

# Électrodes transparentes souples

## Chimie et nanos pour le futur

Céline Mayousse, Caroline Celle, Alexandre Carella et Jean-Pierre Simonato

<b>Résumé</b>	La fabrication d'électrodes transparentes connaît une évolution majeure en raison des limitations des techniques actuelles au regard des besoins futurs. Les électrodes transparentes sont des matériaux qui possèdent une combinaison remarquable en termes de conductivité électrique et de transparence optique (essentiellement dans le domaine du visible). Ces matériaux sont très utilisés pour des applications variées telles que les cellules photovoltaïques, les écrans tactiles, les écrans à cristaux liquides ou OLED... C'est un marché en plein essor, qui ne peut plus se contenter des techniques actuelles car de nouvelles contraintes se font jour pour les dispositifs de demain : flexibilité, très bas coût, contrainte de diffusion de la lumière... Pour répondre à ces besoins, de nouvelles techniques sont à l'étude ; les plus prometteuses font appel à la chimie et aux nanomatériaux.
<b>Mots-clés</b>	<b>Électrodes, transparence, nanomatériaux, souple, flexible, polymères, nanotechnologies, électronique.</b>
<b>Abstract</b>	<b>Flexible transparent electrodes: chemistry and nanomaterials for the future</b> The fabrication of transparent electrodes needs some significant improvement due to major limitations of current techniques with regard to future needs. The transparent electrodes are materials that possess a remarkable combination in terms of electrical conductivity and optical transparency (mainly in the visible range). These materials are expected to be widely used for various applications such as solar cells, touch screens, LCD or OLED displays... This market cannot be satisfied with the current technologies as new constraints are emerging for future devices: flexibility, low cost, light diffusion... To meet these needs, new techniques are being studied. The most promising are based on chemistry and nanomaterials.
<b>Keywords</b>	<b>Electrodes, transparency, nanomaterials, flexibility, polymers, nanotechnologies, electronics.</b>

### Enjeux des électrodes transparentes

Les matériaux conducteurs transparents sont une partie essentielle de très nombreux dispositifs optoélectroniques, c'est-à-dire faisant intervenir au sens large les domaines de l'optique et de l'électronique. Ce sont des matériaux qui possèdent une conductivité électronique élevée, combinée à une transparence optique maximum, très généralement dans la région des longueurs d'ondes perceptibles par l'œil humain.

Ces matériaux sont très largement utilisés dans l'industrie, pour des applications variées. Ils sont par exemple nécessaires dans la fabrication des écrans tactiles (téléphones, tablettes PC, GPS, consoles de jeux, billetteries automatiques...), des cellules photovoltaïques, des écrans LCD (à cristaux liquides) ou OLED (« organic light emitting diode »), etc.

Traditionnellement, ces matériaux sont obtenus sous forme de couches minces préparées à partir d'oxydes métalliques, les TCO (« transparent conductive oxides »). Ceux-ci sont connus depuis plus d'un siècle ; la première référence faisant état de couche fine conductrice transparente à base d'oxyde de cadmium remonte à 1907, quand Badeker observa qu'un film évaporé de cadmium oxydé à l'air conservait ses propriétés conductrices [1]. Le premier brevet sur l'utilisation d'oxyde d'étain date de 1931 [2] et la première application connue a été le dégivrage des fenêtres de cockpit de bombardiers durant la Seconde Guerre mondiale [3].

Depuis, les évolutions ont été immenses, tant sur les matériaux utilisés que sur les applications industrielles. Les recherches sont toujours très actives dans ce domaine, par exemple sur l'utilisation d'oxydes de zinc dopés – AZO (oxyde de zinc dopé aluminium)/GZO (oxyde de zinc dopé gallium) – ou sur des systèmes permettant la réalisation de TCO par des techniques de dépôt en solution [4]. Les principaux TCO utilisés depuis bien longtemps sont ceux à base d'étain, notamment dopés au fluor, et bien sûr le fameux ITO (oxyde d'indium-étain) qui reste « la » référence. Ces composés continuent de dominer le marché des électrodes transparentes, mais de nouvelles contraintes économiques et techniques viennent perturber leur domination.

