

aux symbioses endonucléaires d'amibes et d'algues unicellulaires avec des bactéries.

Au-delà des eucaryotes unicellulaires, on vient d'observer des bactéries endonucléaires dans des cellules animales, telles que des cellules d'insectes et de mollusques. Par exemple, l'équipe de Nicole Dubilier, de l'Institut Max Planck de biologie marine à Brême, en Allemagne, a découvert des bactéries dans le noyau de cellules de moules pêchées dans les grands fonds sous-marins de l'Atlantique (voir la figure 2b).

Deux bactéries ont même été observées dans le noyau de cellules humaines : *Rickettsia bellii* et une espèce voisine, *Rickettsia rickettsii*, l'agent de la fièvre des montagnes rocheuses, une maladie grave surtout diagnostiquée en Amérique. Transmise par une tique, cette dernière entraîne fièvre, maux de tête et douleurs musculaires suivis d'une éruption cutanée.

À ce jour, seules quelques espèces bactériennes sont connues pour envahir le noyau, mais il est probable que leur nombre ira croissant. Que font ces bactéries dans le noyau de cellules ? Le noyau étant riche en acides nucléiques, les constituants de l'ADN, qui sont aussi des nutriments essentiels à la vie bactérienne, il pourrait servir de garde-manger aux bactéries endonucléaires. Les bactéries pourraient aussi y être à l'abri des systèmes de surveillance et de dégradation de la cellule. Localisés dans le cytoplasme (le milieu intracellulaire), ces systèmes sont mis en jeu pour détruire tout corps étranger envahissant la cellule. Ces hypothèses restent à vérifier. Les biologistes y travaillent en étudiant les mécanismes d'invasion du noyau par ces microbes et les conséquences de ces intrusions sur le génome et le fonctionnement des gènes.

Une empreinte à long terme ?

L'ensemble des travaux présentés ici permet de mieux comprendre le pouvoir pathogène des bactéries virulentes et d'envisager de nouvelles approches thérapeutiques et biotechnologiques. Comme nous l'avons mentionné, les protéines TAL sont des outils de recherche en plein développement, qui ont déjà été utilisés pour modifier des génomes variés dans le cadre de la recherche biomédicale. Des TAL couplées à une nucléase, une enzyme agissant comme des ciseaux sur l'ADN, ouvrent la pers-

pective de corriger des gènes défectueux dans des cellules souches ou des cellules immunitaires, en ciblant précisément un gène et en l'excisant. Les TAL sont par ailleurs utilisées en agronomie pour insérer des gènes d'intérêt biotechnologique dans des plantes.

Les nucléomodulines sont aussi des outils intéressants pour comprendre le fonctionnement des gènes. Par exemple, c'est en étudiant la nucléomoduline LntA de *Listeria* que nous avons découvert BAHD1. Cette protéine nucléaire régule des gènes de l'immunité impliqués dans les infections bactériennes et nous étudions actuellement son rôle sur l'expression d'autres gènes. L'étude des gènes cibles des enzymes nucléaires sécrétées par *Chlamydia*, *Legionella* et *Shigella* pourrait aussi mettre au jour de nouveaux facteurs impliqués dans les maladies infectieuses.

En même temps, ces recherches soulèvent de nombreuses questions. En reprogrammant l'ordinateur cellulaire qu'est le noyau et en altérant par divers mécanismes les informations génétiques et épigénétiques des cellules de l'organisme, les attaques nucléaires bactériennes ont-elles des effets collatéraux à long terme sur l'organisme infecté ? Induisent-elles une mémoire permanente de l'infection, même après une guérison apparente, tel le système immunitaire ? Et si oui, quel en est l'impact ? Est-ce bénéfique, en stimulant des défenses de l'organisme ? Ou bien est-ce néfaste, en contribuant au développement de maladies complexes, telles que les cancers, les maladies auto-immunes, métaboliques ou neurodégénératives ?

