

Procédés thermiques de dessalement à haut rendement

La crise de l'eau potable annoncée pour les années 2000-2020 relance fortement l'intérêt de développer rapidement des techniques de dessalement moins chères, plus simples, plus robustes, plus fiables, si possible moins consommatrices d'énergie et respectant l'environnement. Grâce aux connaissances acquises et à sa capacité à développer des technologies innovantes, le CEA contribue activement à relever ce défi technique et économique.

Actuellement, 1,4 milliard d'habitants sur terre ne disposent pas d'une eau propre à la consommation. Ce chiffre atteindra 2,3 milliards d'ici 25 ans. Les océans (1,34 milliard de milliards de mètres cubes), qui représentent 97 % de l'eau de la planète, constituent pourtant une réserve inépuisable d'eau potable à condition d'en extraire de l'eau douce. Cette opération est beaucoup plus simple et moins coûteuse que d'en retirer le sel bien qu'on parle, improprement, de dessaler l'eau de mer. Le coût de production d'eau douce par dessalement, jadis très élevé, a fortement baissé puisqu'il peut descendre en dessous de 1 euro/m³ pour des unités de grosse capacité.

Les procédés existants

Le procédé le plus ancien et le plus répandu est la **distillation**. L'eau s'évapore puis est condensée tandis que le sel, non volatil, reste dans la saumure concentrée. Ce procédé recrée le cycle d'évaporation et de condensation de l'eau dans la nature. Les premiers appareils industriels, apparus il y a plus de deux siècles, équipent actuellement plus de 60 % des installations terrestres. Les 40 % restants sont assurés principalement par un procédé de séparation membranaire appelé **osmose inverse** : sous l'effet d'une pression élevée (plusieurs dizaines de fois la pression atmosphérique), les molécules d'eau contenues dans l'eau de mer traversent une membrane sélective ; les ions constituant les sels dissous, plus gros, ne traversent pas la membrane. Ce procédé découvert en 1950 s'est développé dans les années soixante. Il a pu bénéficier des progrès accomplis en particulier dans le domaine des **polymères** pour la fabrication de membranes de plus en plus performantes et en développant des systèmes à récupération d'énergie. Le procédé par distillation a lui-même été amélioré en vue de réduire la quantité d'énergie consommée initialement pour évaporer l'eau (environ 700 kWh thermiques pour évaporer un mètre cube d'eau, soit un coût d'environ 15 euro pour la part énergie).



Usine de dessalement de l'eau de mer à Jubail (Arabie Saoudite). Les plus gros producteurs d'eau douce se trouvent aujourd'hui au Moyen-Orient.



Ch. Vioujard/GAMMA

Grâce à des cycles plus élaborés qu'une simple distillation (évaporation "multi-flash", multiple effet, compression de vapeur), cette consommation peut passer en dessous de 100 kWh thermiques par mètre cube et même de 10 kWh (électriques) pour les cycles à compression de vapeur (encadré). La production d'eau douce est d'ailleurs souvent combinée à la fourniture d'électricité.

La comparaison des avantages et des inconvénients de chaque procédé permet de situer leur domaine d'application. La distillation est très bien adaptée aux grosses capacités de production bien que la capacité maximum des usines par osmose inverse augmente sans cesse. Les deux gammes ont fini par se recouvrir partiellement. En règle générale un peu plus coûteuse que l'osmose inverse, la distillation produit une eau d'une très grande pureté, indépendante de la qualité et de la salinité de l'eau initiale. L'osmose inverse est beaucoup plus intéressante dans le cas d'eaux peu salées, comme par exemple les eaux saumâtres.

Pas moins de 12 500 unités de dessalement installées à terre à travers le monde produisent aujourd'hui plus de 20 millions de mètres cubes d'eau douce par jour : 14 millions à partir de l'eau de mer et le reste à partir d'eaux saumâtres. Des usines produisent jusqu'à plusieurs centaines de milliers de

mètres cubes par jour à l'aide d'une dizaine d'unités fonctionnant en parallèle. Les plus gros producteurs d'eau douce sont les pays du Moyen-Orient, mais des demandes de plus en plus fortes apparaissent aujourd'hui sur tous les continents. Les zones arides et semi-arides sont concernées mais également les zones à forte concentration de population, d'industrie et de tourisme, là où les ressources locales d'eau potable deviennent insuffisantes ou inconsommables. La demande pressante, généralement non satisfaite, devient très préoccupante et, à court terme, elle risque d'entraîner des catastrophes locales voire des conflits.

Dès les années soixante

Dès les années 60, la France, par un arrêté ministériel de juin 1966, avait créé un comité chargé des problèmes de dessalement réunissant en particulier la Délégation générale à la recherche scientifique et technique (DGRST), Électricité de France (EDF), le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et le Centre national pour l'exploitation des océans (Cnexo). Le CEA était chargé de l'exécution des décisions prises pour promouvoir et coordonner l'effort de recherche et développement des secteurs privé et public. De 1966 à 1976, ses centres de Saclay, Grenoble et Cadarache



Osmonics

Exemple de module de membrane d'osmose inverse utilisée pour le dessalement de l'eau.



ont été au cœur d'un vaste programme relatif aux études de procédés, de **thermohydraulique**, d'entartrage et de corrosion, de caractérisation de matériaux pour les membranes d'osmose inverse, d'avant-projets de grosses unités de dessalement couplées à des réacteurs nucléaires, d'analyses technico-économiques et d'optimisation, de couplage du dessalement à des sources d'énergies renouvelables. La participation du CEA à des projets ou appels d'offres internationaux avec des industriels français (Alstom, CGE, Pechiney, Sidem, Kestner, etc.) a été prépondérante et a permis au CEA d'acquiescer une R&D de niveau mondial.

