

■ LES AUTEURS



Terry SEJNOWSKI est chercheur à l'Institut médical Howard Hugues et dirige le Laboratoire de neurobiologie computationnelle de l'Institut Salk d'études biologiques, à La Jolla, en Californie.

Tobi DELBRUCK codirige le groupe sur les capteurs de l'Institut de neuro-informatique, à l'Université de Zurich.

ont projeté un film à des chats et enregistré les réponses de certains neurones de leur cortex visuel. Lorsqu'ils réduisaient l'image du film pour la faire tenir dans le champ récepteur de ces neurones (aucun signal ne provenait de la zone environnante), les instants d'émission des potentiels d'action variaient aléatoirement. En revanche, lorsque les expérimentateurs agrandissaient l'image pour stimuler également la zone entourant la périphérie du champ récepteur, les potentiels d'action étaient moins fréquents, mais leur émission était temporellement plus précise (elle se produisait toujours aux mêmes instants du film). D'autres expériences montrent l'influence du contexte perceptuel sur la fréquence d'émission des potentiels d'action (voir l'encadré page ci-contre).

La chronologie des potentiels d'action est aussi importante pour d'autres processus neuronaux. On pense que leur synchronisation est nécessaire à l'assemblage d'une image à partir de ses différentes composantes (telles que la couleur et l'orientation),

chaque potentiel d'action véhiculant l'une d'elles. Un potentiel d'action codant la propriété « rouge » est par exemple émis de façon synchrone avec un autre codant un contour arrondi, ce qui permet au cortex visuel de fusionner ces signaux pour créer une image mentale de pot de fleurs.

Les neurones corticaux qui reçoivent les signaux d'entrée visuels ont aussi des interactions excitatrices et inhibitrices avec d'autres neurones corticaux. Un grand nombre de ces derniers, distants les uns des autres, s'activent spontanément et périodiquement, à des fréquences inférieures à 100 hertz. Cela permettrait de coordonner les multiples neurones responsables de la perception visuelle.

L'attention, facette essentielle de la cognition, serait aussi fondée sur des séquences de potentiels d'action synchronisés. Celles-ci renforceraient l'importance d'une perception ou d'un souvenir atteignant la conscience. Robert Desimone, aujourd'hui à l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), et ses collègues ont étudié ce phénomène sur des singes : lorsque ces derniers prêtent attention à un stimulus donné, il en résulte une augmentation du nombre de neurones corticaux émettant des potentiels d'action synchronisés à des fréquences situées dans la bande gamma (30 à 80 hertz), ainsi qu'une augmentation du rythme d'émission.

Quand la rétine inspire un nouveau type de caméra

Les caméras numériques traditionnelles sont peu efficaces. Elles enregistrent 24 images par seconde (une toutes les 40 millisecondes), chacune étant composée d'une mosaïque de pixels. Chaque pixel enregistre l'intensité moyenne reçue pendant les 40 dernières millisecondes, le temps mis par une balle de tennis pour parcourir environ 1,5 mètre. Ainsi, les caméras produisent une avalanche de données, qui nécessitent un temps de traitement très long. Avec ses collègues de l'Institut de neuro-informatique de

l'Université de Zurich (INI), l'un des auteurs (T. Delbruck) a alors développé un nouveau type de caméra, qui imite la façon dont certaines parties de la rétine encodent des images pour le cerveau.

Nommée capteur de vision dynamique (ou DVS, pour *Dynamic Vision Sensor*), la caméra ne détecte que les parties d'une scène qui varient d'une image à l'autre. Les pixels se comportent comme certaines cellules ganglionnaires rétiniennes : ils émettent une impulsion électrique quand la luminosité change.

Ainsi, la caméra peut filmer des objets qui se déplacent en enregistrant très peu de données. Elle capte un changement d'intensité lumineuse en une microseconde, de sorte qu'elle peut suivre des mouvements plus rapides que les caméras ordinaires, qui enregistrent une image toutes les 40 millisecondes.

La caméra DVS pourrait jouer un rôle de sentinelle, détectant tout ce qui bouge : voiture, piéton, personne âgée qui glisse et qui tombe... Elle a déjà été incorporée dans divers dispositifs robotiques : système placé devant une cage de but pour empêcher les balles d'entrer, dispositif tenant un crayon en équilibre, véhicule qui suit une ligne tracée au sol, capteurs qui détectent des particules dans des écoulements.