Des observations très récentes vont encore plus loin dans le questionnement sur cet effet potentiel à long terme des bactéries. Des biologistes viennent de montrer que le bacille de la lèpre est capable de reprogrammer des cellules du système nerveux périphérique, les cellules de Schwann, en cellules souches. D'autres ont identifié la présence d'ADN bactérien dans le génome de cellules humaines cancéreuses, suggérant que le transfert d'ADN observé chez les plantes entre *Agrobacterium* et les cellules végétales serait aussi possible chez l'homme entre des bactéries de la flore intestinale et le génome humain. Les nucléomodulines laisseraient-elles chez l'homme une empreinte à long terme à la fois sur le génome et sur l'épigénome ? ■

■ LES AUTEURS



Hélène BIERNE est directrice de recherche à l'Institut national de la recherche agronomique (INRA, Micalis-AgroParisTech), à Jouy-en-Josas.

Pascale COSSART est professeur à l'Institut Pasteur, à Paris. Elle y dirige l'Unité des interactions bactéries-cellules.

■ BIBLIOGRAPHIE

T. Masaki *et al.*, Reprogramming adult Schwann cells to stem cell-like cells by leprosy bacilli promotes dissemination of infection, *Cell*, vol. 152, pp. 51-67, 2013.

H. BIERNE et P. COSSART, When bacteria target the nucleus: the emerging family of nucleomodulins, *Cell Microbiol.*, vol. 14, pp. 622-633, 2012.

A. Lebreton *et al.*, Les multiples stratégies de *Listeria*, *Pour la Science*, n° 412, pp. 42-49, 2012.

J. Boch *et al.*, Breaking the code of DNA binding specificity of TAL-type III effectors, *Science*, vol. 326, 1509-1512, 2009.

F. U. Zielinski *et al.*, Widespread occurrence of an intranuclear bacterial parasite in vent and seep bathymodiolin mussels, *Environ Microbiol.*, vol. 11, pp. 1150-1167, 2009.

Roger Mortimer

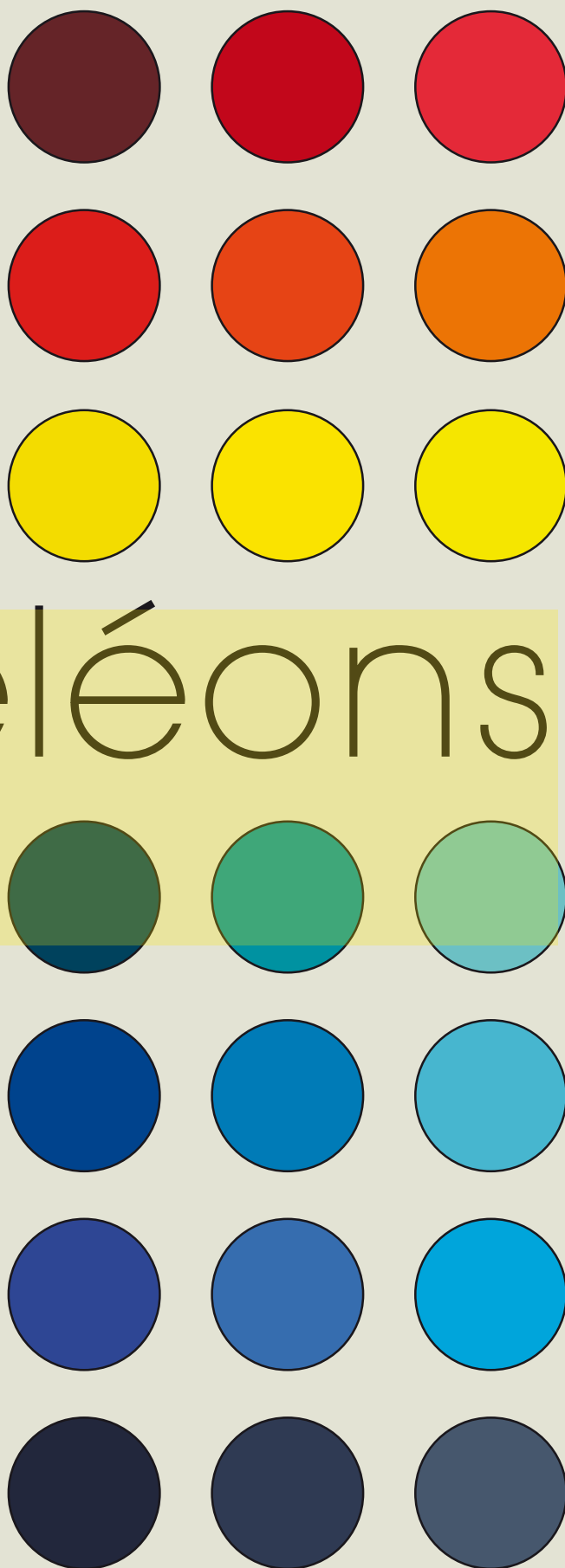
Les matériaux dits électrochromes peuvent changer de couleur sous l'effet d'un courant électrique. On les utilise notamment pour réaliser des vitrages qui s'opacifient à volonté.