Une demande accrue

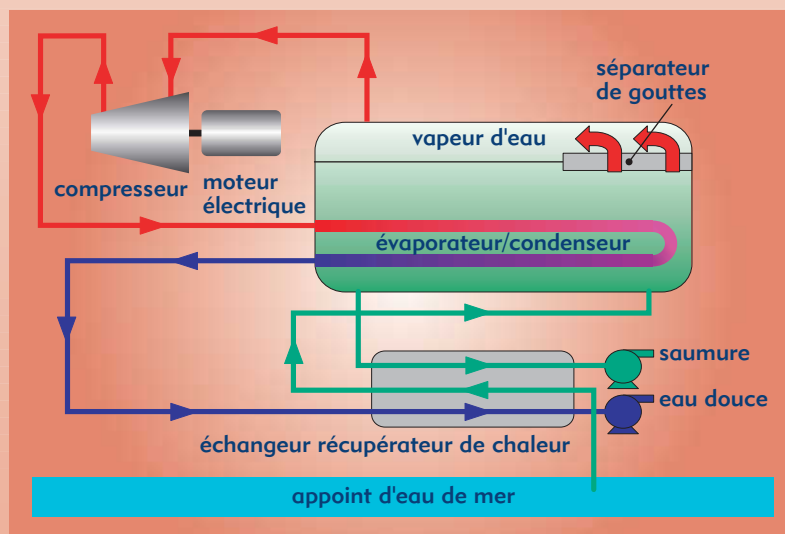
Aujourd'hui le Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques (GRETh) au CEA/Grenoble est sollicité pour des projets de dessalement dans le domaine de la distillation thermique pour des unités de production de quelques mètres cubes jusqu'à plusieurs milliers de mètres cubes par jour. Indépendamment de la relance du marché due aux besoins d'approvisionnement, les recommandations formulées par les organismes et les experts internationaux génèrent de nouveaux développements, en particulier trois d'entre elles. En premier lieu, l'accessibilité à une eau dessalée de qualité doit être étendue : il faut donc encore réduire le coût du dessalement, la robustesse et la simplicité d'exploitation des installations. Leur impact environnemental est aussi à considérer : il s'agit de réduire les rejets pol-

Le dessalement d'eau de mer par compression mécanique de vapeur

Le principe du dessalement d'eau de mer par compression mécanique de vapeur (figure) est celui d'une pompe à chaleur ; l'eau de mer est évaporée après avoir été préchauffée dans un échangeur récupérateur de chaleur. La vapeur d'eau produite est comprimée après avoir été débarrassée des gouttelettes entraînées par un séparateur. Sa pression ayant été élevée, la vapeur se condense alors à une température supérieure à celle qui règne dans l'évaporateur ; grâce à la chaleur latente de condensation qui est transférée, le cycle d'évaporation et de condensation peut ainsi fonctionner. La vapeur condensée – de l'eau douce – est extraite, ainsi que la saumure concentrée contenant le sel. À cause des problèmes de corrosion et d'entartrage des composants, un tel dispositif fonctionne généralement à une température limitée à environ 60 °C (l'eau de mer bout sous un vide partiel), avec un facteur de concentration

égal à deux : 1 m³ d'eau de mer (35 g/l de sel) donnera 500 l d'eau douce et 500 l de saumure à 70 g/l de sel seront rejetés à la mer. Ce dispositif permet de ne consommer qu'une dizaine de kilowattheures électriques au lieu des 700 kWh thermiques d'une simple distillation.

L'Union européenne finance un programme sur le dessalement associant un consortium d'industriels et d'organismes de recherche. Ce projet, mené dans le cadre des procédures Craft, associe des PME en vue de réaliser une unité de petite capacité (jusqu'à 1 t/h) à compression mécanique de vapeur et en utilisant un maximum de matériaux polymères ayant un excellent comportement face à la corrosion et à l'encrassement, y compris pour les surfaces d'échange. L'objectif est de réduire au maximum le coût de l'installation et ses frais de maintenance.



luants (ions métalliques issus des produits de corrosion, produits chimiques contre l'encrassement biologique et l'entartrage). Enfin, le dessalement doit être une activité durable : il faut autant que possible coupler les usines à des sources d'énergies renouvelables ou valorisant des rejets thermiques d'autres activités telles que l'incinération ou la production d'électricité.

Les progrès réalisés dans le domaine des matériaux, des transferts de chaleur, des technologies de fabrication, des produits de traitement biodégradables sont autant de réponses pouvant satisfaire ces recommandations. Le GRETh a déjà engagé des programmes sous forme de collaborations avec

des industriels et à travers des projets européens. En parallèle, et en association avec un département de la Direction de l'énergie nucléaire au CEA/Cadarache, des études de production combinée d'eau douce et d'électricité nucléaire pourraient également répondre à la demande massive d'une eau de qualité à moindre coût.

Philippe Bandelier
 et **Jean-Claude Deronzier**
 Groupement pour la recherche
 sur les échangeurs thermiques (GRETh)
 Direction de la recherche technologique
 CEA/Grenoble

Les échangeurs thermiques compacts, une innovation écologique et rentable

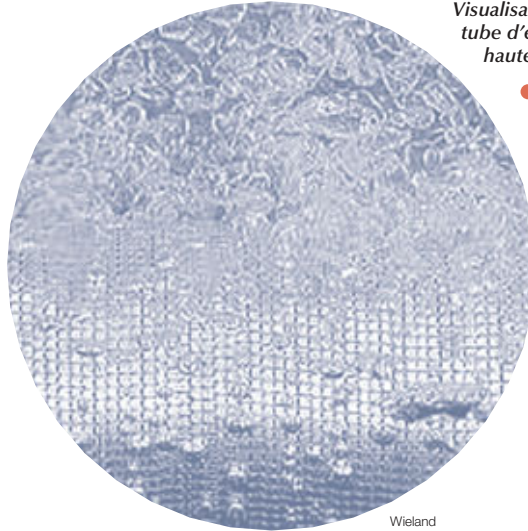
L'obligation de réduire les investissements et d'améliorer l'efficacité énergétique a conduit à introduire des échangeurs thermiques compacts et à hautes performances dans les procédés industriels, où les échanges thermiques jouent un rôle essentiel. Fort de ses compétences acquises dans le nucléaire, le CEA contribue, avec les entreprises partenaires, à leur optimisation.

Un échangeur thermique est destiné à réchauffer (ou refroidir) un fluide au moyen d'un autre sans qu'ils se mélangent. Un échangeur compact est caractérisé par une surface d'échange importante par unité de volume (plus de 400 m²/m³) ou de masse, ce qui implique l'utilisation de canaux de dimension réduite. Les techniques d'intensification permettent soit d'augmenter la surface d'échange, soit d'augmenter le transfert de chaleur à la paroi par modification de la structure de l'écoulement à proximité de la paroi ou au cœur de l'écoulement.

Les avancées réalisées ces dernières années du point de vue de la compréhension des mécanismes fondamentaux, des méthodes de dimensionnement et des procédés de fabrication permettent d'envisager une utilisation accrue des échangeurs compacts et des techniques d'intensification dans les industries de procédés. En outre, l'échangeur thermique, longtemps considéré comme un équipement permettant une utilisation plus rationnelle de l'énergie, devient actuellement, pour de nombreuses applications, le cœur même du procédé. Dans le domaine du traitement des COV (**composés organiques volatils**), par exemple, les procédés par condensation font appel à un échangeur pour la fonction principale. Dans les unités de production de gaz naturel, une **distillation** partielle du fluide peut être obtenue directement dans des échangeurs compacts.