L'approche consistant à ne réenregistrer que ce qui change dans une scène visuelle est également utilisée pour d'autres applications. Des chercheurs de l'Université Cornell ont ainsi élaboré une prothèse de rétine qui fonctionne sur ce principe.



La caméra DVS n'enregistre que les parties changeantes d'une scène, en détectant les variations de luminosité sur chaque pixel. De telles variations se produisent par exemple lorsqu'un enfant bouge (à gauche). Sur l'image du jongleur (à droite), les mouvements de balle récents apparaissent en rouge et les plus anciens en bleu.



Synchronisation et maladies mentales

L'étude de cette bande de fréquences pourrait aussi se révéler utile pour comprendre l'autisme et la schizophrénie. En effet, les électroencéphalogrammes, qui mesurent des variations de potentiel électrique à la surface du crâne résultant de l'activité d'un grand nombre de neurones, enregistrent des oscillations aux fréquences de la bande gamma. Or ces oscillations sont moins amples chez les patients atteints de schizophrénie ou d'autisme. David Lewis, de l'Université de Pittsburgh, Margarita Behrens, de l'Institut Salk, et d'autres chercheurs ont incriminé des neurones corticaux nommés cellules à panier, qui participent à la synchronisation des potentiels d'action : un déséquilibre de l'inhibition ou de l'excitation de ces neurones (eux-mêmes inhibiteurs d'autres neurones) semble réduire l'activité synchronisée dans la bande gamma et pourrait expliquer en partie les troubles neurologiques. Des anomalies

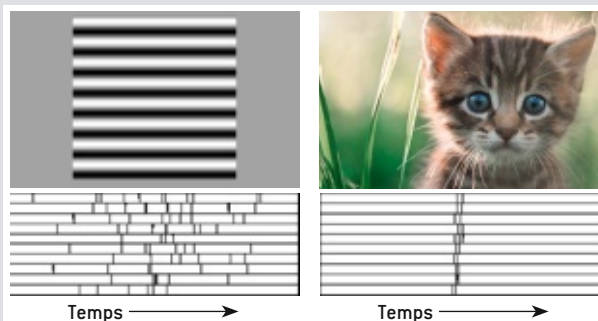
Un codage neuronal optimisé pour les images naturelles ?

Chaque neurone du cortex visuel est sensible à une zone restreinte de l'espace, nommée champ récepteur : seul un stimulus situé dans cette zone peut déclencher l'émission d'un potentiel d'action. Pourtant, le contexte visuel global a une influence sur la précision temporelle du codage, comme l'a montré une expérience menée au Laboratoire UNIC (Unité de Neurosciences, Information et Complexité), à Gif-sur-Yvette.

Une électrode a été implantée dans le cortex visuel d'un animal (préalablement anesthésié), afin de mesurer l'activité d'un neurone et de caractériser ses réponses fonctionnelles. La pointe de l'électrode, d'un diamètre de 0,1 micromètre, pénètre dans le corps cellulaire du neurone, dont le diamètre est d'une vingtaine de micromètres. Les réponses du même neurone ont été comparées pour deux films distincts, couvrant l'ensemble du champ visuel et présentés dix fois à l'animal : des bandes sombres et

claires alternées qui défilent et une séquence animée d'images « naturelles » (voir la figure ci-contre). Lorsqu'un stimulus (tel un trait orienté d'une certaine façon) passe dans le champ récepteur du neurone, un ou plusieurs potentiels d'action sont émis.