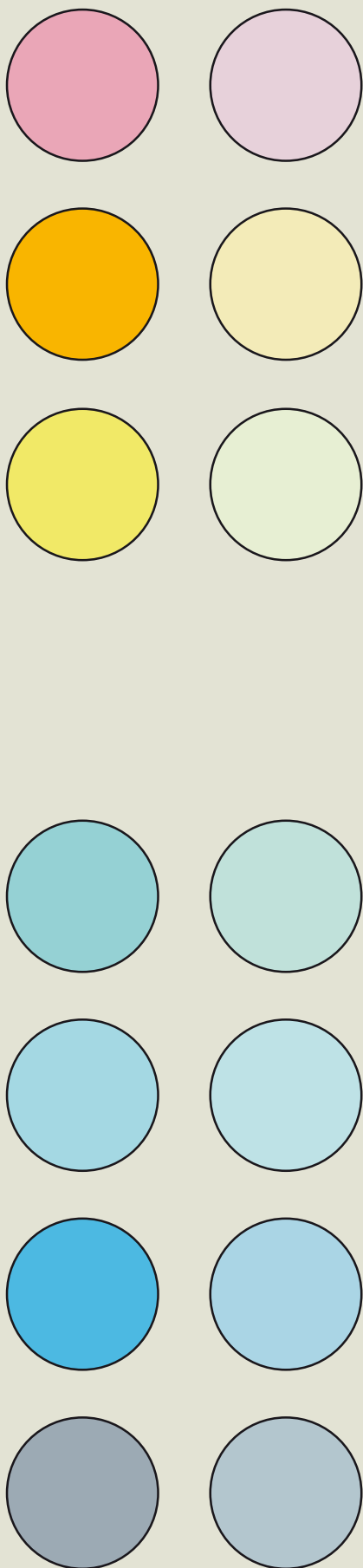
Des matériaux caméléons

En plein été, lorsque le Soleil brille à travers une baie vitrée, la lumière peut éblouir et la température de la pièce augmente rapidement. Une solution est de fermer les volets ou de tirer les rideaux. Mais il existe des solutions plus commodes. En effet, de nouvelles générations de fenêtres « intelligentes » peuvent se teinter sur demande et bloquer le passage de la lumière. Autre situation : ce matin, vous étiez d'humeur à porter une chemise blanche, mais au cours de la journée l'envie vous vient de porter plutôt du vert, du rouge, du bleu ou du jaune. Pourquoi ne pas simplement changer la couleur de la chemise que vous portez ? Cela sera bientôt possible !

Ces deux exemples illustrent les diverses possibilités offertes par des matériaux dits électrochromes, qui changent de couleur lorsqu'ils sont parcourus par un courant électrique. Ce phénomène est connu depuis le début du XIX^e siècle. Au cours du XX^e siècle, les chimistes ont étendu la gamme des matériaux électrochromes (*voir les*

1. CETTE PALETTE DE COULEURS est un échantillon des teintes que prennent certains dispositifs électrochromes. En appliquant un courant électrique, un tel matériau peut changer de couleur ou devenir transparent. La concentration des molécules actives permet de moduler l'intensité de la couleur.





encadrés pages 56 et 57) et ils proposent maintenant des palettes étendues de couleurs (voir la figure 1). De nombreux prototypes d'appareils électrochromes ont été conçus et les idées d'applications des matériaux électrochromes se sont multipliées.