Une spécialité européenne

Dans le contexte actuel de mondialisation des marchés, l'industrie nationale doit innover et mettre sur le marché des technologies performantes tant sur le plan technique qu'économique. De fait, les échangeurs de chaleur compacts sont une "spécialité européenne" et la France compte de nombreuses sociétés qui en fabriquent et en installent, notamment des PME. Actuellement, il n'est pas un secteur qui n'utilise ce type d'échangeur, mais malgré ses bonnes performances, certains industriels sont toujours relativement réticents à l'employer sur leurs sites de production. Il



Visualisation de l'ébullition sur un tube d'échangeur de chaleur à hautes performances.

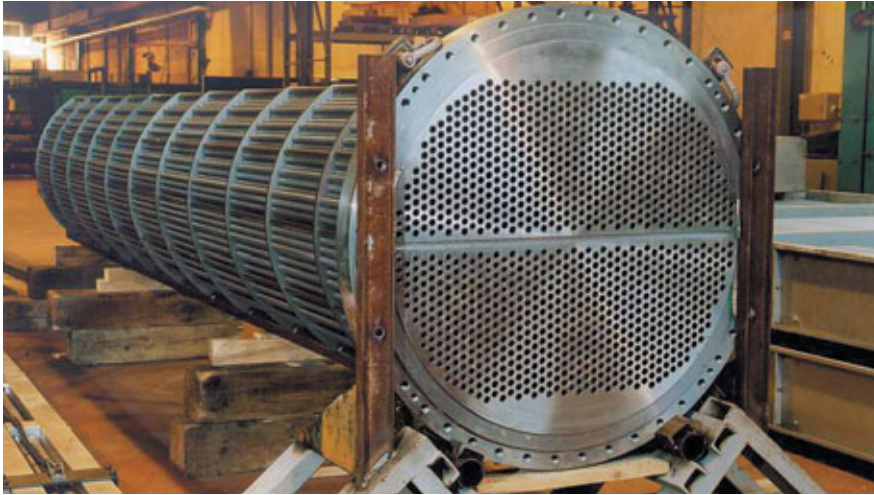


Le projet européen d'échangeur à hautes performances pour les procédés industriels

Dans le cadre d'un projet européen coordonné par le CEA/GRETh regroupant dix partenaires dont sept industriels, un prototype d'échangeur à hautes performances de 300 m² et d'une puissance de 5 MW a été installé sur un site de production de polypropylène – matière plastique aux multiples applications – de la société Targor en Allemagne. L'échangeur est installé au pied d'une colonne de distillation pour la purification du propylène, et le bas de colonne est chargé en propane qui est vaporisé dans l'échangeur. L'industriel désirait augmenter la capacité de production de son installation de 20 % sans modifier fondamentalement son procédé. Il fallait donc pouvoir générer 20 % de vapeur de propane en plus tout en conservant la même source chaude. Cette source chaude provenant du refroidissement de deux réacteurs chimiques, la température et le débit étaient imposés. Étant donné les écarts de température entre la source chaude (eau) et la source froide (propane), il était nécessaire d'augmenter les performances thermiques de l'échangeur d'au moins 50 % tout en conservant un encombrement identique pour limiter les travaux de raccordement. La solution consistait donc à remplacer l'échangeur existant par un échangeur équipé de tubes à hautes performances. Si cette

solution n'avait pas été envisagée, il aurait été nécessaire de rajouter une chaudière à vapeur sur le circuit pour réchauffer l'eau avant l'échangeur. Ceci aurait impliqué des frais d'installation importants et un coût de fonctionnement plus élevé pour prendre en compte la consommation de vapeur d'eau. Avec ce nouvel échangeur, les économies d'énergie sont estimées à 1,7 tonne/heure de vapeur d'eau (soit 1 MW), ce qui représente une économie de l'ordre de 150 000 euro par an. L'échangeur a été réalisé par la société CIAT (partenaire du GRETh) et incorpore des tubes à surface structurée qui permettent d'obtenir en ébullition des performances 2 à 3 fois supérieures que celles d'un tube lisse. L'échangeur fonctionne depuis avril 2000 avec des performances supérieures à celles requises à l'origine.

Au cours de ce projet, une collaboration étroite entre les différents partenaires a permis de développer et caractériser la géométrie de base des tubes, d'effectuer des essais sur un petit pilote (1 m² de surface d'échange) et finalement de réaliser le pilote industriel. Une modélisation fine de l'écoulement diphasique a été réalisée en parallèle sur la base des codes de calculs développés par le CEA pour la sûreté nucléaire.



CIAT

Échangeur incorporant des tubes à hautes performances en cours de fabrication par la société CIAT, partenaire du CEA/GRETh.



convient donc de prouver que ces équipements offrent de meilleures performances que les échangeurs conventionnels et gardent une bonne fiabilité. Il faut pour cela mener des projets de recherche et de développement à trois niveaux. Des études de base doivent permettre de mieux maîtriser la physique du transfert de chaleur, ce qui permet de proposer de nouvelles structures et géométries. Des études globales doivent

valider les performances thermiques et hydrauliques en conditions industrielles, ce qui nécessite des essais sur plate-forme ; d'autres, enfin, doivent intégrer l'échangeur dans son contexte productif.

S'il faut souligner le rôle innovant des industries européennes dans ce domaine, il convient surtout de noter l'émergence de ces technologies aux États-Unis. Cela se traduit par le rachat par des entreprises américaines de fabricants européens d'échangeurs compacts et par un développement considérable des programmes de R&D aux États-Unis.

Des créneaux dans la protection de l'environnement

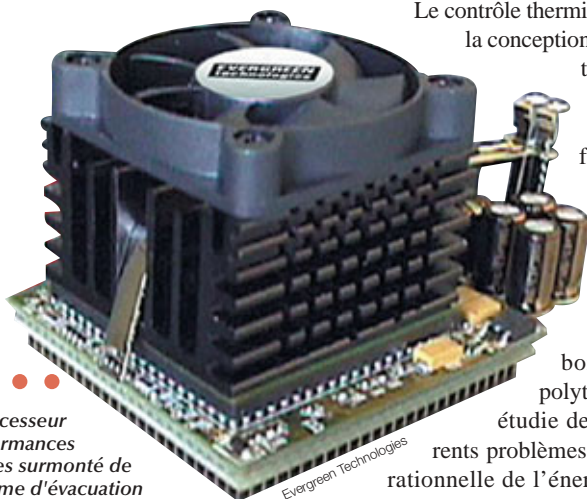
Dans le domaine de la protection de l'environnement, hormis le cas du traitement des COV par condensation, les échangeurs de cha-