D'une part le prix de l'indium est soumis à des variations très significatives depuis environ dix ans, notamment en raison de sa disponibilité limitée, et il est donc difficile de prédire quelle sera l'évolution de son prix sur les marchés dans les années à venir, ce qui est un handicap notable dans le choix d'une technologie qui reste relativement coûteuse. Par exemple, l'écran constitue la pièce la plus onéreuse dans la fabrication d'un iPhone 4 (28,5 \$, soit 15,2 % du prix de revient total) [5].

Une nouvelle contrainte pour les électrodes transparentes provient de l'évolution des technologies qui connaissent pour certaines applications une « mutation » vers les substrats souples. Grâce aux progrès de l'électronique organique, des techniques d'impression et simplement pour répondre à la demande des consommateurs, une tendance nette se



Figure 1 - Exemples de dispositifs souples.

Sources (de gauche à droite) : [www.konarka.com/media/pdf/konarka\\_20series\\_bagpanel.pdf](http://www.konarka.com/media/pdf/konarka_20series_bagpanel.pdf) ; [www.ecranflexible.com/commercialisation-premier-ecran-flexible-2012-112.php](http://www.ecranflexible.com/commercialisation-premier-ecran-flexible-2012-112.php) ; [www.sony.net/SonyInfo/News/Press/201005/10-070E](http://www.sony.net/SonyInfo/News/Press/201005/10-070E).

dessine pour la réalisation de dispositifs flexibles. Nombre d'entre eux ont déjà été présentés, par exemple pour des écrans enroulables, des sacs contenant des cellules photovoltaïques pour recharger les téléphones portables, des téléphones à écrans souples... (figure 1).

Pour toutes ces applications, les TCO présentent l'inconvénient majeur d'être fragiles à la contrainte mécanique. Ils supportent très mal les flexions, pliures et déformations en tous genres qui induisent des détériorations irréversibles. De plus, les dépôts de TCO nécessitent des recuits thermiques et parfois des conditions de vide lors du dépôt qui sont incompatibles avec des procédés bas coût, sur plastique et à très grand débit. Une étude récente prévoit une croissance extrêmement rapide de ce marché des électrodes flexibles avec un chiffre d'affaires estimé à plus de 3 milliards de dollars en 2020 [6].

Pour répondre à cette demande, de nouvelles technologies sont en cours d'étude. Certaines devraient très probablement passer au stade industriel dans un futur proche. Parmi les techniques envisagées, on peut retenir essentiellement quatre grandes familles : les grilles métalliques, les matériaux carbonés, les polymères conducteurs et les nanofils métalliques (voir tableau I).

## Les grilles métalliques imprimées

Une alternative crédible aux TCO pour la fabrication d'électrodes transparentes consiste en la réalisation de grilles imprimées possédant des motifs conducteurs les plus fins possibles. Il convient ainsi de pouvoir réaliser un quadrillage avec des lignes conductrices très fines afin d'optimiser au mieux la transmittance du matériau (figure 2). Par exemple, des électrodes d'or de 40 nm d'épaisseur et de 120 nm de large espacées de 580 nm ont une transmittance moyenne de 81 %, alors qu'un film d'or de la même épaisseur non mis en forme conduit à une transmittance de moins de 7 % [7].

Bien que séduisante, cette technique est confrontée à des limitations technologiques significatives. Le procédé est une approche « top-down » qui requiert des moyens de

Tableau I - Types d'électrodes transparentes souples en cours de développement.

Photos de microscopie électronique à balayage (LITEN/CEA), DR.

<p><b>Grilles métalliques</b> (métaux)</p>		<p>Contrairement aux méthodes présentées ci-dessous, cette méthode est dite « top-down », c'est-à-dire qu'elle consiste à partir d'un matériau de taille macroscopique à réduire au maximum la taille des fils de la grille en augmentant la résolution de diverses</p>
<p><b>Matériaux carbonés</b> (nanotubes de carbone, graphène)</p>		<p>Ces nanomatériaux sont composés uniquement d'atomes de carbone. Le graphène est un matériau plan ; les nanotubes de carbone peuvent être vus comme un feuillet de graphène enroulé sur lui-même (photo : réseau de nanotubes de carbone).</p>
<p><b>Polymères conducteurs</b> (à base de polythiophènes et polyaniline essentiellement)</p>		<p>La famille de polymères conducteurs la plus connue est sans doute celle des PEDOT:PSS, qui désigne un mélange de deux polymères, le poly(3,4-éthylènedioxythiophène) et le poly(styrène-sulfonate) de sodium. Avec l'adjonction de solvants ou d'additifs, la conductivité du PEDOT:PSS peut augmenter très significativement.</p>
<p><b>Nanofils métalliques</b> (à base d'argent essentiellement)</p>		<p>Les nanofils les plus utilisés à ce jour sont ceux à base d'argent, qui est intrinsèquement un excellent conducteur électrique. Ces fils sont synthétisés directement en solution à partir de sels métalliques.</p>

