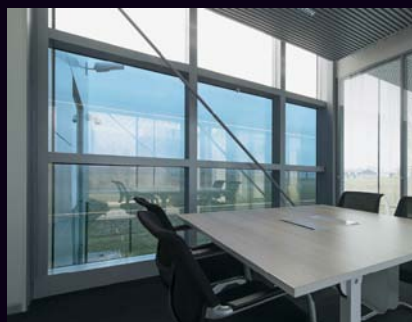




3. CETTE FENÊTRE CONTIENT DES MATÉRIAUX ÉLECTROCHROMES (ici des composés inorganiques). Elle peut être commutée d'un état incolore à un état bleu foncé. Le choix de la tension appliquée permet de moduler le degré d'assombrissement ou de revenir à l'état clair, le système étant réversible.

Cela permet de conserver les électrons sur l'une des deux électrodes et de maintenir la coloration même quand le champ électrique est éteint. Sinon, les électrons quitteraient l'électrode (on aurait un « courant de fuite ») et le système reviendrait à l'état non coloré.

Il faut en outre que l'électrolyte soit transparent dans la plage de longueurs d'onde utilisée, qu'il ne subisse pas lui-même des réactions d'oxydoréduction, et qu'il ait une faible volatilité.

Des fenêtres qui s'opacifient

Les Sociétés *Gesimat* en Allemagne ou *Saint-Gobain* en France et sa filiale *SAGE Electrochromics* utilisent cette structure pour fabriquer des fenêtres intelligentes (voir la figure 3). Les matériaux électrochromes utilisés par *Sage Electrochromics* sont inorganiques (voir l'encadré page 61). Dans les fenêtres de *Gesimat*, les couches électrochromes sont à l'état solide et faites d'oxyde de tungstène et de bleu de Prusse. L'électrolyte est du polyvinyle de butyral, une résine conductrice d'ions et couramment utilisée pour l'assemblage de couches de verre, dans la fabrication de verre feuilleté. Comme nous l'avons vu, avec l'oxyde de tungstène et le bleu de Prusse, on a un mécanisme de colorations complémentaires. Quand l'électrode recouverte de bleu de Prusse est l'anode (par où le courant arrive dans la cellule), et que l'électrode recouverte d'oxyde de tungstène est la cathode (par où le courant sort), les deux matériaux sont dans leur état bleu. En inversant la polarité, les deux électrodes se décolorent.

Gesimat a récemment lancé une chaîne de fabrication pilote pour produire du verre feuilleté électrochrome dans des dimensions allant jusqu'à 2,4 mètres de haut par 1 mètre de large. La difficulté est d'alimenter toute la surface avec un courant uniforme.

Une autre application est représentée par les rétroviseurs à atténuation automatique NVS (*Night Vision Safety*) de la Société *Gentex*, qui ont été un succès commercial. Ils s'obscurissent pour supprimer les effets d'éblouissement (voir la figure 4). Dans ces dispositifs, une surface de verre recouverte d'oxyde d'indium dopé à l'étain (le côté conducteur étant tourné vers l'intérieur) et une surface métallique réfléchissante, séparées d'une fraction de millimètre, forment les deux électrodes de la cellule. Le mince espace entre les électrodes est rempli d'un gel contenant deux matériaux électrochromes, sans électrolyte supplémentaire. La composition exacte du miroir est protégée par des brevets, mais on peut supposer que les deux espèces chimiques électroactives sont un colorant de viologène à la cathode, et, à l'anode, un colorant thiazinique à charge négative ou une espèce de phénylènediamine (ingrédient courant des colorants capillaires).

Une fois le miroir allumé, les espèces ioniques migrent vers leurs électrodes respectives, et une couleur bleu-vert intense (combinaison des deux états colorés des matériaux électrochromes) est produite. L'éblouissement est ainsi réduit à la fois par une diminution de l'intensité lumineuse et par l'absorption de certaines longueurs d'onde.

La migration des ions a lieu parce qu'il n'y a pas d'électrolyte support inerte supplémentaire. Les réactions d'oxydoréduction aux deux électrodes produisent des composés électriquement neutres. Ces molécules ne sont plus soumises au champ électrique et diffusent depuis les électrodes pour se retrouver dans la solution intermédiaire. Une réaction entre les deux espèces régénère les composés initiaux, incolores et chargés. Ce type de dispositif électrochrome cyclique nécessite donc un faible courant continu pour reconstituer les espèces colorées électroactives perdues. Ce système assure



LA GÉNÉRALISATION DES FENÊTRES intelligentes permettrait de faire des économies d'énergie notables.



que le miroir est décoloré quand il est hors tension : il n'y a pas besoin d'inverser la polarité électrique pour décolorer le miroir. Pour cette raison, on parle de miroir auto-effaçant. Ce choix technique obéit à la réglementation américaine, qui exige que le « mode de défaillance », correspondant à une coupure du courant, soit l'état clair.

En association avec la Société *PPG Aerospace*, *Gentex* a désormais étendu sa gamme de produits à des hublots interactifs destinés à l'aéronautique. Conçus pour remplacer les stores classiques à tirette, ces hublots à luminosité modulable offrent aux équipages et passagers des compagnies aériennes un meilleur contrôle de leur confort. Commercialisés



par PPG Aerospace, les premiers hublots électrochromes passent d'un état clair à un état extrêmement sombre, ou à un état intermédiaire, simplement en effleurant un bouton. Ces hublots intelligents ont fait leur apparition en 2011 sur des avions de ligne (Boeing 787, ou Dreamliner) ainsi que sur des avions d'affaires (Hawker Beechcraft King Air 350i).