leur ne sont que des équipements conditionnant les fluides avant et après leur traitement. Toutefois, dans de nombreuses applications, le coût de fonctionnement des installations de traitement est relativement élevé et des économies substantielles peuvent être obtenues en utilisant des échangeurs plus efficaces. Par ailleurs, pour de nombreuses unités de traitement, il importe de réduire la taille et le poids des installations. Ceci est plus particulièrement vrai pour les unités transportables (traitement des sols pollués). L'intégration d'échangeurs compacts, dans un contexte environnemental, permet d'une part d'augmenter l'efficacité énergétique et d'autre part de réduire l'encombrement et les coûts. Les actions à mener dans ces domaines portent sur des projets de démonstration et sur une caractérisation thermique et hydraulique en conditions réelles. D'un point de vue technologique, les échangeurs utilisés dans les procédés de traitement opèrent soit à haute température (incinération des COV), soit doivent être résistants à la corrosion (traitement des solvants et rejets acides) et nécessitent l'utilisation de matériaux nobles ou innovants dans la plupart des cas plus chers que des aciers conventionnels. Dans ce contexte, la réduction de la surface d'échange permet de réduire l'impact global de l'échangeur qui intègre les phases d'élaboration et de mise en forme des matériaux.

Bernard Thonon et Pierre Mercier

Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques (GRETh)
Direction de la recherche technologique
CEA/Grenoble

Le refroidissement électronique : problème et solutions



Microprocesseur aux performances améliorées surmonté de son système d'évacuation de la chaleur.



Le contrôle thermique est un point clef de la conception des équipements électroniques, car la qualité et la fiabilité de leurs composants dépendent fortement de la température. La miniaturisation n'a fait que rendre plus délicate la dissipation de la chaleur. C'est pourquoi le CEA, en collaboration avec l'Institut polytechnique de Grenoble, étudie des solutions aux différents problèmes posés par l'utilisation rationnelle de l'énergie dans ce domaine. Il convient de limiter la température d'une

puce électronique en dessous d'un seuil critique afin de réduire l'agitation thermique dans le réseau du **semiconducteur**. La température de jonction du composant, qui représente l'image du niveau thermique moyen de la puce à son régime nominal, se situe en effet autour de 125 °C pour le silicium. Une bonne homogénéité de la température dans le volume du composant permet par ailleurs de limiter les contraintes thermomécaniques.

L'architecture d'un composant classique (figure) montre le cheminement thermique et les modes de dissipation des calories de l'élément de base, la puce en matériau semi-conducteur où réside la fonction électrique, vers la carte ou vers le circuit imprimé *via* le substrat. Ce dernier, formé de plusieurs

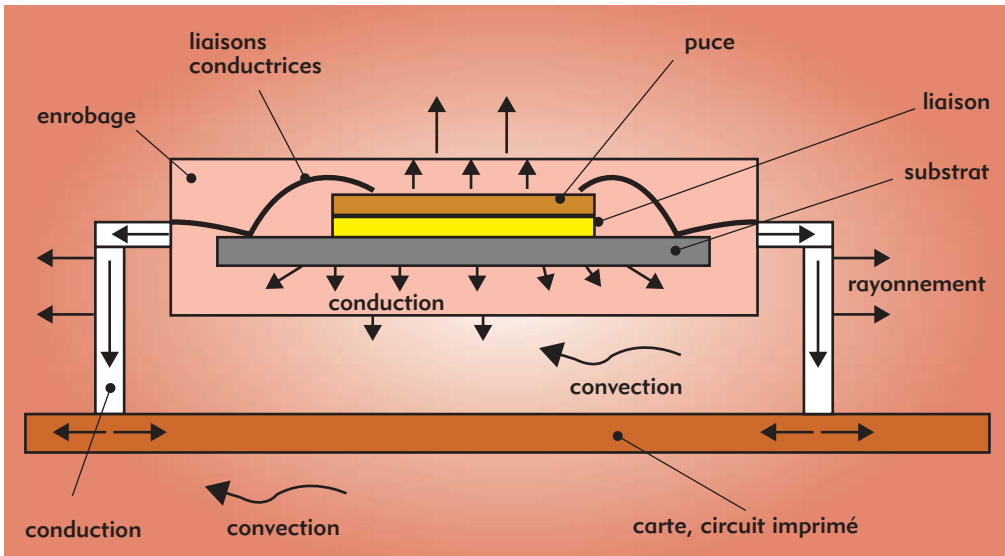


Figure. Architecture et cheminement thermique dans un composant électronique.



couches de matériaux différents, assure la tenue mécanique, l'isolation électrique entre la puce et le boîtier et la transmission des signaux électriques vers l'extérieur. L'ensemble puce/substrat, constituant le boîtier, est en général enrobé dans une résine protectrice. En électronique de puissance (voir *Vers une électronique de puissance basse tension, économe en énergie et à faible coût*), il n'y a pas de carte et le boîtier est relié de manière filaire aux autres éléments.

Un problème de plus en plus ardu

Les applications de l'électronique sont partout et ont gagné le grand public. Dans tous les domaines – militaire, spatial, industriel et domestique – elles exigent un accroissement de la vitesse de réponse des dispositifs, une réduction de la taille, des fonctionnalités plus complexes et une meilleure fiabilité. La loi de Moore, qui prédit que les performances des semiconducteurs doublent tous les dix-huit mois, continue de se vérifier depuis le début des années 1970 pour l'ensemble des composants : microprocesseurs, mémoires, circuits logiques, composants de puissance.

Le problème d'évacuation de la chaleur se pose maintenant au niveau même du composant, à cause de la forte augmentation de la densité de flux résultant de la miniaturisation et de l'augmentation des fréquences de fonctionnement. Des **densités de flux** de 50 W/cm² deviennent la règle pour les nouvelles générations de microprocesseurs. Quant aux convertisseurs d'électronique de puissance utilisés pour la traction électrique sur rails et les futurs **véhicules hybrides**, leur volume s'est réduit de manière impressionnante (plusieurs ordres de grandeur). Les IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), avec une surface d'encombrement de l'ordre du cm², commutent des tensions et des courants importants, travaillent à des fréquences

élevées et avec des densités de flux pouvant atteindre 400 W/cm². Les **diodes laser** dissipent 500 W/cm² et plus.