Pour le film composé de bandes, de nombreux potentiels d'action sont émis, à des instants variables d'une projection à l'autre. Pour le film composé d'images naturelles, les potentiels d'action sont beaucoup moins nombreux, mais émis à des instants quasi identiques du film à chaque projection. Ainsi, la réponse du neurone dépend de l'environnement perceptuel, en particulier du type d'image (artificielle ou naturelle, simple ou riche en information). Ces résultats suggèrent que le cerveau ajuste la précision temporelle du code neuronal à la quantité d'information à traiter, et que son fonctionnement s'est adapté aux images qui nous sont familières :



Des potentiels d'action sont émis en plus grand nombre et de façon plus aléatoire quand des bandes noires et blanches défilent (à gauche) que pour un film composé d'images naturelles (à droite). Sur les diagrammes du bas, chaque bande horizontale correspond à l'enregistrement de l'activité neuronale pour une projection du film et chaque trait à un potentiel d'action.

pour ce type de stimulus, le cerveau fonctionnerait sur un mode « optimisé » et sans bruit (tous les potentiels d'action sont porteurs d'information).

Cette optimisation s'effectue sans doute lors d'une période d'apprentissage précoce. Saura-t-on un jour concevoir un dispositif de vision arti-

ficielle calqué sur ce modèle, c'est-à-dire optimisant le codage et le rapport signal sur bruit en fonction de l'image à reconnaître ?

Yves Frégnac

est professeur en sciences cognitives à l'École polytechnique et directeur du Laboratoire UNIC, au CNRS.

Yves Frégnac, © Shutterstock/Smil

similaires dans les circuits du cortex préfrontal pourraient être à l'origine des troubles de la pensée accompagnant la schizophrénie.

Outre l'attention, la mémoire dépendrait aussi de la synchronie des impulsions. Lors de l'enregistrement des souvenirs, la chronologie relative des potentiels d'action semble être aussi importante que la fréquence d'activation. En particulier, l'émission synchronisée de potentiels d'action dans le cortex renforce les synapses (c'est-à-dire augmente l'intensité de la réponse du neurone postsynaptique à un potentiel d'action), ce qui est essentiel pour la mémoire à long terme. En 1997, Henry Markram et Bert Sakmann, de l'Institut Max Planck de recherche médicale, à Heidelberg, ont découvert un mécanisme nommé plasticité dépendante du temps d'arrivée des signaux : quand des potentiels d'action parviennent à une synapse à une fréquence de la bande gamma et que le neurone postsynaptique émet systématiquement un potentiel d'action dans les dix millisecondes qui suivent, la synapse se renforce ; au contraire, quand le neurone postsynaptique s'active dix millisecondes avant l'arrivée du potentiel d'action, la connexion synaptique s'affaiblit.

Certaines preuves de l'importance de la chronologie des potentiels d'action pour

la mémoire proviennent de recherches sur l'hippocampe, une aire cérébrale impliquée dans la mémorisation des objets et des événements. L'émission de potentiels d'action par les neurones de l'hippocampe et des régions avec lesquelles il interagit est notablement influencée par des oscillations synchrones des ondes cérébrales, dans une bande de fréquences allant de quatre à huit hertz (bande θ). De telles oscillations se produisent par exemple lorsqu'un rat explore sa cage. Elles coordonneraient l'émission des potentiels d'action par les neurones et modifieraient durablement les synapses.

Les neurosciences sont à un tournant, car de nouvelles méthodes permettent d'enregistrer simultanément l'activité de milliers de neurones ; elles révèlent des schémas clefs dans la chronologie des potentiels d'action et alimentent d'énormes bases de données. D'autres techniques sont apparues, telle l'optogénétique, qui consiste à activer sélectivement ou maintenir silencieuses des classes spécifiques de neurones en utilisant la lumière. Elles nous aideront à comprendre la façon dont sont encodées les communications internes du cerveau. Alors pourrions-nous progresser dans la construction de machines peut-être aussi efficaces que le cerveau. ■

■ SUR LE WEB

Conférence de Terry Sejnowski sur le fonctionnement des neurones : www.podcast.ethz.ch/podcast/episodes/?id=607

Vidéo sur une caméra imitant le fonctionnement de la rétine : ScientificAmerican.com/oct2012/dvs

■ BIBLIOGRAPHIE

J. Fournier et al., *Adaptation of the simple or complex nature of V1 receptive fields to visual statistics*, *Nature Neuroscience*, vol. 14, pp. 1053-1060, 2011.

S. Liu et T. Delbruck, *Neuromorphic sensory systems*, *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 20(3), pp. 288-295, 2010.

K. Boahen, *Puces de silicium pour retrouver la vue*, *Pour la Science*, n° 332, 2005.