

Rendez-vous sur

■ POUR LA
SCIENCE.fr

Le site de référence de l'actualité scientifique internationale

- Retrouvez gratuitement les actualités scientifiques quotidiennes.
- Écoutez nos entretiens audio ou téléchargez-les.
- Recevez nos lettres d'information et réagissez aux articles en vous inscrivant sur www.pourlascience.fr/newsletters
- Consultez les archives de tous nos magazines depuis 2004.
- Accédez aux numéros numériques compris dans votre abonnement en créant votre compte.
- Suivez notre actualité en direct :



<http://www.pourlascience.fr/rss>



<http://twitter.com/pourlascience>



<http://www.pourlascience.fr/pls-facebook>

+ de 10 000 fans



À très bientôt sur www.pourlascience.fr !

Le langage des

Terry Sejnowski
et Tobi Delbruck

La communication cérébrale repose sur une chronologie précise des signaux électriques transmis d'un neurone à l'autre.

Notre cerveau est plus performant que Google ou que le meilleur des robots du film *iRobot*. Du moins pour certaines tâches... Il est capable d'effectuer instantanément des recherches parmi une multitude d'expériences et d'émotions. En une fraction de seconde, nous reconnaissons le visage d'un parent, d'un ami ou d'une ancienne connaissance, même dans une semi-obscrité, et quel que soit l'angle d'observation – une tâche que les systèmes robotiques les plus perfectionnés peinent à accomplir. Nous sommes aussi multitâches : nous pouvons sortir un mouchoir de notre poche et nous essuyer le front tout en discutant. Or un « cerveau électronique » qui permettrait à un robot de réaliser cette simple combinaison de comportements reste une perspective éloignée.

Comment le cerveau réalise-t-il ces performances, sachant que la complexité de ses réseaux, où des milliards de neurones forment des milliers de milliards de connexions, rivalise avec celle d'Internet ? En partie grâce à son efficacité énergétique : lorsqu'une cellule nerveuse communique avec une autre, le cerveau consomme un million de fois moins d'énergie qu'un ordinateur effectuant l'opération équivalente. Cet

L'ESSENTIEL

■ La chronologie des signaux électriques (les potentiels d'action) échangés entre neurones au travers de multiples points de contact (les synapses) est un élément essentiel de la communication cérébrale.

■ Ainsi, la fréquence moyenne d'émission des potentiels d'action et les instants où ils sont émis sont porteurs d'information.

■ En outre, des signaux d'entrée identiques peuvent déclencher ou non la décharge d'un neurone cible, selon leurs instants d'arrivée relatifs.



neurones

organe de moins de un kilogramme et demi aurait ainsi acquis, au cours de l'évolution, un fonctionnement «économe en énergie».

Cependant, ce bon rendement ne peut expliquer à lui seul les performances du cerveau, qui présente par ailleurs de nombreuses limites intrinsèques. Ainsi, un neurone du cortex cérébral met plusieurs millisecondes à réagir (sous forme d'une impulsion électrique, ou potentiel d'action) au signal d'un autre neurone, une vitesse d'escargot comparée à celle des transistors : utilisés comme interrupteurs dans les circuits électroniques des ordinateurs, ces composants commutent en quelques milliardièmes de seconde. En outre, le réseau neuronal est peu fiable, le signal se perdant souvent en cours de route.

La façon dont le cerveau extrait des informations de l'ensemble des signaux qui le parcourent est mal comprise. Cependant, avec d'autres scientifiques, nous avons récemment montré comment le cerveau tire parti de la chronologie précise des potentiels d'action pour coder l'information, ce qui permet de traiter des problèmes difficiles en un temps record. En effet, des assemblées de neurones synchrones transfèrent beaucoup plus efficacement l'information qu'une même cohorte de neurones désorganisés temporellement (mode asynchrone). Outre leur intérêt théorique, nos travaux pourraient conduire à la conception d'ordinateurs d'un nouveau genre. On a déjà construit des circuits électroniques «neuromorphiques», qui imitent certains aspects du réseau cérébral. Ces dispositifs sont parfois constitués d'un million de neurones électroniques et des systèmes de plus grande taille sont prévus. À terme, on espère construire des calculateurs neuromorphiques qui fonctionnent beaucoup plus vite que les ordinateurs modernes, tout en consommant moins d'énergie.

Comme de nombreux autres neuroscientifiques, nous utilisons souvent le système visuel comme banc d'essai, notamment parce que son schéma de câblage est assez bien connu. On soupçonne depuis longtemps que, dans ce système et d'autres, la chronologie des signaux est un élément essentiel du mode de communication cérébrale. Pendant plusieurs décennies, on a négligé cette idée ; elle nécessitait en effet de comparer l'activité de différentes

LES SYNAPSES SONT DES CONNEXIONS
entre deux neurones. Elles régulent
la circulation des informations dans le cerveau.

Kenn Brown, Mondalithic Studios

parties du cerveau, mais il était difficile de mesurer l'activité de plus d'un neurone à la fois. Toutefois, divers travaux expérimentaux et théoriques, ainsi que le développement de modèles numériques du système nerveux, l'ont remise sur le devant de la scène.

Les cellules cérébrales reçoivent toutes sortes de signaux d'entrée, à différentes échelles de temps. Les hormones, véhiculées par le sang, circulent lentement. Pour les réponses rapides, les signaux les plus importants de la communication cérébrale sont les potentiels d'action, de brèves variations du potentiel électrique membranaire qui se propagent dans le réseau neuronal. Les impulsions utilisées pour la communication entre neurones durent quelques millisecondes. Chaque neurone reçoit de nombreux signaux d'entrée. Quand la somme des «entrées» qui tendent à l'activer dépasse la somme de celles qui tendent à l'inhiber, le neurone émet un potentiel d'action. Ce dernier court le long de l'axone (une extension du neurone jouant le rôle de câble électrique) jusqu'à ses extrémités. Le signal est ensuite transmis par voie chimique à travers des jonctions nommées synapses, qui relient l'extrémité de l'axone aux cellules réceptrices.