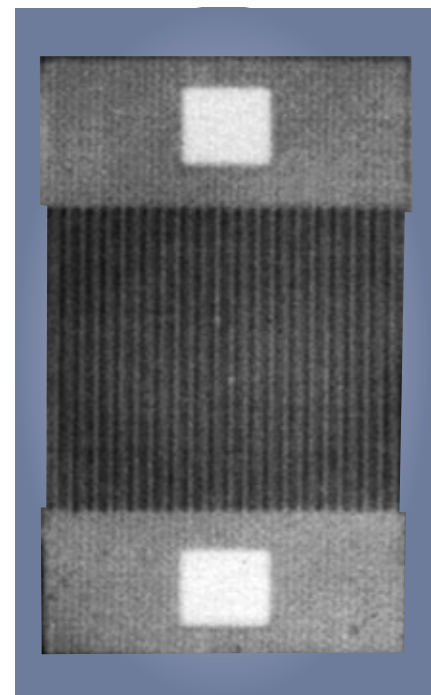
Les technologies nouvelles à mettre en œuvre

Il existe ainsi un besoin réel d'innovation dans le domaine du montage, de la connectique et du refroidissement des composants. Ces dernières années, des études sur des micro-échangeurs en cuivre intégrés sous la semelle des composants de puissance, fonctionnant en **convection** forcée avec un fluide de refroidissement liquide en régime d'écoulement **laminaire** ou sous forme diphasique (phases liquide et vapeur en présence), ont été réalisées. Elles ont montré l'efficacité de tels modes de refroidissement puisque les densités de flux évacuées atteignent 400 W/cm² avec de l'eau. Cependant, ces systèmes présentent plusieurs défauts, notamment le manque d'isolation électrique lorsque l'eau est utilisée et le vieillissement thermomécanique de l'ensemble lorsqu'une céramique isolante est insérée entre la puce et l'échangeur.

Une autre solution consiste à concevoir des micro-refroidisseurs en silicium mettant en œuvre les techniques de gravure profonde (canaux rectangulaires et hexagonaux de diamètre hydraulique interne de l'ordre de 250 nm) et d'autosoudage de plaques de silicium, techniques bien connues du Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (Leti) du CEA. Dans une telle structure, qui fait alors office de support et de boîtier, le refroidissement s'effectue en convection forcée laminaire avec un fluide monophasique. Il intéresse les applications dans lesquelles le composant dissipe une puissance supérieure à 100 W. L'isolation électrique est réalisée grâce à l'insertion d'une couche d'oxyde de silicium de faible épaisseur réduisant à deux le nombre d'in-

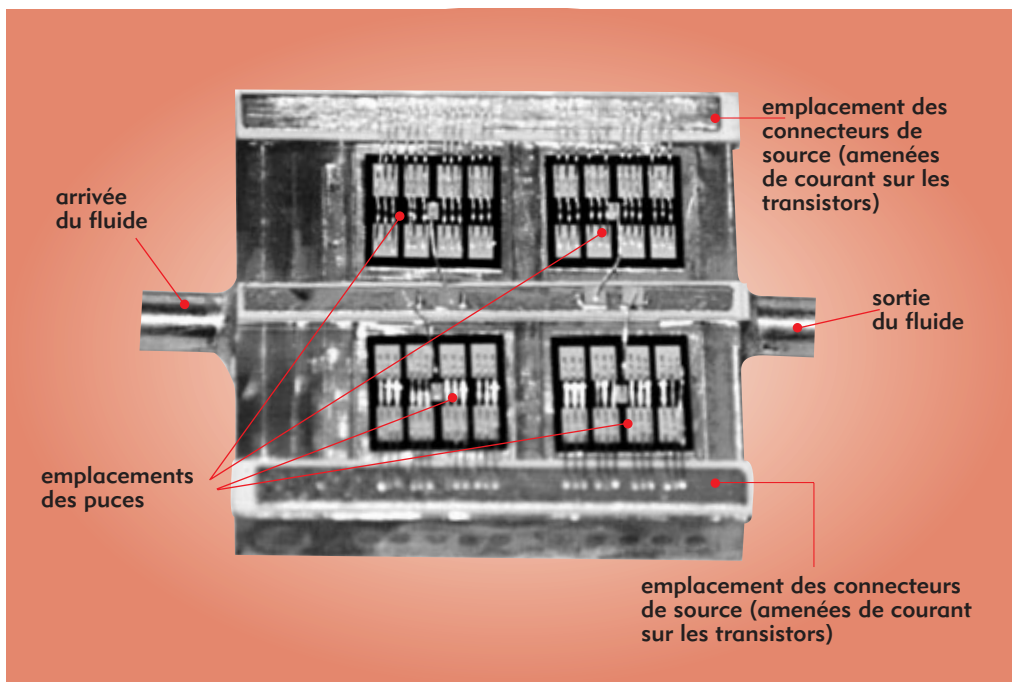


Photographie infrarouge montrant le réseau de microcanaux, les deux collecteurs et les deux trous d'alimentation en fluide d'un micro-échangeur gravé dans le silicium.

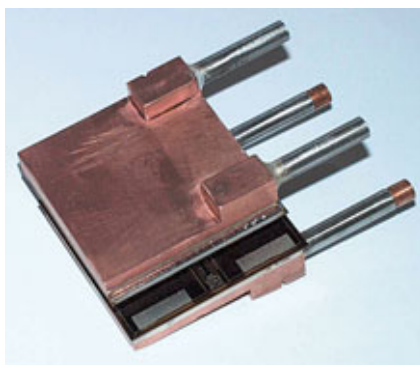


CEA

Prototype de refroidisseur double phase de quatre IGBT4 (dimensions 50 x 50 mm).



Module IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) avec ses canaux d'arrivée et de sortie de fluide.



CEA/LETI

interfaces entre les matériaux de dilatabilité voisine (silicium et oxyde de silicium). Sa faible masse volumique permet par ailleurs d'obtenir un micro-refroidisseur plus compact et plus léger. Les densités de flux mesurées vont de 200 à 400 W/cm² (suivant la géométrie du canal) avec un écart de 40 °C entre le fluide d'extraction et la paroi des canaux. Les refroidisseurs à canaux hexagonaux sont moins performants mais plus aisés et moins chers à réaliser.

Pour les applications de plus faible puissance, inférieure à la centaine de watts, il s'agit non plus de mettre en place dans le silicium une structure à forte évacuation thermique mais une structure à fort pouvoir de diffusion. Le principe d'un échangeur pas-

sif, fonctionnant en double phase, de type caloduc intégré au silicium, est très prometteur, avec une densité de flux potentielle de 100 W/cm². Il fait l'objet de travaux dans de nombreux laboratoires de recherche, dont ceux du CEA.