De nombreuses études portent sur le développement de fenêtres électrochromes. L'objectif des industriels est de proposer à une vaste clientèle des fenêtres intelligentes permettant de régler la luminosité (et la température) dans les bâtiments pour un coût modéré. Ces dispositifs autoriseraient des économies d'énergie notables en limitant le recours aux systèmes d'air conditionné, tout en améliorant le confort des bureaux.

L'une des difficultés est d'obtenir une bonne transparence des fenêtres dans leur état non coloré. Ainsi, Kuan-Jiuh Lin et ses collègues, de l'Université Chung Hsing à Taïwan, ont développé un moyen de faire croître des nanofils d'oxyde de titane sur du verre de façon à obtenir un indice de réfraction plus faible, ce qui limite les réflexions.

Comme nous l'avons évoqué, les premiers systèmes électrochromes visaient surtout les dispositifs d'affichage, mais ces travaux ont perdu de leur intérêt avec l'arrivée sur le marché (et la rapide domination) des écrans à cristaux liquides. Il est peu probable que les systèmes électrochromes aient un avenir dans la fabrication des téléviseurs à grand écran, mais ils pourraient être intéressants pour réaliser des écrans en couleurs à faible coût, dans



Gentex Corporation

4. DE NOMBREUSES AUTOMOBILES sont équipées des rétroviseurs anti-éblouissement NVS (Night Vision Safety) de Gentex. Quand ils sont activés (*en bas*), les colorants électrochromes produisent une couleur bleu-vert. L'éblouissement est réduit via l'élimination d'une partie de l'intensité lumineuse et l'absorption de certaines longueurs d'onde.

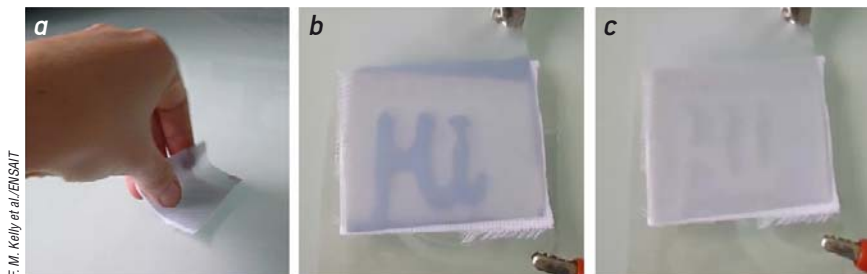
des applications telles que le papier électronique, les panneaux signalétiques et les étiquettes de prix réutilisables.

En mettant à contribution toute sa gamme de couleurs des polymères électrochromes solubles, l'équipe de J. Reynolds a montré comment créer rapidement des prototypes de dispositifs électrochromes en utilisant des aéroglyphes et des imprimantes à jet d'encre. En pulvérisant les solutions à travers des caches, les chercheurs ont déposé un motif sur un substrat, les couches superposées offrant toute une palette de coloris. En 2012, ils ont utilisé des techniques d'impression sur rouleau pour recouvrir des substrats flexibles, en PET, avec des composés électrochromes, et ils ont aussi incorporé un dispositif photovoltaïque imprimé pour conférer au système une autonomie en énergie.

Changer de couleur rapidement

Une limitation récurrente des dispositifs électrochromes est leur temps de commutation relativement long, de l'ordre du dixième de seconde et plus. Il est contraint par le taux de diffusion des ions durant le processus d'oxydoréduction. Si l'on diminuait l'épaisseur des couches électrochromes, la distance de diffusion des ions serait réduite, mais alors les couches plus minces n'offriraient plus un contraste satisfaisant, nécessaire à une bonne coloration.

Sang Bok Lee et ses collègues, de l'Université du Maryland, ont proposé d'utiliser des nanotubes comme moyen d'augmenter les vitesses de commutation. Ils ont choisi de faire croître des tubes creux de polymères électrochromes dont les parois ont une épaisseur de 10 à 20 nanomètres seulement, mais dont la longueur est de plusieurs centaines de nanomètres. Les ions diffusent uniquement à travers l'épaisseur de la paroi pour produire les réactions d'oxydoréduction. Les temps de commutation résultants sont de l'ordre de 10 millisecondes. La longueur des nanotubes assure un bon contraste des couleurs et l'équipe de S. B. Lee a mis au point en 2012 des méthodes pour faire croître des nanotubes hybrides de plusieurs polymères afin d'améliorer encore les couleurs. Ils ont pu faire la démonstration de couches de nanotubes fonctionnant à la fois par réflexion et par transmission, ce



F. M. Kelly et al./ECSAUT

5. LES TISSUS peuvent servir de support pour des matériaux électrochromes. Une équipe de l'École nationale supérieure des arts et industries textiles, à Roubaix, développe des supports souples composés de textiles (*a*). Un textile sert de réservoir pour le composé électrochrome qui prend une teinte bleue lorsqu'il est réduit (*b*) et qui devient transparent lorsqu'il est oxydé (*c*). Ce matériau est placé entre deux électrodes textiles conductrices. La transition entre les deux états est rapide (inférieure à deux secondes) et la durée de vie dépasse aujourd'hui trois semaines (un progrès d'un facteur 10 par rapport à des dispositifs précédents).