

neurones sensibles au mouvement vers le haut et vers la droite sont activés par le second. Toutefois, les activités de ces neurones sont indépendantes. En revanche, lorsqu'il perçoit une grille unique se déplaçant verticalement vers le haut, les neurones du premier type et ceux du second type sont également activés, mais les décharges des neurones du premier type et celles des neurones du second type se synchronisent, survenant exactement au même moment. De ce fait, l'activité des deux réseaux de neurones est en quelque sorte soumise à une contrainte supplémentaire, le temps. Cette caractéristique temporelle crée un critère de regroupement des neurones : tous ceux qui déchargent dans un même intervalle de temps font partie de la même assemblée.

La synchronisation des décharges offre plusieurs avantages. Grâce à ce système de reconnaissance, les images mentales peuvent se succéder rapidement. Ce ne serait pas le cas si un autre paramètre de l'activité des neurones, l'intensité des décharges, était utilisé comme code de reconnaissance entre les neurones : il faudrait attendre que les neurones reçoivent tout un spectre de décharges de leurs voisins avant de pouvoir détecter celles qui sont les plus intenses. Un tel processus de détection séquentielle serait long (voir la figure 3). De surcroît, ce mode de fonctionnement poserait des difficultés lorsque des assemblées ont des neurones en commun. Elles devraient attendre d'être activées, l'une après l'autre : si le temps séparant l'activation de deux assemblées était inférieur au temps d'analyse séquentielle des intensités, comment savoir à quelle assemblée appartient un neurone émettant une décharge intense ? De

tels mécanismes aboutiraient à des processus de pensée extrêmement lents.

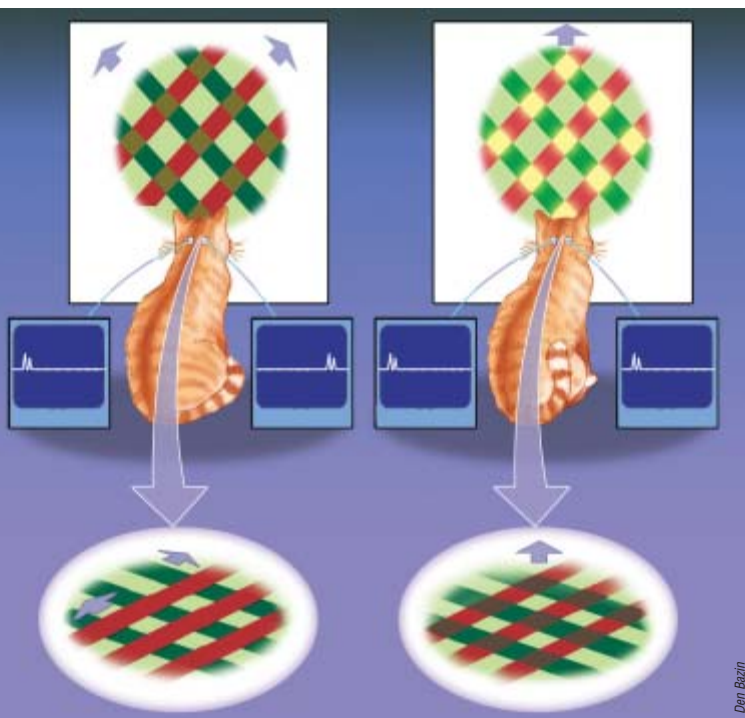
Par ailleurs, l'intensité des décharges varie en fonction de paramètres contingents : certains neurones déchargent plus fort s'ils perçoivent un stimulus qui correspond à leur «sensibilité spécifique». Nous avons vu qu'il existe des neurones, dans le cortex visuel, qui réagissent plus facilement aux mouvements d'un objet de la droite vers la gauche. Si l'on voit passer une voiture de droite à gauche ou de gauche à droite, les cellules du cortex visuel réagissent par des décharges d'amplitudes différentes. Et pourtant, il s'agit toujours d'une voiture en mouvement. Par conséquent, l'intensité des décharges serait un code peu fiable pour la détermination des neurones appartenant à une même représentation mentale. Ceci est confirmé par le fait que, dans notre expérience, lorsque le chat commute d'un type de perception à un autre, on ne note pas de changement notable de l'intensité des décharges neuronales. Dès lors, la synchronisation des neurones est-elle un signe de l'activité consciente du cerveau ?