fabrication à très haute résolution. Les performances obtenues sont globalement moyennes en termes de couple transmittance optique/résistivité électrique. Plusieurs techniques de fabrication sont envisageables, dont celle développée récemment en roll-to-roll (au rouleau) par la start-up allemande PolyIC (figure 3) [8]. Les performances mesurées dans notre laboratoire (45 ohm.sq<sup>-1</sup> à 90 % de transmittance) démontrent que la technique est relativement performante, mais il est à noter que si cette technique est sans doute pertinente pour des applications telles que les écrans tactiles, son maillage relativement large la rend moins adaptée pour des dispositifs nécessitant une surface conductrice pleine couche et homogène en vue d'une collecte optimale

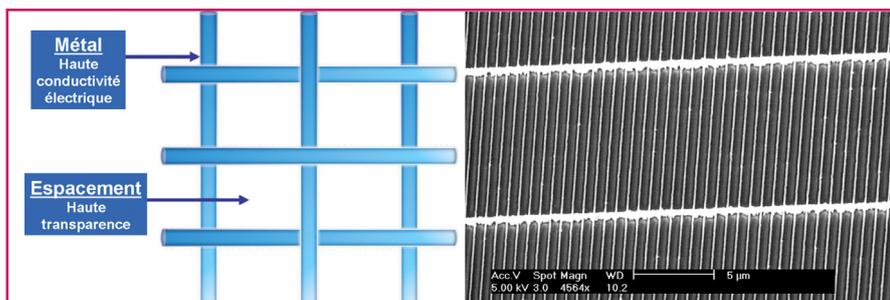


Figure 2 - Principe de la grille métallique et image au microscope électronique à balayage d'une réalisation par nano-impression [7].



Figure 3 - Fabrication roll-to-roll. © PolyIC press picture.

des charges à l'interface entre le matériau actif et l'électrode (application photovoltaïque par exemple).

## Les polymères conducteurs

Les polymères, largement utilisés pour la fabrication de plastiques aux propriétés isolantes, peuvent dans certains cas posséder des propriétés de conduction électrique remarquables se situant entre celles des semiconducteurs et des métaux. Les recherches dans ce domaine ont notamment été récompensées en 2000 par l'attribution du prix Nobel de chimie à Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid et Hideki Shirakawa pour la découverte et le développement de polymères conducteurs (de type polyacétylène). De nombreux polymères présentant des propriétés de conduction électrique intéressantes ont été étudiés, mais des limitations en termes de stabilité et de processabilité ont restreint le champ des possibles à quelques rares familles de polymères conducteurs. Les meilleures performances sont obtenues par des dérivés

du thiophène de type PEDOT:PSS (voir *tableau 1* pour la structure), nécessairement dopés par des espèces de différentes natures (acides sulfoniques essentiellement, mais aussi d'autres composés organiques et inorganiques) afin de présenter des propriétés de conduction satisfaisantes.

Un inconvénient majeur de ce type de matériau provient de leur stabilité intrinsèque généralement limitée sous différents types de stress (thermique, chimique, UV...), et parfois de l'obtention d'une légère teinte bleue. Néanmoins ces composés présentent un intérêt certain ; ils sont disponibles dans le commerce [9] et continuent à être très étudiés.

## Les nanomatériaux carbonés

En premier abord, il peut sembler surprenant d'utiliser des composés carbonés comme les nanotubes de carbone ou le graphène pour fabriquer des matériaux transparents car leur forte absorption dans le spectre visible leur confère une couleur noire... Néanmoins, ces espèces présentent des propriétés de conduction électronique qui en font des pré-curseurs parfaitement plausibles pour la réalisation d'électrodes transparentes. En effet, la très petite quantité de matériaux nécessaire à la réalisation d'électrodes permet de limiter très fortement le phénomène d'absorption et donc d'obtenir des couches très fines, conductrices et très perméables à la lumière [10].

