

transmises à un ordinateur qui a simulé l'ensemble du réseau de neurones avec ses fonctions synaptiques. Ces dernières ont alors été configurées grâce à une phase d'apprentissage pour reconnaître les chiffres parlés. Puis, soumis à de nouveaux échantillons de paroles, le réseau identifiait correctement les chiffres avec un taux de succès de 99,6%, ce qui représente une performance exceptionnelle. Cette expérience a démontré la capacité des jonctions tunnel magnétiques impulsives à imiter les neurones de façon fiable.

Les travaux dans le domaine de la spintronique à des fins neuromorphiques sont encourageants. Notre futur défi sera de réaliser des réseaux de neurones complets comportant des millions de jonctions tunnel magnétiques jouant le rôle de neurones et de synapses. Comme on l'a vu, l'industrie sait déjà les intégrer par milliards sur des puces et les relier à des circuits électroniques classiques pour faire des mémoires, ce qui constitue une base solide pour aller plus loin.

La spintronique n'a pourtant pas fini de nous surprendre. Les jonctions tunnel magnétiques seraient capables d'imiter d'autres propriétés du cerveau, comme la synchronisation de neurones distants. En effet, dans le cerveau, des impulsions conduisent des neurones parfois très éloignés à accorder leurs réponses, en les déclenchant au même moment. Cette synchronisation a de nombreux avantages. Des neurones qui émettent des impulsions en même temps auront plus d'importance dans le traitement du signal. S'ils sont connectés au même neurone, celui-ci reçoit un très grand nombre d'impulsions dans un bref laps de temps et, ainsi, il les transmet très efficacement à son tour. Des populations entières de neurones se coordonnent par ce phénomène, au point de créer des ondes cérébrales qui, grâce à leur puissance, modifient le comportement de neurones dans d'autres aires cérébrales, parfois lointaines.

DE MINUSCULES ÉMETTEURS-RÉCEPTEURS

Les jonctions tunnel magnétiques ayant un fonctionnement très rapide, elles produisent des impulsions électromagnétiques à une fréquence pouvant dépasser quelques centaines de mégahertz. Le traitement de l'information se fait ainsi des millions de fois plus vite que dans le cerveau. Mais, autre conséquence, ces dispositifs se comportent comme des nanoémetteurs radio. Or ces jonctions sont aussi très sensibles aux ondes électromagnétiques environnantes, lesquelles peuvent modifier leur génération d'impulsions : les jonctions sont donc aussi de très bons récepteurs radio. En ajustant correctement les caractéristiques d'un ensemble de jonctions, il est possible de les synchroniser entre elles grâce aux

signaux qu'elles émettent et reçoivent... comme les neurones biologiques!

Induire ce type de comportement synchronisé dans des réseaux de neurones artificiels est une piste passionnante pour coordonner matériellement et efficacement des réseaux de neurones spécialisés dans des tâches différentes. Dans cette optique, en 2018, avec nos collègues, nous avons étudié un système de quatre jonctions tunnel magnétiques dont la tâche était de reconnaître des voyelles prononcées oralement (voir la figure page 36). Le signal vocal était réduit

Grâce au multiplexage, une jonction a imité quatre cents neurones

à deux fréquences (par analyse de Fourier) et accéléré 100 000 fois pour être émis par une antenne aux quatre nanooscillateurs. De façon très intéressante, dans cette expérience, nous avons constaté que la capacité des jonctions à coordonner leurs rythmes augmentait les performances de classification des signaux vocaux.

Pour aller plus loin, nous cherchons désormais à réaliser des réseaux dont les neurones communiquent par les ondes électromagnétiques qu'émettent et reçoivent les jonctions. Il s'agit là d'une piste prometteuse pour interconnecter les neurones dans un réseau dense, ce qui est une condition indispensable pour l'implémentation de tâches complexes. À terme, un système complet associera ces jonctions jouant le rôle de neurones à des synapses artificielles à base de MRAM, pour lui donner une capacité d'apprentissage.

Que pourront alors réaliser de tels systèmes? Notre objectif n'est pas d'obtenir une intelligence capable de rivaliser avec l'intelligence humaine : notre connaissance du cerveau est bien trop partielle pour un tel résultat. En revanche, nous souhaitons concevoir une intelligence artificielle plus économe en électricité et qui soit plus rapide que celles disponibles actuellement. Ainsi, nous réduirons la consommation énergétique considérable des centres de calcul qui traduisent des textes ou interprètent ce que nous disons à nos enceintes intelligentes, et nous aurons la possibilité d'embarquer de tels dispositifs dans nos téléphones portables ou dans des véhicules autonomes pour nous assister dans notre vie quotidienne. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Grollier, D. Querlioz et al., **Neuromorphic spintronics**, *Nature Electronics*, 2 mars 2020.

M. Romera et al., **Vowel recognition with four coupled spin-torque nano-oscillators**, *Nature*, vol. 563, pp. 230-234, 2018.

J. Torrejon et al., **Neuromorphic computing with nanoscale spintronic oscillators**, *Nature*, vol. 547, pp. 428-431, 2017.