Voir consciemment, voir inconsciemment

Une expérience légèrement différente de celle des réseaux de barres peut être conduite sur des chats à qui l'on présente deux objets ayant la propriété de se superposer visuellement. On place deux objets devant le chat, par exemple un papillon face à son œil droit et une guêpe face à son œil gauche. Le champ visuel du chat est séparé par un miroir placé dans le prolongement de son museau. S'il regarde le papillon, son œil droit se fixe sur l'insecte et l'œil gauche ne fait que suivre le mouvement, par parallélisme. Or, on fait en sorte que cet œil puisse recevoir l'image d'un autre objet (ici, une guêpe) par réflexion sur le miroir (voir la figure 4). Ainsi, le chat reçoit l'image des deux objets superposés. Il doit choisir sur quel objet il doit fixer son attention. S'il fixe son attention sur le papillon, son œil droit réalise la perception consciente, et l'œil gauche voit la guêpe de façon inconsciente. S'il regarde la guêpe, c'est l'œil gauche qui capte l'attention et l'œil droit voit le papillon de façon inconsciente.

Nous avons mesuré l'activité des neurones du cortex visuel du chat reliés respectivement à l'œil droit et à l'œil gauche. Nous avons observé que, quand le chat fixe son attention sur la guêpe, les neurones correspondant à l'œil gauche synchronisent leurs décharges. Au contraire, quand il utilise l'œil droit, ce sont les neurones opposés qui se synchronisent tandis que les premiers se désynchronisent. On en déduit que l'œil qui convoie l'information traitée de façon consciente active une assemblée de neurones qui se synchronisent, tandis que celui qui voit inconsciemment active une assemblée de neurones non synchronisés.

La synchronisation de l'activité neuronale est liée à la capacité attentionnelle des animaux, et augmente avec le degré d'attention de l'animal. Nous avons entraîné des chats à appuyer sur des leviers avec leur patte quand ils observaient que l'orientation d'un réseau de barres parallèles changeait. On constate que non seulement les neurones visuels, mais aussi les neurones du cortex sensorimoteur engagés dans le mouvement de la patte, se synchronisent au moment de la tâche. Ainsi, la synchronisation se manifeste entre des aires cérébrales distinctes, ici le cortex visuel et le cortex pariétal et frontal. De surcroît, une telle synchronisation commence



2. DEUX SÉRIES DE BARRES PARALLÈLES se déplaçant dans des directions perpendiculaires sont observées par un chat. Le système visuel perçoit, soit deux séries se déplaçant dans des directions différentes (à gauche), soit une seule grille, regroupée en un seul motif se déplaçant dans une direction intermédiaire, vers le haut (à droite). Dans le premier cas, les neurones sensibles à ces composantes du mouvement envoient des décharges indépendantes les unes des autres. Dans le second cas, les mêmes neurones sont sollicités, mais leurs décharges sont synchronisées.

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.

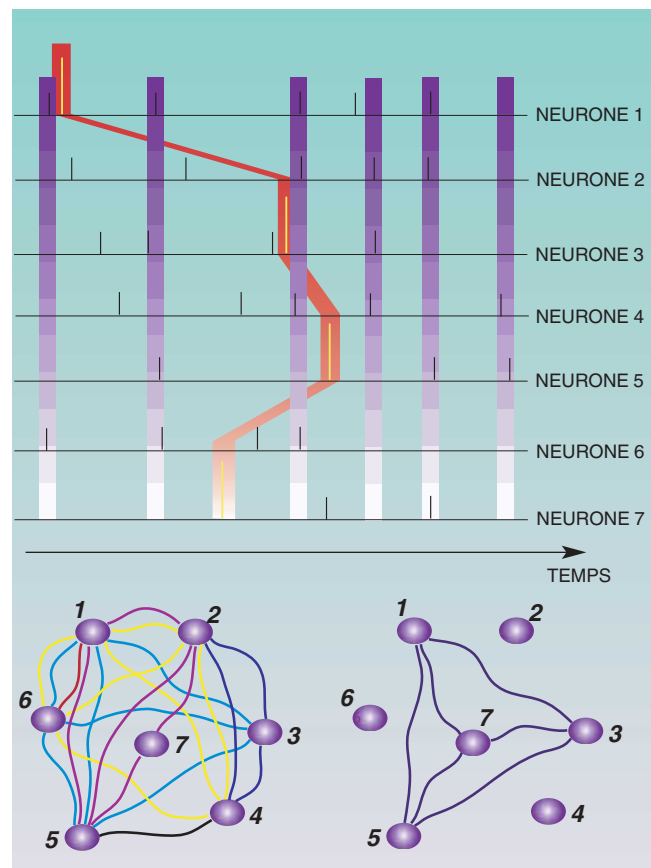
Pourquoi, dans ce cas, la phase de «préparation» de l'expérience, au cours de laquelle la synchronisation existe déjà, ne se traduit-elle pas par un mouvement de la patte? Dans ce cas, la synchronisation est infraliminale : les neurones du cortex visuel présentent une activité spontanée sous la forme 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).