100 millions de photorécepteurs

Dans la rétine de chaque œil, 100 millions de photorécepteurs captent les variations de la lumière. Les signaux qu'ils émettent traversent plusieurs couches de neurones, puis sont convertis en séquences de potentiels d'action par un million de cellules ganglionnaires, situées à l'arrière de la rétine. Ces potentiels d'action sont transmis par des axones à diverses parties du cerveau, qui envoient à leur tour des signaux à d'autres régions et engendrent finalement une perception consciente du signal visuel. Chaque axone peut transmettre plusieurs centaines de potentiels d'action par seconde, bien qu'il n'en véhicule le plus souvent que quelques-uns par seconde. Tout ce que nous voyons (les formes, les couleurs et les mouvements) est encodé dans cette «rivière» de potentiels d'action espacés d'intervalles de temps variables.

L'enregistrement simultané de l'activité de nombreux neurones est essentiel

pour comprendre le fonctionnement du cerveau, mais il est extrêmement difficile à réaliser. Lors de travaux publiés en 2010, Eduardo Chichilnisky et ses collègues de l'Institut Salk d'études biologiques, à La Jolla, en Californie, ont enregistré simultanément les potentiels d'action de centaines de cellules ganglionnaires voisines dans des rétines de singe. Ces travaux ont permis d'identifier les photorécepteurs qui communiquent avec chaque cellule ganglionnaire. De tels progrès dans les techniques de mesure devraient nous aider à déchiffrer le code utilisé par le cerveau pour véhiculer les informations.

Les neurobiologistes utilisent plusieurs méthodes pour déceler la signification des

TOUT CE QUE NOUS VOYONS (les formes, les couleurs et les mouvements) est encodé dans cette «rivière» de potentiels d'action.

trains de potentiels d'action provenant de la rétine. L'une d'elles consiste à compter les potentiels d'action dans chaque axone pendant une période donnée : plus leur fréquence est élevée, plus le signal est intense. Certaines informations visuelles, telle la distribution locale du contraste, sont codées par des variations de cette fréquence et véhiculées par des groupes spécifiques de neurones.

Les informations sont également codées par la chronologie relative des potentiels d'action émis par plusieurs neurones. Les cellules ganglionnaires de la rétine, par exemple, sont sensibles à l'intensité lumineuse et répondent à une scène visuelle changeante en transmettant des potentiels d'action à diverses parties du cerveau. Chaque cellule ganglionnaire peut être activée par une caractéristique physique particulière d'un objet (par exemple, sa couleur ou son orientation). Lorsque plusieurs d'entre elles sont activées de façon quasi simultanée, le cerveau interprète cette simultanéité comme le signe de la détection d'un attribut particulier du même objet. Horace Barlow, de l'Université de Cambridge, qualifie ces activations simultanées de «coïncidences suspectes».

Des ingénieurs essaient de tirer parti de ces découvertes pour créer des systèmes d'enregistrement d'images plus efficaces, qui intègrent le principe de codage par la chronologie relative des signaux. L'un de nous (T. Delbruck) a

mis au point une caméra émettant des impulsions électriques en réaction aux variations de luminosité. Elle permet de filmer des objets qui se déplacent très vite, avec un traitement du signal minimal (voir l'encadré page 54).

De la rétine au cortex

Divers travaux ont confirmé que le cortex visuel s'appuie sur des indices temporels pour comprendre ce que voient les yeux. Les cellules ganglionnaires de la rétine n'ont pas de projections directes dans le cortex, mais elles lui sont reliées *via* le thalamus, situé au cœur du cerveau. Quelque 100 millions de cellules s'activent alors dans chaque cortex visuel (localisé à l'arrière de chaque hémisphère cérébral), puis les signaux sont envoyés à d'autres régions du cerveau pour l'interprétation consciente.

L'examen des connexions entre les neurones relais du thalamus et ceux du cortex visuel nommés neurones étoilés épineux (appartenant à la couche du cortex où arrivent les axones des neurones thalamiques) est riche d'enseignements. En 1994, Kevan Martin, aujourd'hui à l'Université de Zurich, et ses collègues ont découvert que seulement six pour cent des synapses présentes sur chaque neurone étoilé épineux sont issues d'un axone de neurone thalamique. Comment un signal si faible peut-il être transmis de façon fiable à des neurones situés dans les différentes couches du cortex ?

Les neurones du cortex sont très sensibles aux signaux d'entrée fluctuants, auxquels ils peuvent répondre en émettant un potentiel d'action en quelques millisecondes. En 2010, avec Hsi-Ping Wang et Donald Spencer, de l'Institut Salk, et Jean-Marc Fellous, de l'Université de l'Arizona, l'un de nous (T. Sejnowski) a modélisé sur ordinateur un neurone étoilé épineux. Une telle cellule ne peut être activée par un seul potentiel d'action ; en revanche, les potentiels d'action transmis par seulement quatre axones entraînent son activation, à condition qu'ils ne soient espacés que de quelques millisecondes. Lorsque les signaux d'entrée proviennent du thalamus, il suffit qu'un petit sous-groupe de neurones du cortex visuel soit activé pour représenter le contour et la texture d'un objet. Chaque neurone étoilé épineux répond préférentiellement à un