

un dispositif implanté, semblable à un pacemaker, applique des stimulus électriques oscillants, soigneusement minutés, dans certaines régions cérébrales profondes, tel le noyau sous-thalamique.

Cependant, les promesses de cette technique pour la maladie de Parkinson (et pour d'autres maladies) sont limitées, car les électrodes stimulent les cellules voisines, de façon non sélective, et la connaissance des stimulus à appliquer est incomplète. Nous avons récemment utilisé l'optogénétique pour étudier des modèles animaux de la maladie de Parkinson. Nous avons découvert, par exemple, que la stimulation cérébrale profonde serait plus efficace quand elle cible non pas les cellules, mais les connexions entre neurones – modifiant ainsi les interactions des différentes régions du cerveau. Et nous avons cartographié deux voies dans les circuits moteurs du cerveau ; l'une de ces voies ralentit les mouvements, l'autre les accélère et pourrait contrecarrer certains symptômes parkinsoniens (notamment le ralentissement moteur).

L'activité neuronale des schizophrènes

Qui plus est, nous avons appris comment forcer un type de cellules, les neurones néocorticaux à parvalbumine, à moduler les ondes gamma de l'activité cérébrale (un type d'ondes que l'on enregistre sur les électroencéphalogrammes). Les scientifiques savent que les patients souffrant de schizophrénie ont des neurones à parvalbumine altérés et que les oscillations gamma sont anormales dans la schizophrénie et l'autisme – mais on ignore pourquoi. En utilisant l'optogénétique, nous avons montré que les cellules à parvalbumine augmentent les ondes gamma et que celles-ci, à leur tour, renforcent le flux d'information dans les circuits corticaux.

Or les patients souffrant de schizophrénie traitent mal l'information ; par exemple, un événement banal peut être surinterprété (ce qui donne peut-être lieu à la paranoïa et aux hallucinations). Ces patients souffrent aussi d'une défaillance d'un mécanisme qui permet à chacun de distinguer les voix entendues prononcées par autrui et sa « petite voix intérieure » (les sujets entendent des voix).

Les personnes souffrant des différentes formes d'autisme, quant à elles,

L'optogénétique est-elle éthique ?

Aujourd'hui, l'optogénétique rejoint les techniques de modulation du cerveau, tels les médicaments psychoactifs et les interventions chirurgicales, qui soulèvent des questions éthiques et philosophiques. Cependant, l'optogénétique est plus sûre et moins chargée de considérations éthiques que ces stratégies plus anciennes. La puissance et la spécificité croissantes de l'optogénétique sont associées à sa complexité technique : il serait presque impossible d'utiliser l'optogénétique sur un patient non volontaire ou réticent.

Toutefois, de nouveaux problèmes, plus subtils, naissent de la précision de l'optogénétique. Tous les aspects de la personnalité, les émotions et les sou-

venirs proviennent d'événements électriques et biochimiques ayant lieu dans des groupes particuliers de neurones, selon des schémas temporels précis. Le contrôle de ces composants clés de l'esprit soulèverait quelques questions philosophiques épineuses, allant du fait de savoir quand il est approprié ou justifiable de faire de telles modifications jusqu'à des questions plus abstraites sur la nature même de la personnalité et de la volonté et sur le fait que l'on puisse les modifier.

Les interventions neurologiques fondées sur la chirurgie, des médicaments ou des électrodes sont si grossières que ces questions philosophiques sont plus théoriques que pratiques et n'ont été abordées que

partiellement. Le psychiatre est directement concerné par ce type de questions, car il sait que les traitements à sa disposition sont capables d'influer sur la construction psychique.

Mais les temps changent, comme l'illustre l'incroyable rapidité des progrès en optogénétique. La précision temporelle et cellulaire des interventions humaines dans le cerveau doit faire l'objet d'une réflexion continue et attentive qui implique les citoyens. Reste à expliquer soigneusement aux profanes ce que représentent les expériences d'optogénétique chez l'animal et comment elles peuvent nous aider à mieux comprendre le fonctionnement du cerveau et à traiter les maladies mentales.

traitent également mal l'information : elles ne saisissent pas le sens général des propos qu'on leur tient, car elles se focalisent sur des détails d'objets, de personnalités, de conversations, etc. Ces anomalies du traitement de l'information peuvent perturber la communication et le comportement. Ainsi, une meilleure compréhension de la signification des ondes gamma nous permettrait de mieux aborder ces maladies complexes.

En conséquence, l'ingénierie cellulaire et cette nouvelle technique, l'optogénétique, nous donnent des informations sur les maladies psychiatriques. On peut désormais relier certaines fonctions complexes du cerveau et des comportements aux propriétés électriques de neurones et de circuits neuronaux. Tout cela change notre compréhension de la façon dont fonctionnent les tissus électriquement excitables, qu'ils soient sains ou malades. Et ce, grâce à d'étranges protéines bactériennes qui réagissent à la lumière. L'histoire de l'optogénétique souligne qu'il est important de protéger les niches environnementales rares – où l'on découvre souvent de nouvelles espèces et de nouveaux outils. Qui aurait cru que l'étude d'une molécule extraite d'un micro-organisme donnerait naissance à une nouvelle méthode d'exploration du cerveau ? ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

F. Zhang *et al.*, **Structures**, *Nature Protocols*, vol. 5, pp. 439-456, février 2010.

R. D. Airan *et al.*, **Temporally precise *in vivo* control of intracellular signaling**, *Nature*, vol. 458, pp. 1025-1029, avril 2009.

V. Gradinaru *et al.*, **Optical deconstruction of parkinsonian neural circuitry**, *Science*, vol. 324, pp. 354-359, avril 2009.

