

déjà à se manifester lorsque le chat se place devant l'écran et se tient prêt à appuyer sur le levier : il se prépare à la tâche et l'on observe que ses représentations visuelles et motrices de la tâche sont activées à l'avance.

Les atouts de la synchronisation

Le chat entraîné à appuyer sur un levier doit percevoir le stimulus déclenchant, le reconnaître et réagir à cette situation par un acte moteur : abaisser le levier. Imaginons que le fait d'abaisser la patte repose en partie sur l'activation d'une assemblée de quelque 10 000 neurones du cortex moteur qui peuvent stimuler les fibres motrices provoquant la contraction des muscles. La capacité des fibres motrices à provoquer la contraction des muscles dépend en partie de l'intensité de la commande électrique qu'elles reçoivent du cortex moteur. Or, l'impact de cette stimulation électrique augmente si les influx des neurones du cortex moteur sont concentrés dans le temps (un phénomène nommé sommation spatiale). Charles Stevens et Anthony Zador, à l'Institut Salk de Californie, ont ainsi montré que les neurones du cortex sont plus facilement activés s'ils sont excités par plusieurs connexions synaptiques au même moment. Dans notre cas, si les neurones d'une même assemblée du cortex moteur sont synchronisés, cela leur donne beaucoup plus d'impact sur la commande du muscle. Ils peuvent, en établissant des contacts multiples avec les neurones de la moelle épinière responsables du mouvement, déclencher l'activité de ces derniers. Ce raisonnement vaut aussi pour l'impact qu'exerce l'assemblée neuronale percevant l'image dans le cortex visuel sur l'assemblée de neurones du cortex moteur commandant le mouvement. Les connexions reliant deux assemblées de neurones sont multiples et aboutissent généralement à un traitement du signal en parallèle. Chaque neurone de la seconde assemblée reçoit plusieurs dizaines de connexions de neurones de la première, qui délivrent des décharges très concentrées dans le temps. La synchronisation, considérée de ce point de vue, est un moyen pour les neurones de concentrer leurs décharges électriques pour agir plus efficacement sur le mouvement de l'animal.

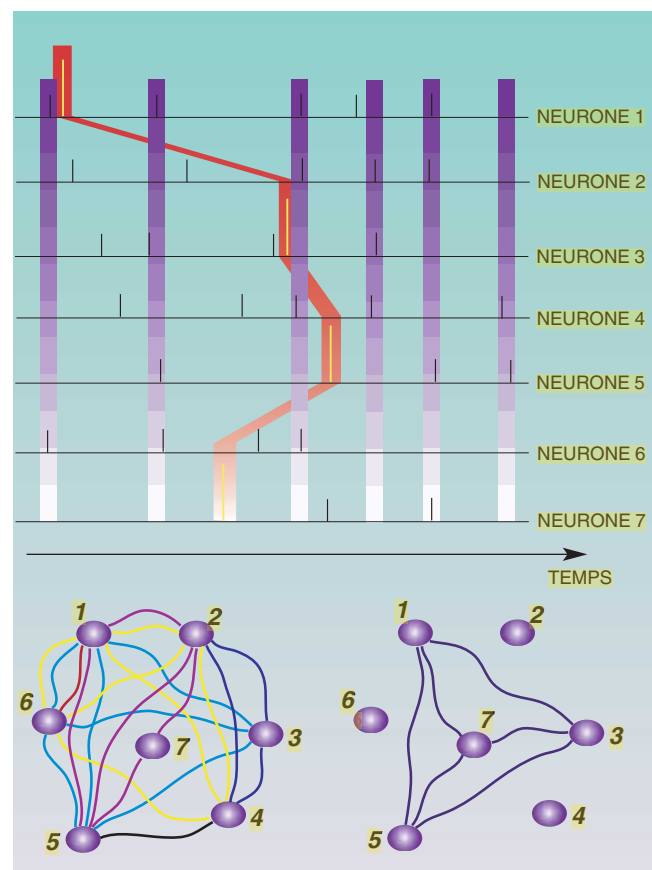
Pourquoi, dans ce cas, la phase de «préparation» de l'expérience, au cours de laquelle la synchronisation existe déjà, ne se traduit-elle pas par un mouvement de la patte? Dans ce cas, la synchronisation est infraliminale : les neurones du cortex visuel présentent une activité spontanée sous la forme d'oscillations faibles, insuffisantes pour donner naissance à une onde de dépolarisation, correspondant à une vraie «décharge». Tant que le chat ne se concentre pas, les neurones réagissent de façon «étalée» à l'application d'un stimulus : le stimulus est insuffisant pour faire décharger ceux dont l'activité est faible, tandis qu'il suffit à faire décharger ceux dont l'activité est déjà élevée. Dans le cortex, certains neurones déchargent alors immédiatement, d'autres dix millisecondes plus tard, d'autres encore 20, 30 ou 40 millisecondes plus tard : ils ne sont pas synchronisés, de sorte que le chat ne bouge pas sa patte.