CEA

Alain Bricard

Groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques (GRETh)
 Direction de la recherche technologique
 CEA/Grenoble
 et **Christian Schaeffer**
 Laboratoire d'électrotechnique de Grenoble
 École nationale supérieure d'ingénieurs électriciens de Grenoble
 Institut polytechnique de Grenoble

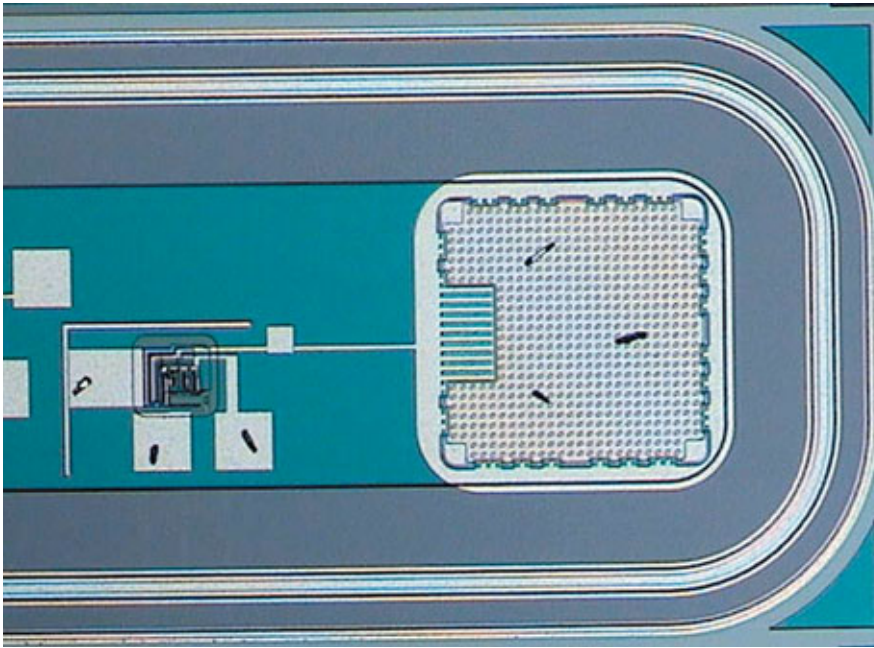
Vers une électronique de puissance basse tension, économe en énergie et à faible coût

Les énergies nouvelles et renouvelables lancent de nouveaux défis à l'électronique de puissance, domaine de la transformation de l'énergie électrique grâce à des composants électroniques à base de **semiconducteurs**, fonctionnant comme des interrupteurs qui se ferment et s'ouvrent alternativement et à haute fréquence.

Ces composants transfèrent l'énergie entre des condensateurs (stockage d'énergie sous forme **électrostatique**) et des bobinages (inductances : stockage d'énergie sous forme

magnétique). Il s'agit de technologies de découpage qui permettent de réaliser des systèmes de conversion de l'énergie électriques avec de faibles pertes et dans des volumes réduits. Parmi les principales applications de l'électronique de puissance figurent les commandes de moteurs des trains (en particulier des tramways et des TGV), les alimentations à découpage des ordinateurs individuels (probablement le marché le plus important) et les régulateurs (ballasts) haute fréquence des lampes basse consommation.

Les domaines de puissance vont du watt au mégawatt, de circuits de quelques centimètres cubes à des installations de très grande taille. Il existe une synergie entre les progrès des microprocesseurs et ceux de l'électronique de puissance : les composants récents ont une structure de surface semblable à celle des microprocesseurs et des mémoires, où des centaines de milliers de cellules de transistors MOSFET (pour *Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*) sont reliées en parallèle. Depuis dix ans, les progrès des



Interrupteur de puissance et sa commande intégrée sur la même puce réalisé au CEA/Leti.



CEA/LETI

premiers sont directement liés à ceux des techniques de micro-lithographie mises au point pour les seconds.

Les ruptures technologiques réalisées

Des composants qui étaient considérés comme irréalisables hier existent aujourd'hui. Les technologies de gravure de plus en plus fines ont permis l'apparition de transistors MOSFET très basse tension (30 à 50 volts) présentant une résistance parasite à l'état passant (résistance résiduelle de l'interrupteur lorsqu'il ferme le circuit ; Ron) de quelques milliohms, nécessaires pour la gestion de l'énergie dans les ordinateurs portables et pour les tensions d'alimentation de plus en plus basses des microprocesseurs. Alors que pour les MOSFET de plus haute tension, la

résistance à l'état passant augmentait très rapidement en fonction de la tenue en tension (loi en $V^{2,4}$) due à des compromis technologiques, la maîtrise de la gravure en profondeur dans le silicium et de la croissance de dépôts successifs permet aujourd'hui de réaliser des transistors présentant une résistance à l'état passant cinq fois plus faible que celle que prévoyait la loi (figure).

L'apparition de nouveaux semiconducteurs à large bande interdite comme le SiC (carbone de silicium) permet d'obtenir des composants avec des résistances à l'état passant et des vitesses de commutation très notablement améliorées par rapport à celles de leur correspondant silicium. Les composants SiC, contrairement aux composants silicium, peuvent travailler à des températures très élevées (jusqu'à 600 °C), ce qui simplifie notablement la problématique du refroidissement. Les premières

annonces de composants commerciaux SiC commencent à apparaître et vont s'accélérer. Une équipe d'une quinzaine de personnes développe cette nouvelle filière au CEA/Leti.

Jusqu'alors réservée aux circuits de traitement de l'information, l'intégration de plusieurs composants de puissance (transistors et composants passifs) et de leur commande associée sur une même puce commence à pointer pour les petites puissances. Elle répond essentiellement à un besoin de réduction des coûts d'une même fonction. Le CEA/Leti, en collaboration avec ST Microelectronics, a développé plusieurs approches pour cette intégration.

Jusqu'à présent, la règle générale communément admise était que la tension maximale d'un composant ne devait jamais être atteinte tout au long de la vie du produit, sous peine de destruction. Certains composants acceptent maintenant d'atteindre cette tension, à laquelle

