

niveaux absolus. » Par exemple, lorsqu'on entre dans un bar, on est frappé par l'odeur du café, mais au bout d'un moment, on ne la sent plus. On y prête à nouveau attention si la concentration de la molécule odorante dans l'air augmente soudainement. « Nous développons des systèmes artificiels fondés sur la détection des changements d'odeur. Cela permet de repérer beaucoup plus vite à la fois la présence d'une molécule et sa source. »

imiter l'olfaction des insectes

« Le mot "neuromorphique" signifie "ayant la même forme que les neurones", explique Michael Schmuker. Notre objectif est de décrire les principes calculatoires des systèmes olfactifs biologiques, puis de les transférer dans des algorithmes et des dispositifs. »

Pour l'atteindre, il faut d'abord des capteurs inspirés des récepteurs biologiques, mais ceux-ci n'existent pas encore. La plupart des capteurs chimiques actuels sont fondés sur la mesure de la résistance électrique d'un matériau sensible exposé à des molécules volatiles. Néanmoins, des récepteurs hybrides existent, constitués de capteurs biologiques – par exemple des cellules olfactives isolées et génétiquement modifiées, ou des cultures de tissu olfactif – reliés à un circuit électronique.

Plusieurs exemples de cette technologie hybride existent, et certains sont très récents. Ainsi, divers dispositifs munis de récepteurs de l'épithélium olfactif de chiens se sont révélés efficaces pour détecter une odeur de beurre due à la molécule de diacétyle dans les boissons alcoolisées. Un autre dispositif mis au point en 2019 à l'Institut de science industrielle et de technologie de Kanagawa, au Japon, utilise le système olfactif du moustique: le capteur est une protéine du moustique qui détecte l'odeur de l'octénol. Cette protéine est insérée dans une membrane cellulaire artificielle. Enfermé dans une chambre spéciale préservant le matériel biologique et introduit dans un robot, ce système, relié à des électrodes détectant et transmettant son activité, a réagi à la présence de la molécule dans l'air.

Ces dispositifs hybrides, cependant, ont souvent la même limite: leur partie biologique est généralement constituée de récepteurs d'un seul type, qui ne détectent qu'une classe très restreinte de molécules odorantes. Mais la technologie se développe et il est probable que, dans un avenir proche, elle devienne capable d'intégrer plusieurs types de récepteurs à la fois.

Bien sûr, disposer de récepteurs efficaces ne suffit pas pour atteindre l'olfaction neuromorphique. Ils ne sont que la première étape. En 2007, Michael Schmuker a décrit un système d'olfaction artificiel complet fondé sur

celui des insectes. Le modèle comporte trois étapes. La première imite les récepteurs biologiques et reproduit l'aspect combinatoire de l'analyse effectuée par l'épithélium olfactif. À ce stade, différents types de récepteurs sont accordés à différents groupes d'odeurs. L'activation combinée de ces récepteurs constitue l'entrée dans la deuxième étape. Ce stade s'inspire du lobe antennaire, l'organe de l'insecte qui correspond aux bulbes olfactifs des vertébrés. À cette étape, par le biais de connexions inhibitrices entre les cellules, les informations olfactives sont « canalisées » et renforcées, comme dans les glomérules. Une carte chimique se forme alors, où des glomérules proches se spécialisent pour des odeurs chimiquement similaires.

Dans la troisième étape, un algorithme d'apprentissage automatique est appliqué, c'est-à-dire un système informatique avancé capable d'apprendre par lui-même à catégoriser des stimuli. C'est l'étape qui imite ce qui se passe dans le cortex olfactif. Les performances du système, en cours d'amélioration, sont encore inférieures à celles du système biologique, mais elles sont comparables à celles des méthodes d'apprentissage automatique les plus répandues, comme les classificateurs dits « bayésiens ».

DES NEZ ÉLECTRONIQUES, POUR QUOI FAIRE ?