Au contraire, si les courbes de fluctuation des neurones sont déjà présynchronisées avant que le stimulus arrive, tous les neurones se trouvent dans la même zone de leur courbe de fluctuation. S'ils sont dans la partie basse, aucun ne décharge et s'ils sont dans la partie haute, ils déchargent tous en même temps. Dans tous les cas, le

moment de la décharge est unique et précis. La présynchronisation observée durant la phase préparatoire devient un moyen d'assurer la synchronisation des décharges des assemblées et, par conséquent, l'impact de la transmission électrique entre ces assemblées.

Capacité d'attention et mémorisation

Par ailleurs, l'impact des neurones synchronisés sur les autres neurones permet de mieux comprendre la différence, chez le chat, entre capacité d'attention et perception inconsciente. Chez l'animal percevant deux objets de chaque côté de son champ visuel, l'attention est reportée entièrement sur un œil, tandis que l'autre se laisse piloter de façon passive. Les neurones reliés à l'œil dominant sont synchronisés, et peuvent de ce fait influencer sur l'activité électrique d'assemblées de neurones situées dans d'autres aires corticales, notamment l'aire motrice qui commande les mouvements



3. DEUX CODAGES sont possibles pour créer des assemblées de neurones, dont l'activité électrique est représentée par les axes horizontaux (on a représenté sept neurones). Les décharges sont symbolisées par les traits verticaux (en noir et jaune). Le codage temporel consiste à former des assemblées en regroupant les décharges qui surviennent au même instant (les bandes verticales violettes). Six assemblées ont ainsi été formées selon les combinaisons suivantes : la bande 1 : neurones 1 et 6 ; la bande 2 : neurones 1, 3, 5, 6 ; la bande 3 : neurones 1, 2, 4, 6 ; la bande 4 : neurones 2, 3, 4 ; la bande 5 : neurones 1, 2, 5, 7 ; la bande 6 : neurones 4 et 5. Selon le codage d'intensité, les neurones caractérisés par une intensité de décharge supérieure sont regroupés dans une même assemblée (bande rouge). Dans cet exemple, une seule assemblée a été créée, car la comparaison des intensités requiert plus de temps que le codage temporel : il faut attendre que les neurones déchargent plusieurs fois pour que les intensités soient comparées et que les plus fortes soient identifiées. En bas, on a schématisé les réseaux de neurones obtenus par codage temporel (à gauche) et par codage d'intensité (à droite).

de l'œil. Par cette boucle de rétroaction, l'œil qui perçoit l'objet consciemment peut bouger et rester en contact avec le stimulus. Ainsi, la synchronisation apparaît comme la marque des neurones qui, temporairement, ont un impact sur les mouvements d'un animal, autant que sur ses états perceptifs.

La synchronisation est le ciment des assemblées de neurones, qui leur procure leur unité et leur pouvoir d'action. Peut-elle expliquer comment les assemblées se forment chez le jeune animal? Prenons l'exemple de l'apprentissage de la parole : un jeune enfant apprend le sens du mot «rouge» en associant la stimulation auditive produite par le mot et la stimulation visuelle déclenchée par la couleur. Dans son cerveau, une assemblée de neurones est activée par la perception auditive, et l'autre par la perception visuelle. Pour donner son sens au mot, il faut réunir les deux assemblées et les maintenir associées. Avançons d'un pas dans le détail de ce mécanisme. Considérons deux neurones appartenant à chacune des assemblées, et reliés l'un à l'autre par des points de contact, les synapses, où ils peuvent se transmettre l'information électrique. Avant que le mot et la couleur n'aient été associés, l'information électrique a une faible probabilité de passer d'un neurone à l'autre. Cette probabilité est équivalente à celle qui relie deux neurones quelconques dans le cerveau. Pour créer un lien entre les