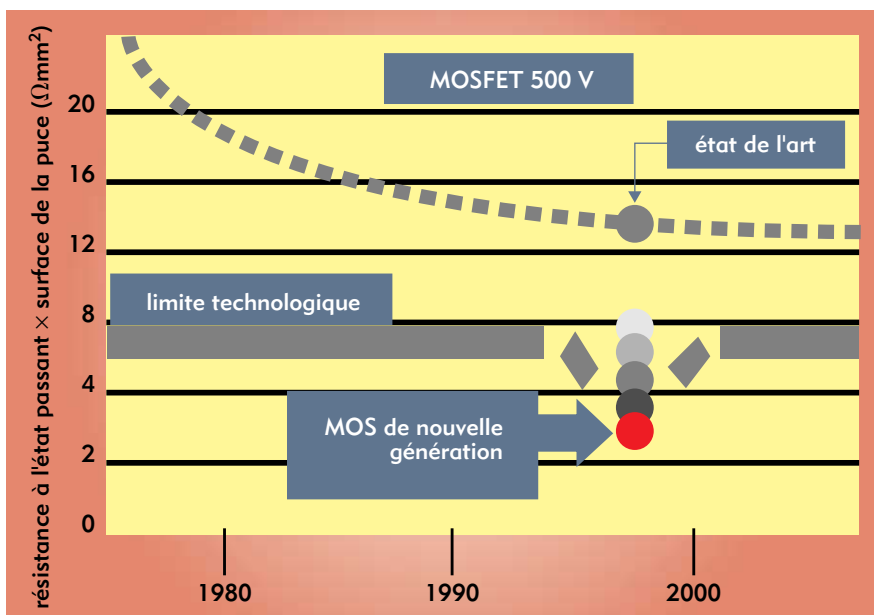
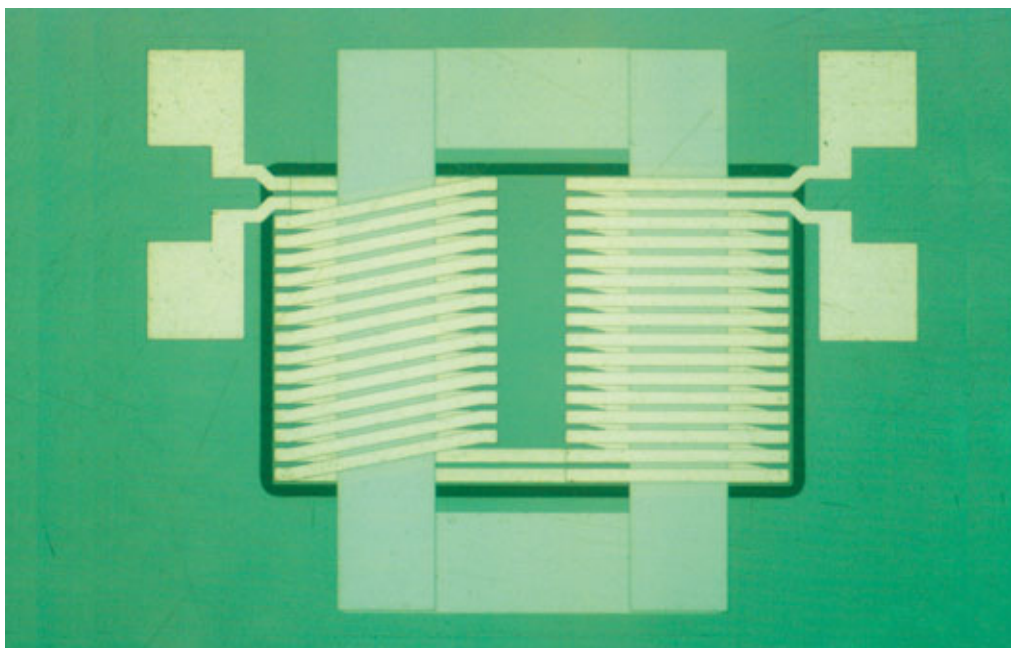


Figure. Illustration de la percée technologique réalisée dans les transistors MOS et la chute spectaculaire du produit de la résistance à l'état passant par la surface.

Micro-transformateur intégré sur silicium réalisé au CEA/Leti.



CEA/LETI

ils écrêtent en laissant passer le courant (fonctionnement "en avalanche"). Ils permettent une optimisation du dimensionnement du produit avec des gains en performance, en coût et en fiabilité. Les travaux du CEA sur la caractérisation et le fonctionnement de tels composants constituent une référence pour les spécialistes. De plus faibles valeurs de résistance à l'état passant se traduisent par une énergie perdue par effet Joule (et donc à évacuer sous forme thermique) bien inférieure. Outre les économies d'énergie, cela permet des technologies de réalisation moins chères.

Le défi des énergies nouvelles

La transformation de l'énergie électrique issue des énergies nouvelles (en particulier dans les piles à combustible) et les énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien, petite hydraulique) entraîne de nouveaux besoins qui sont autant de défis à relever. En effet, dans ce type d'énergie, l'énergie électrique est fournie ou stockée dans des éléments de très basse tension unitaire : 0,8 volt pour les éléments de **pile à combustible** et les **cellules photovoltaïques**, 1,2 à 3 volts pour les **batteries** et 2,5 volts pour les super-condensateurs. De leur côté, le générateur et les systèmes de stockage sont de forte puissance : quelques kilowatts pour les scooters, par exemple, et les générateurs fixes individuels, cinquante à quelques centaines de kilowatts pour les véhicules automobiles et les générateurs fixes collectifs. Les nouvelles technologies ne pourront donc se développer que si les coûts sont compétitifs par rapport aux solutions concurrentes.

Les deux grandes technologies existantes ne peuvent pas répondre directement au besoin. Les alimentations à découpage ont des coûts faibles du fait de leur mode de réalisation et des fabrications en très grand

volume, sont compactes et fournissent des basses tensions. Mais leurs puissances sont limitées à quelques centaines de watts.

Les commandes de moteurs et autres applications de forte puissance, qui fonctionnent sur des tensions réseau de plusieurs centaines de volts, ne sont pas extrapolables directement à des tensions plus basses. Leurs technologies de réalisation sont aujourd'hui beaucoup trop coûteuses. Le défi à relever est donc la création d'une électronique de puissance de basse tension, de forte puissance avec des modes de réalisation permettant des coûts faibles dans des fabrications en grande série. Pour les applications mobiles et automobiles, il faut, de plus, gagner un facteur cinq sur la compacité. Il sera possible, pour ce faire, de s'appuyer sur les progrès des composants récents de l'électronique de puissance qui permettent notamment de faire chuter de manière notable l'énergie perdue et dissipée dans les équipements. La dérégulation de l'énergie et le couplage de nombreuses sources délocalisées entraîneront la nécessité d'étages de conversion de transformation de l'énergie électrique à base d'électronique de puissance. Là encore il faudra répondre à des défis technologiques mal relevés à ce jour : composants avec des tenues en tension très élevées, commandes optiques, minimisation des coûts et des pertes associées, minimisation des éléments de stockage de l'énergie sous forme électrostatique ou magnétique.