Le principe de fonctionnement des matériaux électrochromes, terme introduit en 1961 dans un contexte un peu différent par John Platt, de l'Université de Chicago, repose sur des réactions chimiques simples d'échange d'électrons (voir la figure 2). Lorsqu'on leur applique une faible tension électrique (en général de l'ordre de un volt), les matériaux électrochromes voient leur couleur changer, s'estomper ou s'intensifier. La circulation des charges électriques déclenche dans ces matériaux une réaction de réduction (gain d'électrons) ou d'oxydation (perte d'électrons). Les propriétés optiques des molécules ayant réagi sont modifiées. Les longueurs d'onde lumineuses qu'elles sont susceptibles d'absorber diffèrent alors. Si ces longueurs d'onde appartiennent au spectre visible, la couleur du matériau change.

Certains dispositifs électrochromes existent déjà dans le commerce. On peut citer des rétroviseurs qui équipent des millions de voitures et qui s'assombrissent automatiquement pour éliminer l'éblouissement. Dans certains avions, des hublots « intelligents » s'obscurcissent à volonté pour réduire la luminosité dans la cabine. Et l'on propose par ailleurs des écrans d'affichage multicolore, des lunettes de protection, des matériaux de camouflage et des tissus que l'on pourrait qualifier de caméléons.

Ces matériaux sont aussi potentiellement intéressants pour les économies d'énergie. La consommation énergétique d'un bâtiment diminuerait grâce à un revêtement de toit électrochrome, sombre en hiver (pour mieux absorber l'énergie solaire) et clair en été, ou grâce à des vitrages électrochromes qui s'opacifieraient pour bloquer la lumière du soleil aux heures les plus chaudes de la journée.

Et toujours en matière d'économies d'énergie, l'un des avantages des dispositifs électrochromes est leur faible consommation électrique. En effet, un courant électrique est nécessaire pour créer la transition d'un état d'oxydation du matériau à un autre, mais le nouvel état se maintient avec peu ou pas d'énergie, par « effet de mémoire ». La couleur reste même quand on coupe le courant.

Le phénomène de changement de couleur de ces matériaux est connu depuis le début du XIX^e siècle. En 1815, le Suédois Jöns Jacob Berzelius rapportait que l'oxyde de tungstène (WO_3) pur, de couleur jaune pâle, devient bleu profond s'il subit une réaction de réduction. Aujourd'hui encore,

l'oxyde de tungstène reste l'un des matériaux électrochromes les plus étudiés.

Au XX^e siècle, de nombreux dispositifs et applications électrochromes ont été développés. Citons quelques exemples. En 1929, un brevet a été déposé pour un appareil qui procède à l'oxydation d'ions iodure (I^-) pour produire de l'iode moléculaire (I_2). Ce dernier réagit ensuite avec un précurseur de colorant par oxydation chimique pour produire une couleur intense.

En 1942, un système d'impression électrochrome (du « papier à écrire électrolytique ») a été breveté. Le papier est imprégné de particules d'oxyde de tungstène ou d'oxyde de molybdène (MoO_3). Une électrode joue le rôle d'un

stylet, qui réduit l'oxyde de tungstène au contact du papier et laisse une image bleu-gris. En 1953, Thaddeus Kraus de la Société *Balzars AG*, au Liechtenstein, a proposé d'utiliser la décoloration réversible de l'oxyde de tungstène pour réaliser des écrans d'affichage.

La première entreprise à vouloir exploiter commercialement un produit électrochrome a été la Société *Philips* ; elle s'y est intéressée au début des années 1960, et le premier brevet a été déposé en 1973. Le prototype d'un dispositif d'affichage

L'ESSENTIEL

■ Les matériaux dits électrochromes changent de couleur lorsqu'ils sont parcourus par un courant électrique.

■ Leurs molécules subissent des réactions d'oxydoréduction qui modifient les longueurs d'onde lumineuses absorbées par le matériau.

■ Les matériaux électrochromes étant très variés, les possibilités d'utilisation sont multiples.

■ Des fenêtres d'opacité réglable, des miroirs anti-éblouissement, des textiles aux couleurs changeantes en sont des exemples.