N. Locatelli et al., **Spintronic devices as key elements for energy-efficient neuro-inspired architectures**, *IEEE Xplore : Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition*, 2015.

CNRS FORMATION ENTREPRISES

Le CNRS propose un catalogue de plus de 270 formations technologiques à destination des entreprises pour l'année 2021

L'organisme de formation continue du CNRS présente un large panel de stages courts (3 jours en moyenne) dans les domaines suivants :

DONNÉES, CONNAISSANCES, APPRENTISSAGE

BIOINFORMATIQUE

GÉNIE LOGICIEL ET SYSTÈMES D'INFORMATION

TERRITOIRE, PATRIMOINE ET ENVIRONNEMENT

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

PHYSIQUE ET INSTRUMENTATION

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

CHIMIE, SYNTHÈSE, PROCÉDÉS

CHIMIE ANALYTIQUE

MICROSCOPIE ET IMAGERIE

BIOLOGIE CELLULAIRE ET MICROBIOLOGIE

BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET BIOCHIMIE

BIOLOGIE ANIMALE ET FORMATIONS RÉGLEMENTAIRES

QUALITÉ ET SÉCURITÉ

SOCIOLOGIE, SCIENCE POLITIQUE ET ÉCONOMIE

COGNITION ET COMPORTEMENT

Cet outil de transfert des savoirs et savoir-faire du CNRS permet de **former plus de 1600 professionnels chaque année** issus des secteurs privé (PME et grands groupes) et public.

LES NOUVEAUTÉS PROPOSÉES PAR CNRS FORMATION ENTREPRISES EN 2021

DONNÉES, CONNAISSANCES, APPRENTISSAGE

• Python et le module Pandas pour gérer et analyser des données du 27 au 29/01/2021
MONTPELLIER - 2,5 jours 1 400€

• Deep learning pour le traitement automatique des langues du 31/05 au 02/06/2021
GIF-SUR-YVETTE - 3 jours 1 500€

• Machine learning et deep learning pour la vision par ordinateur du 14 au 16/06/2021
LYON - 2,5 jours 1 600€

• Deep learning pour le traitement et l'analyse d'images médicales du 16 au 18/06/2021
VILLEURBANNE - 2,5 jours 1 600€

BIOINFORMATIQUE

• Bioinformatique pour la métagénomique du 10 au 12/05/2021
MONTPELLIER - 2,5 jours 1 200€

GÉNIE LOGICIEL ET SYSTÈMES D'INFORMATION

• Gestion d'applications Cloud avec l'orchestrateur Kubernetes (concepts et pratique) du 26 au 27/05/2021
GRENOBLE - 2 jours 1 000€

TERRITOIRE, PATRIMOINE ET ENVIRONNEMENT

• LiDAR et photogrammétrie pour la numérisation de terrain : instrumentation, mesure et modélisation du 08 au 11/03/2021
CAEN - 3,5 jours 1 200€

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

• Acquérir et dialoguer en Python du 22 au 26/03/2021
GIF-SUR-YVETTE - 4 jours 1 600€

• Visualiser en temps réel et interagir avec ses données en Python du 05 au 08/04/2021
GIF-SUR-YVETTE - 3 jours 1 350€

PHYSIQUE ET INSTRUMENTATION

• Fabrication additive : dépôt par jet d'encre du 30/03 au 01/04/2021
TOULOUSE - 3 jours 1 400€

• Micro- et nano-électronique : évolution, état de l'art et perspectives des technologies CMOS, Beyond-CMOS et Mémoires du 29/09 au 01/10/2021
GRENOBLE - 2 jours 1 000€

Découvrez l'ensemble des stages de formation sur
cnsrformation.cnrs.fr



Pour organiser une formation sur mesure
contactez-nous à cfe.contact@cnrs.fr ou 01 69 82 44 55

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX

- Liquid foams and emulsions: generation, stability and properties du 17 au 19/03/2021 STRASBOURG - 3 jours 1 500 €

CHIMIE, SYNTHÈSE, PROCÉDÉS

- Cristallisation : recherche des conditions de cristallisation et des polymorphes à l'aide de montages expérimentaux microfluidiques et multi-puits du 24 au 26/03/2021 MARSEILLE - 3 jours 1 900 €
- Procédés d'oxydation avancée pour le traitement des eaux du 07 au 08/04/2021 NANCY - 1,5 jour 700 €

CHIMIE ANALYTIQUE

- Utilisation de la spectrométrie de masse haute résolution (HR-MS) : principe et applications du 30/03 au 02/04/2021 PALAISEAU - 3,5 jours 1 800 €
- Interprétation de spectres de masse obtenus lors de l'analyse de molécules bio-organiques polyfonctionnelles en LC-MS et LC-MS/MS du 23 au 26/11/2021 PALAISEAU - 3,5 jours 1 600 €

MICROSCOPIE ET IMAGERIE

- Histologie : de la préparation d'échantillons à la validation des marquages par analyse d'image du 22 au 25/03/2021 NANTES - 4 jours 1 800 €