Les systèmes olfactifs biomimétiques sont donc encore loin d'être disponibles sur le marché. Mais les difficultés techniques ne sont pas le seul obstacle. Certains chercheurs se demandent si nous avons besoin d'appareils qui sentent comme nous. Giuliano Iurilli est sceptique: « Nous avons déjà des systèmes qui détectent les sources de contamination, d'intoxication et les explosifs potentiels. » La seule application vraiment nécessaire, selon lui, serait médicale: « Ils pourraient être utiles pour reconnaître une maladie à l'odeur. On utilise déjà des chiens, mais dresser et garder un chien dans un hôpital est coûteux et peu pratique. »

Michael Schmuker voit les choses différemment: « Une raison de développer des systèmes d'olfaction artificiels biomimétiques est de mieux comprendre les systèmes biologiques. » De plus, grâce aux enseignements des systèmes biologiques, il a bon espoir que les systèmes olfactifs artificiels bio-inspirés gagneront en vitesse et polyvalence et consommeront moins d'énergie. Ils pourraient être exploités en agriculture « pour vérifier la maturation des cultures, identifier leurs maladies et les attaques de parasites ». Et, qui sait, atteindre le graal: servir de prothèses numériques contre les troubles olfactifs, à l'instar de ce qui se fait pour améliorer l'audition et la vision. Plus de la moitié de la population mondiale de plus de 65 ans est concernée. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Cocca *et al.*, **A bird's-eye view of Italian genomic variation through whole-genome sequencing**, *Eur. J. Hum. Genet.*, vol. 28, pp. 435-444, 2020.

S. L. Pashkovski *et al.*, **Structure and flexibility in cortical representations of odour space**, *Nature*, vol. 583, pp. 253-258, 2020.

N. Misawa *et al.*, **Construction of a biohybrid odorant sensor using biological olfactory receptors embedded into bilayer lipid membrane on a chip**, *ACS Sensors*, vol. 4 (3), pp. 711-716, 2019.

M. Schmuker *et G. Schneider*, **Processing and classification of chemical data inspired by insect olfaction**, *PNAS*, vol. 104(51), pp. 20285-20289, 2007.

La flexibilité du réseau au service de la transition écologique

L'arrivée croissante de productions électriques délocalisées et intermittentes modifie en profondeur la distribution de l'énergie. Pour s'adapter à ces nouvelles ressources et les exploiter au mieux, le réseau devient actif grâce à une supervision très fine de la consommation et de la production électrique. C'est l'avènement de la flexibilité.

Le réseau de distribution électrique bâti tout au long du ^{xx}e siècle rappelle celui d'un réseau d'irrigation.

Les centrales électriques sont les sources d'une énergie qui se déverse d'abord *via* les lignes à haute tension, jusqu'aux 2935 postes sources répartis sur tout le territoire. Ensuite, elle ruisselle sur le réseau moyenne tension (HTA) vers des transformateurs qui la délivrent enfin aux particuliers *via* la basse tension (BT). Durant ce parcours, la tension du courant

passse de 400 000 à 230 volts. Tout comme l'eau s'écoule du point le plus élevé jusqu'à la mer, le courant électrique s'écoule toujours des centrales aux particuliers de manière passive.

Ou plutôt «s'écoulait». Depuis quelques années, tout change: désormais, l'électricité se met à «remonter le courant», en quelque sorte... «C'est une conséquence de la transition énergétique en marche, explique Hubert Dupin, chef du département Flexibilités à Enedis. Fin 2020, la puissance

totale du parc électrique d'origine renouvelable – hydroélectricité, éolien, solaire photovoltaïque et bioénergies confondus – s'élève à 56 GW, soit 42% de la puissance disponible en France. Les filières éolienne et solaire, amenées à se développer, comptant aujourd'hui respectivement pour 18 MW et 11 MW. Or, 87% de ces producteurs sont raccordés au réseau de distribution HTA et BT dont Enedis a la charge. Cela signifie concrètement que de plus en plus de zones passent de strictement consommatrices à consommatrices ET productrices d'électricité. C'est un changement complet de paradigme.»

CLÉS D'OPTIMISATION

En effet, cette inversion des flux d'énergie pose un certain nombre de problèmes. Notamment parce que la production d'énergie renouvelable se distingue de celle des centrales conventionnelles par son intermittence, et sa dépendance vis-à-vis de la météo.