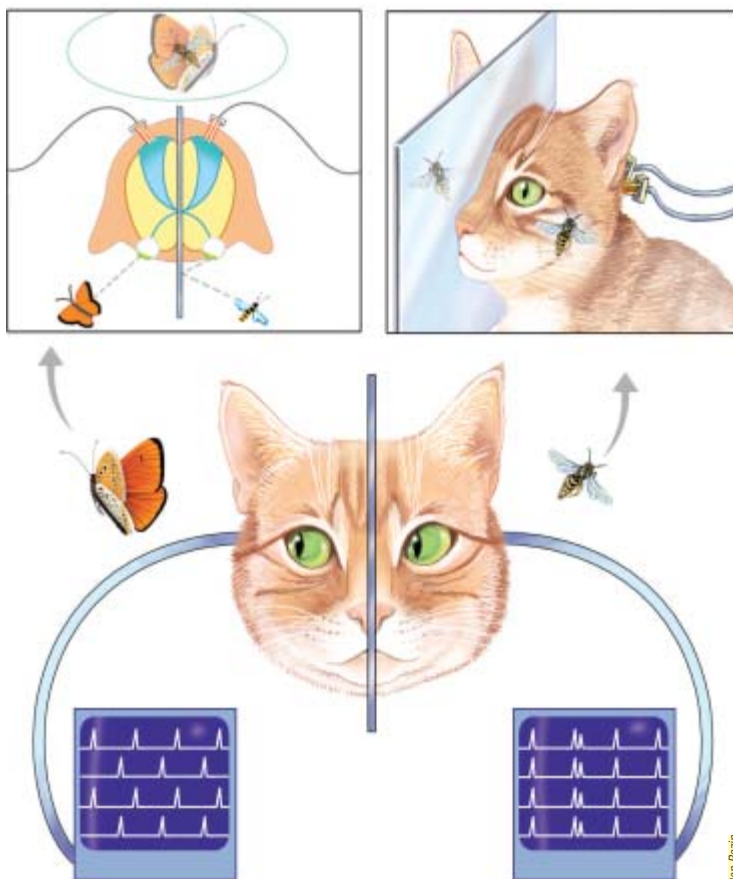
deux représentations, il faut donc augmenter cette probabilité, améliorer en quelque sorte l'efficacité de la jonction synaptique. Des expériences multiples ont été réalisées afin de mesurer la probabilité de transmission de l'information entre deux neurones selon que leurs activités sont synchronisées ou non. Ces expériences ont établi que la qualité de la transmission de l'information d'un neurone à l'autre augmente lorsque ces derniers sont activés dans un intervalle de temps de quelques millisecondes, c'est-à-dire quand ils sont synchronisés. La synchronisation neuronale contribue à nouer des liens privilégiés entre neurones et à édifier les assemblées. Elle joue trois rôles essentiels : elle assure la création des assemblées de neurones, elle favorise la reconnaissance des neurones au sein d'une même assemblée et elle augmente le pouvoir d'action des neurones sur le fonctionnement d'autres assemblées, et celles qui commandent les mouvements de l'animal. Parmi les neurones ayant la capacité de se synchroniser, ceux du cortex ont une capacité d'autoorganisation qui s'adapte aux contraintes liées à la perception. Examinons comment.

Un mécanisme «horizontal»

Il y a une dizaine d'années, nous avons tenté de répondre à une question fondamentale : existe-t-il, au cœur du cerveau, sous les zones corticales, un «chef d'orchestre», qui assurerait la synchronisation des neurones corticaux? Ou bien les neurones corticaux parviennent-ils à se synchroniser spontanément? Afin de trancher entre ces deux hypothèses, nous avons sectionné chez des chats le corps calleux qui assure le passage des informations entre les deux hémisphères du cortex. Le reste du cerveau, notamment toutes les structures sous-corticales, est intact. Nous avons observé que, sans corps calleux, les réponses des neurones ne parviennent plus à se synchroniser. Ceci apporte la réponse à notre question : si un centre «chef d'orchestre» avait été présent au niveau sous-cortical, il aurait continué à envoyer ses instructions à chaque hémisphère. Le fait que la synchronisation ait disparu indique une interaction des neurones à l'intérieur même du cortex, dans une relation réciproque. Les populations de neurones synchrones n'ont pas besoin de chef d'orchestre ; ils trouvent d'eux-mêmes la pulsation, comme des interprètes de musique de chambre qui s'observent pour rester en mesure.

On ignore encore comment les neurones «s'observent». Toutefois, on a réussi à simuler le comportement de neurones à l'aide d'oscillateurs harmoniques électroniques reproduisant leurs propriétés de décharge. Peter König, dans notre équipe, a ainsi démontré que si l'on programme des neurones artificiels pour qu'ils exercent l'un sur l'autre une influence de type inhibiteur (où chaque neurone diminue l'activité électrique de son partenaire quand ce dernier lui envoie un signal électrique trop intense), ceux-ci peuvent synchroniser leurs fluctuations à condition que le temps de conduction du signal entre les deux neurones n'excède pas le tiers de la période des oscillations. Dans le cas des chats que nous avons étudiés, le temps de conduction entre les deux hémisphères où étaient implantées les électrodes, est de l'ordre de 5 millisecondes et la période des oscillations est de 25 millisecondes.

Les liens horizontaux entre neurones du cortex permettent de comprendre comment les assemblées de neurones prennent forme chez un jeune animal à mesure



4. UN CHAT OBSERVE DEUX INSECTES séparés par un miroir, pendant que l'on enregistre l'activité électrique de son cortex visuel. S'il regarde le papillon de son œil droit (cartouche en haut à gauche), l'œil gauche suit ce mouvement. Il reçoit alors par réflexion l'image de la guêpe. Le chat voit alors un papillon superposé à une guêpe (en haut). Pour résoudre ce conflit, il doit choisir quel insecte voir consciemment : s'il voit consciemment le papillon, les neurones reliés à l'œil droit se synchronisent (enregistrement en bas à droite), tandis que ceux liés à l'œil gauche se désynchronisent (enregistrement en bas à gauche).