Daniel Chatroux

Direction de l'énergie nucléaire
CEA/Valrhô-Pierrelatte

et **Jean-Pierre Joly**

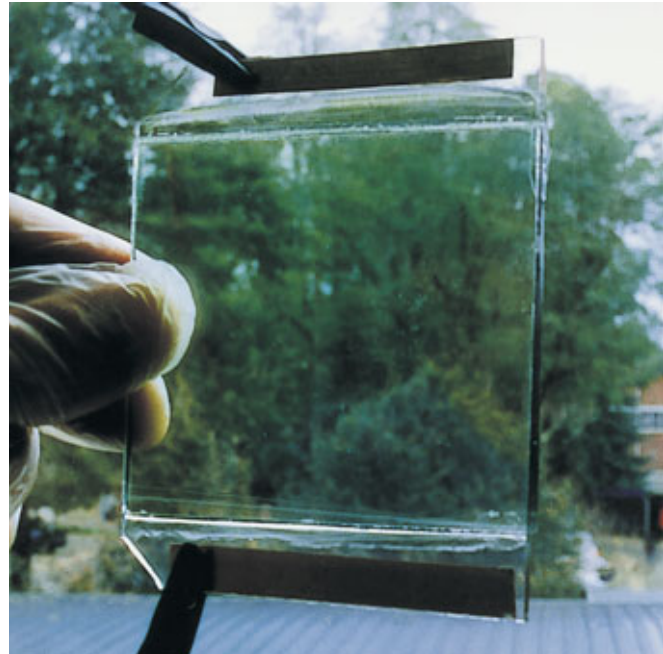
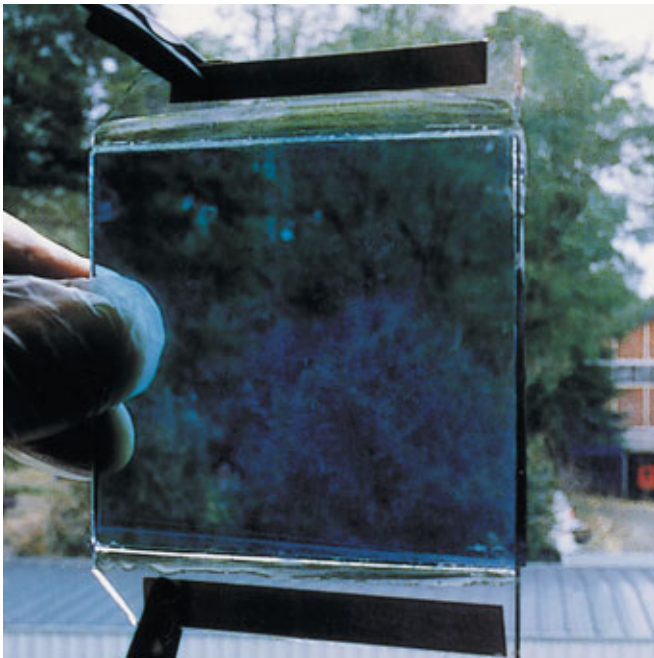
Laboratoire d'électronique et
de technologie de l'information
Direction de la recherche technologique
CEA/Grenoble

Banc de caractérisation de composants en avalanche jusqu'à 1 000 ampères.



CEA

Maîtrise de l'énergie dans le bâtiment : les vitrages électrochromes

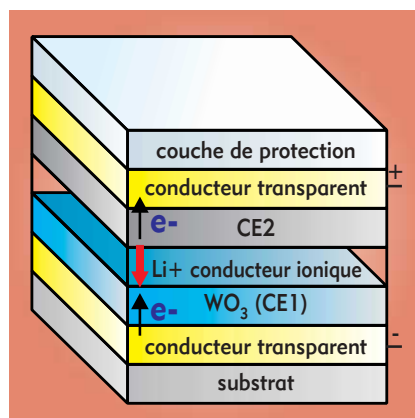


CEA

Exemple d'une technologie combinant maîtrise de l'énergie et souci du bien-être, les vitrages électrochromes illustrent l'apport de développements scientifiques, conduits entre autres au CEA, à l'utilisation rationnelle de l'énergie dans le secteur du bâtiment.

L'utilisation croissante de baies vitrées et la nécessité de maîtriser les dépenses énergétiques dans le bâtiment ont accéléré le développement de fenêtres "intelligentes", qui s'adaptent aux circonstances. Les vitrages électrochromes qui les caractérisent trouvent aussi des applications dans les secteurs spatial et militaire et l'industrie automobile, par exemple dans des rétroviseurs anti-éblouissement. Il s'agit de systèmes dont les propriétés optiques peuvent être modulées par l'application d'une tension de quelques volts en fonction des conditions climatiques. Ainsi, en été, ces vitrages absorbent la lumière et la chaleur (état coloré) tout en maintenant une certaine luminosité dans la pièce tandis qu'ils les transmettent en hiver (état transparent). Le contrôle judicieux de l'énergie solaire (dans le visible et le proche infrarouge) transmise à travers un double vitrage permet de réduire jusqu'à 50 % les dépenses énergétiques liées au chauffage et à la climatisation. Ces dispositifs ont atteint un stade de développement avancé puisque fin 1999, des prototypes ont été installés par Pilkington sur la façade de la Stadtparkasse de Dresde (Allemagne). En collaboration avec l'Ademe, le CEA conduit pour sa part des

recherches sur des vitrages électrochromes **monolithiques** sur substrat souple. Ils sont constitués d'un empilement multicouche analogue à celui des micro-batteries et sont fabriqués par des techniques de dépôt sous vide telles que la **pulvérisation cathodique**. Les couches électrochromes à coloration cathodique⁽¹⁾, telles que le trioxyde de tungstène WO_3 et à coloration anodique⁽²⁾, la couche électrochrome n° 2 (CE2), telles que l'oxyde d'iridium IrO_2 ou $LiNiO_2$, se colorent et se décolorent simultanément, comme l'illustre la coupe du vitrage (figure).

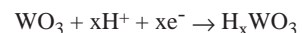


- (1) Coloration cathodique : coloration lors d'une réduction du matériau par application d'un potentiel négatif.
(2) Coloration anodique : coloration lors d'une oxydation du matériau par application d'un potentiel positif.

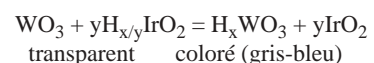
Démonstrateur de vitrage électrochrome polymère conducteur polyaniline/oxyde de tungstène (PANI/ WO_3) développé au CEA, vu en modes coloré et transparent.



Elles sont déposées sur un conducteur électronique transparent qui sert de collecteur de courant et sont séparées par un conducteur ionique de protons (H^+) ou d'ions lithium (Li^+) qui est isolant électrique. Lors de l'application d'une tension négative sur le trioxyde de tungstène, l'injection simultanée d'électrons et d'ions H^+ provoque une réduction du tungstène qui se traduit par l'apparition d'un centre coloré avec une coloration bleue intense. La réaction électrochimique correspondante est :



Simultanément, l'oxydation (potentiel positif) de la seconde couche électrochrome donne lieu à une coloration. Ainsi, pour un couple WO_3/IrO_2 , la réaction totale s'écrit :



Sur ce principe peuvent être imaginés des vitrages alliant la nécessité des économies d'énergie et le confort d'une ambiance modifiable à volonté.

Patrice Topart
Direction des applications militaires
CEA/Le Ripault