

Ainsi, depuis une trentaine d'années, la gamme des matériaux électrochromes s'est considérablement élargie. Les industriels peuvent aujourd'hui sélectionner les composés les plus adaptés pour leurs dispositifs en fonction de l'utilisation envisagée et de différents critères : le choix de couleurs, le type de support (vitre, écran d'affichage, textile), etc.

Comment les dispositifs électrochromes sont-ils mis en œuvre ? Leurs composants sont des couches successives qu'il faut assembler de façon à obtenir des cellules électrochimiques réversibles et réutilisables. Un tel dispositif, dans sa version la plus simple, se compose de deux électrodes séparées par un électrolyte sous forme de liquide, de gel ou de solide contenant des ions mobiles ; la substance électrochrome est mise en solution dans l'électrolyte ou placée sous forme de film solide entre l'une des électrodes et l'électrolyte (voir la figure 2). Le changement de couleur se produit en inversant la polarité et en modulant la tension appliquée aux électrodes. Suivant le sens du courant, le film électrochrome s'enrichit ou s'appauvrit en électrons, et les réactions d'oxydoréduction qui s'ensuivent

L'AUTEUR



Roger MORTIMER est professeur de physico-chimie à l'Université de Loughborough, au Royaume-Uni. Il est spécialiste de nouveaux matériaux pour électrodes, présentant en particulier des propriétés électrochromes.

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *American Scientist*.

modifient ses propriétés optiques (sur l'une des deux électrodes, des réactions d'oxydation ont lieu, tandis que l'autre subit des réactions de réduction).

Absorber et transmettre ou réfléchir la lumière

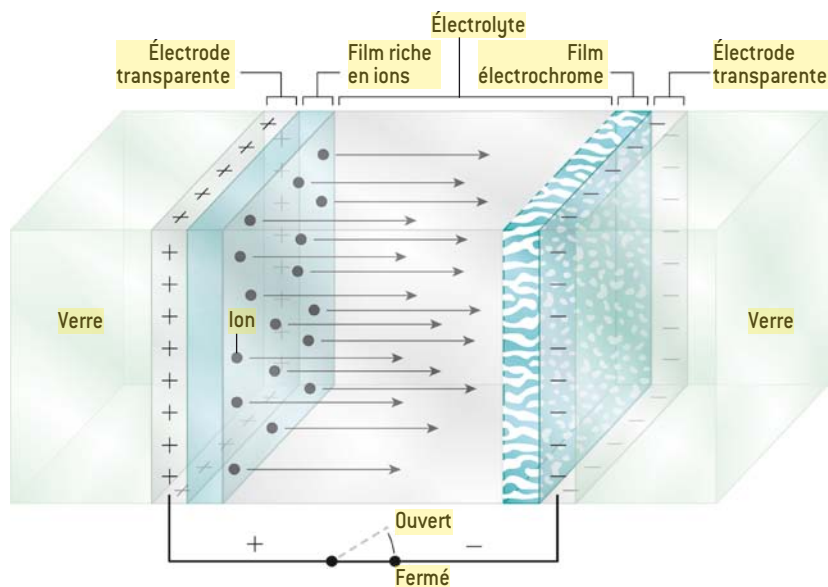
Les dispositifs électrochromes se répartissent en deux familles. Les uns fonctionnent en transmettant la lumière, les autres en la réfléchissant.

Dans le premier mode, la lumière traverse le dispositif (par exemple des lunettes ou des fenêtres intelligentes), dont les deux électrodes sont transparentes. Sur l'électrode dite primaire, une partie de la lumière est absorbée par le matériau électrochrome, ce qui modifie la couleur ou atténue l'intensité lumineuse. La réaction d'oxydoréduction sur l'autre électrode (secondaire) est choisie de façon à ce qu'il n'y ait pas de changement perceptible de couleur. Une autre possibilité est d'utiliser un matériau électrochrome dont le changement de couleur va s'ajouter à celui de l'électrode électrochrome primaire, renforçant ainsi la coloration. Par exemple, une couche mince de bleu de Prusse (qui passe de l'incolore au bleu par oxydation) peut être complétée, à l'autre électrode, par une couche d'oxyde de tungstène (qui change de l'incolore au bleu par réduction).

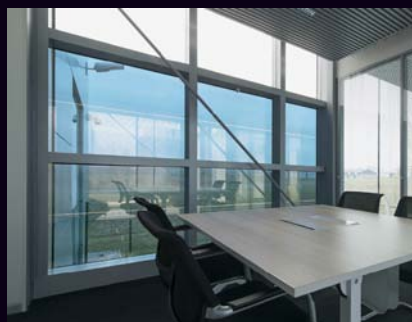
Dans les dispositifs fonctionnant par réflexion, tels les écrans d'affichage et les miroirs anti-éblouissement, on place un métal poli (ou un revêtement réfléchissant) derrière ou à la place de la seconde électrode. Comme dans les dispositifs à transmission, une partie de la lumière est absorbée, soit pour en réduire l'intensité, soit pour supprimer certaines longueurs d'onde et ainsi obtenir la couleur désirée.

Dans les deux types de dispositifs, à transmission ou à réflexion, les électrodes doivent être transparentes et, bien entendu, conductrices. Le matériau utilisé est souvent un oxyde conducteur transparent tel que l'oxyde d'indium, dopé avec de l'étain, du fluor ou de l'antimoine. Les couches correspondant aux électrodes sont déposées sur du verre ou sur du PET (polytéréphthalate d'éthylène), un polymère flexible.

Enfin, la couche d'électrolyte séparant les deux électrodes doit permettre la circulation d'ions, mais pas celle d'électrons.



2. UN DISPOSITIF ÉLECTROCHROME est constitué d'une superposition de couches. Dans le cas présent, le dispositif fonctionne en mode absorbant avec transmission de la lumière et utilise un matériau électrochrome solide. Deux couches de verre sont recouvertes de conducteurs transparents qui constituent les électrodes. Le film électrochrome est déposé sur une électrode et un substrat riche en ions est accolé à l'autre électrode. Un électrolyte, matériau permettant la circulation des ions, sépare les électrodes. Quand une tension est appliquée, le matériau électrochrome subit une réaction d'oxydation ou de réduction selon le sens du courant. Le transfert d'ions (points noirs) assure l'équilibre des charges électriques.



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