, l'avantage semble être à la mémoire numérique. En effet, il n'est pas facile de se rappeler précisément un événement et, pire, on peut se souvenir d'une information fautive, alors qu'il est si facile de faire une recherche sur le Web quand on a oublié une date, un chiffre ou la chronologie des rois de France. On obtient l'information en quelques clics. En revanche, elle n'est pas toujours fiable. De plus, la conservation à long terme d'une information numérique est toute relative. Au contraire, de par son organisation en réseaux de neurones interconnectés, le



2. LA MÉMOIRE EST ORGANISÉE en plusieurs niveaux, de la molécule [neurotransmetteurs, récepteurs, etc.], à la synapse, élément clé de la mémorisation [a], puis aux dendrites qui

cerveau est capable de reconstituer une information (ou un comportement) même s'il lui manque une partie des informations qui s'y rapportent.

La capacité de stockage est un autre aspect de la mémoire. Celle-ci a augmenté exponentiellement pour les supports numériques, ce qui n'est pas le cas de notre cerveau. Toutefois, pour un support donné, la capacité de stockage est fixe et, une fois qu'elle est atteinte, il faut effacer des informations afin d'en stocker de nouvelles (ou prendre un autre disque dur !). Au contraire, la plasticité du système nerveux permet d'augmenter sa capacité de stockage (augmentation du nombre et de l'efficacité des synapses, des dendrites et des axones, du nombre de neurones, ou modification des réseaux de neurones). Autant de processus qui font que plus on apprend, plus il est facile d'apprendre !

Mais cela ne signifie pas que le cerveau ait une capacité de stockage illimitée. Nous ne savons toujours pas précisément comment il stocke et rappelle une information. Par conséquent, il est illusoire de vouloir calculer sa capacité comme on peut le faire pour un ordinateur. La « puissance » de stockage de la mémoire numérique résulte plus de la rapidité de communication entre les différents supports numériques (Web) que de la capacité d'un support (un ordinateur) en particulier. Par ailleurs, les données mémorisées sur Internet ne sont rien de plus que la somme de toutes les connaissances accumulées par l'homme