G. Miesenböck, **De la lumière dans le cerveau**, *Pour la Science*, n° 376, février 2009.

E. S. Boyden *et al.*, **Millisecond-timescale, genetically targeted optical control of neural activity**, *Nature Neuroscience*, vol. 8, pp. 1263-1268, septembre 2005.

Des insectes à la photonique

Serge Berthier

Les ailes des insectes présentent des structures qui contrôlent la propagation de la lumière. Les physiciens s'en inspirent pour élaborer de nouveaux matériaux.

Contrôler la propagation de la lumière à l'échelle nanométrique : tel est l'objectif de la photonique, une branche récente (le terme n'a que 20 ans) et prometteuse de l'optique qui a par exemple conduit aux diodes électroluminescentes (LED) et aux fibres optiques structurées. L'élément de base de la photonique est le cristal photonique, une architecture périodique semblable à celle des cristaux minéraux, mais de période beaucoup plus grande, de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres. De telles structures permettent de manipuler les photons, comme un circuit électrique le ferait avec des électrons. Leur réalisation à grande échelle reste cependant problématique, aussi notre équipe s'est-elle lancée, depuis plusieurs années, dans l'étude des cristaux photoniques naturels, très communs dans le monde animal et à l'origine des plus belles couleurs du vivant : ailes et élytres des insectes, écailles des poissons et reptiles, plumes des oiseaux, nacre...

Ces matériaux naturels peuvent inspirer le physicien de diverses façons. Dans un premier temps, il peut tenter de repro-

L'ESSENTIEL

- ✓ Ailes de papillons, élytres de coléoptères, plumes d'oiseaux, écailles de poissons : nombre de matériaux naturels dévient ou polarisent la lumière.
- ✓ Cette faculté est souvent accompagnée d'autres propriétés telles l'hydrophobie, l'absorption lumineuse ou la rigidité.
- ✓ Ces matériaux ont deux caractéristiques communes : ils sont structurés à plusieurs échelles et présentent un certain désordre.
- ✓ Les chercheurs s'en inspirent pour créer de nouveaux matériaux antireflets ou autonettoyants.

© Shutterstock/Oleg_Z

duire telle quelle une structure existante, ou même l'utiliser directement. Nous verrons que certains verres hydrophobes sont ainsi directement inspirés des propriétés des ailes d'un papillon, et que les ailes d'un autre papillon servent de détecteur de vapeur (voir la figure 1). Le physicien peut aussi, après modélisation, modifier la structure initiale pour amplifier un phénomène. Enfin, de l'étude des matériaux naturels, il peut déduire des règles quasi universelles qui régissent le développement des structures naturelles.

La règle première est la multifonctionnalité. Économe en moyens – elle utilise peu d'éléments chimiques –, la nature ne développe pas de dispositif strictement monofonctionnel : elle fait beaucoup avec peu. Comment ? En construisant des matériaux multi-échelle, c'est-à-dire présentant différentes structures selon l'échelle considérée. De cette organisation multi-échelle résulte un désordre structural qui non seulement assure le lien entre les différentes fonctions du matériau étudié (aile de papillon ou autre), mais optimise ces fonctions.

Multifonctionnalité, multi-échelle, désordre et optimisation en moyenne, telles



sont les leçons de la nature que nous allons tenter d'appréhender et d'appliquer. Avant de les examiner de plus près, un petit tour d'horizon de la photonique s'impose.

Lorsqu'une onde lumineuse rencontre un matériau homogène, elle est soit transmise, soit réfléchie, dans une direction et une proportion parfaitement décrites par les lois de la réflexion et de la réfraction, les « lois de Snell-Descartes ». Passée cette frontière, l'onde poursuit sa route en droite ligne jusqu'à l'interface suivante. Manipuler la lumière dans ces conditions ne peut se faire qu'à une échelle macroscopique, par des jeux de miroirs, de prismes, de réseaux...

Autre échelle, nouvelle optique

Tout devient différent lorsque la matière n'est plus homogène, mais présente à l'onde une structure périodique. Cette cohabitation de deux périodes – celle de l'onde et celle de la matière – conduit, sous certaines conditions, à bouleverser la propagation de l'onde. On peut freiner la lumière, la faire tourner à 90 degrés ou lui faire



1. LE PAPILLON MORPHO GODARTI est bleu à l'air pur (indice de réfraction $n = 1$), vert dans une vapeur d'acétone ($n = 1,36$) et marron clair dans une vapeur de trichloroéthylène ($n = 1,48$). La structure interne de l'aile intercale couches d'air et couches solides ; les vapeurs changent l'indice optique des couches d'air, qui modifie le spectre réfléchi par l'aile.



rebrousser chemin. Tout cela n'est possible que lorsque les deux périodes sont sensiblement du même ordre de grandeur, et c'est tout l'enjeu de la photonique : faire de la photonique, c'est structurer la matière à l'échelle de la longueur d'onde, c'est-à-dire de la distance parcourue par l'onde lumineuse durant une période – typiquement une centaine de nanomètres. Disposer régulièrement des objets à cette échelle est problématique dès qu'il s'agit de passer au stade industriel. Or le monde vivant met à notre disposition un nombre considérable d'exemples et de modèles de cette taille. À défaut de savoir les fabriquer, nous pouvons tout du moins les étudier, les modéliser et envisager d'éventuels « transferts technologiques ».

À chaque animal sa structure. Néanmoins, il est possible de faire émerger quelques grandes catégories structurales en déterminant dans combien de directions de l'espace les périodes de ces structures se développent. On distingue ainsi les structures unidimensionnelles, périodiques dans une seule direction de l'espace : ce sont par exemple les empilements périodiques de couches (voir la figure 2a) ou les réseaux