BIOLOGIE CELLULAIRE ET MICROBIOLOGIE

- Biologie cellulaire de la peau : applications cosmétiques et pharmaceutiques du 29 au 31/03/2021 ORLEANS - 3 jours 1 900 €
- Neuro-electrophysiology: from patch-clamp to in vivo recordings du 12 au 16/04/2021 VALBONNE - 5 jours 2 400 €
- Biologie dans les systèmes microfluidiques du 11 au 12/10/2021 PARIS - 2 jours 1 300 €

BIOLOGIE MOLÉCULAIRE ET BIOCHIMIE

- Virologie fondamentale, moléculaire et structurale du 04 au 05/11/2021 GIF-SUR-YVETTE - 2 jours 1 000 €

BIOLOGIE ANIMALE ET FORMATIONS RÉGLEMENTAIRES

- Apport de l'imagerie du petit animal dans la mise en oeuvre des 3R en expérimentation animale le 23/03/2021 A distance - 0,5 jour 300 €
- Éthologie et bien-être animal le 06/04/2021 A distance - 0,5 jour 300 €
- Ethologie du cheval : cycle complet du 17/05/2021 au 25/11/2022 6 modules de 5 jours 5 700 €
- L'anesthésie des animaux de laboratoire le 18/05/2021 A distance - 0,5 jour 300 €

- Douleur et analgésie des animaux de laboratoire le 02/06/2021 A distance - 0,5 jour 300 €
- Éthique en expérimentation animale le 21/09/2021 A distance - 0,5 jour 300 €
- Biostatistiques en expérimentation animale le 19/10/2021 A distance - 0,5 jour 300 €

QUALITÉ ET SÉCURITÉ

- Evaluation du risque chimique : méthode et application du 01 au 02/07/2021 GIF-SUR-YVETTE - 2 jours 1 000 €

SOCIOLOGIE, SCIENCE POLITIQUE ET ÉCONOMIE

- Introduction à l'intelligence technologique le 04/06/2021 BORDEAUX - 1 jour 500 €

COGNITION ET COMPORTEMENT

- Faire évoluer un comportement : introduction le 05/03/2021 LILLE - 1 jour 500 €
- Faire évoluer un comportement : identifier les causes du 02 au 04/06/2021 LILLE - 3 jours 1 200 €
- Faire évoluer un comportement : intervenir sur les causes du 25 au 26/11/2021 LILLE - 2 jours 900 €

L'ESSENTIEL

> La distanciation sociale en cas de maladie est pratiquée par divers animaux : mammifères, poissons, oiseaux, insectes...

> Les animaux sociaux modifient certains de leurs comportements comme l'épouillage pour se tenir à l'écart et stopper la

propagation de maladies qui pourraient les décimer.

> Les stratégies de distanciation sociale varient : elles vont de l'éloignement de tout animal malade au maintien des relations avec les individus les plus apparentés.

LES AUTRICES



DANA HAWLEY
professeure à l'Institut
polytechnique et université
d'État de Virginie (Virginia
Tech), aux États-Unis



JULIA BUCK
maîtresse de conférences
à l'université de Caroline
du Nord à Wilmington,
aux États-Unis

Les animaux aussi gardent leurs distances

Afin d'échapper à la maladie, divers animaux tels que des langoustes, des oiseaux, des fourmis ou des singes pratiquent la distanciation sociale... spontanément, sans directives administratives !

Au cœur d'un récif de l'archipel des Keys, à l'extrême sud de la Floride, une jeune langouste blanche (*Panulirus argus*) s'en revient de sa nuit passée à rechercher des mollusques et pénètre dans son repaire. Les langoustes ont l'habitude de partager ces fentes rocheuses et, cette nuit, un nouvel arrivant s'y est installé. Mais ce dernier est un peu bizarre. Son urine dégage une odeur inhabituelle. Elle contient des substances produites quand la langouste est infectée par un virus contagieux noté *Panulirus argus Virus 1*, ou PaV1. La jeune langouste en bonne santé qui était de retour semble sur le qui-vive. Aussi difficile soit-il de trouver un abri aussi bien protégé des prédateurs que le sien, elle fait marche arrière et s'éloigne vers la pleine mer, loin du virus mortel.

La réaction des langoustes au virus – observée à la fois *in situ* et en laboratoire – est la même que celle que nous n'avons que trop

expérimentée cette année : la distanciation sociale. Pour freiner l'épidémie de Covid-19, les interactions physiques avec autrui ont été fortement limitées, notamment *via* les mesures de confinement. Cela a été pénible. Et nombreux sont ceux qui se sont interrogés sur la nécessité de telles mesures.

Pourtant, aussi contre nature que cela puisse paraître, la distanciation sociale fait partie intégrante du monde naturel. Outre les langoustes, des animaux aussi différents que des singes, des poissons, des insectes et des oiseaux sont capables de détecter des congénères malades, et en conséquence de s'en tenir à distance.

Ce comportement est fréquent chez les animaux sociaux, car il augmente leurs chances de survie. En effet, la vie en groupe permet aux animaux de capturer plus facilement leurs proies, de se tenir chaud et d'éviter les prédateurs, mais elle favorise aussi la propagation de maladies contagieuses, comme pourrait en >