### Le graphène

Le graphène consiste en un simple feuillet en deux dimensions, composé d'atomes de carbone arrangés selon un motif hexagonal. Il paraît *a priori* bien adapté car sa conductivité intrinsèque (sans présence de défauts) est remarquablement élevée – la mobilité des porteurs de charge peut excéder  $15\,000\text{ cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  [11]. Son utilisation est sensiblement plus récente que celle des nanotubes décrits ci-après, mais la difficulté d'obtention de monofeuillets de graphène de bonne qualité et en quantité suffisante reste à ce jour un défi à relever. Un film transparent à base de graphène est d'autant plus conducteur que le graphène est sans défaut et que le nombre de feuillets de graphène est important. L'absorption du graphène dans le visible est d'environ 2,3 % par feuillet [12], ce qui limite très fortement le nombre de couches potentiellement superposables pour avoir des électrodes très transparentes.

Des résultats intéressants ont été rapportés pour du graphène obtenu par CVD (« chemical vapor deposition ») ; néanmoins, les performances sont du même ordre que celles obtenues à base de nanotubes de carbone et restent encore insuffisantes pour des applications requérant des films à très basse résistance électrique [13].

### Les nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone sont des tubes – donc creux en leur milieu – dont les parois sont constituées d'une couche monoatomique d'atomes de carbone. Ils sont très largement étudiés pour leurs propriétés mécaniques, électriques, thermiques, optiques... Ces nano-objets sont très conducteurs et certains d'entre eux peuvent être obtenus

avec un diamètre très petit, de l'ordre du nanomètre, c'est-à-dire environ 100 000 fois plus fin qu'un cheveu (ce sont les nanotubes dits « monoparoï »).

L'utilisation de nanotubes de carbone pour la fabrication d'électrodes transparentes a été largement étudiée ces dernières années et celles-ci ont été intégrées avec succès dans des dispositifs fonctionnels [14]. Des feuilles conductrices à base de nanotubes de carbone sont même commercialisées depuis peu [15]. La nature des nanotubes de carbone utilisés est également en soi un facteur de performance essentiel. Les nanotubes multiparoï possèdent des diamètres relativement grands (5-100 nm) et sont difficilement compatibles avec le couple transmittance optique-conductance électrique visée. De préférence, ce sont donc les nanotubes de carbone monoparoï qui sont utilisés. Ceux-ci sont fabriqués classiquement sous la forme d'un mélange de nanotubes semi-conducteurs et métalliques difficilement séparables. Néanmoins, certaines techniques permettent maintenant d'obtenir de petites quantités de tubes triés et donc de pouvoir utiliser des nanotubes monoparoï métalliques uniquement [16].

Outre la nature intrinsèque des nanotubes, il est également possible de réaliser certains dopages améliorant de façon significative la conduction du système. Typiquement, une résistance carrée<sup>(1)</sup> d'environ quelques centaines d'ohm.sq<sup>-1</sup> est obtenue pour une transmittance d'environ 90 %. Ces résultats sont assez similaires à ceux obtenus avec le graphène aujourd'hui, ce qui en fait une possibilité intéressante pouvant satisfaire un certain nombre d'applications pour lesquelles une très basse résistance électrique n'est pas cruciale.

## Les nanofils métalliques

Les études sur les nanofils métalliques sont plus récentes et encore relativement peu nombreuses. Il est possible de les synthétiser en solution directement à partir de sels métalliques. La synthèse de ces nano-objets quasi unidimensionnels la plus développée est à base de sels d'argent. La très bonne conductivité électrique de l'argent ( $63 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$ ), couplée à des facteurs de forme (rapport longueur/diamètre) de plus de 100 permet d'obtenir des réseaux de nanofils peu denses qui présentent une bonne transparence ainsi qu'une bonne conductivité électrique. Celle-ci est obtenue par la réalisation d'un système percolant (voir encadré).

La quantité extrêmement faible de métal nécessaire pour obtenir ce réseau rend cette alternative économiquement pertinente ; l'utilisation d'un métal noble n'est donc pas en soi un verrou économique pour cette technologie. Les performances obtenues sont généralement très bonnes, du même ordre que celles des TCO, à savoir quelques dizaines d'ohm.sq<sup>-1</sup> à 90 % de transmittance dans le visible. À cela s'ajoute le caractère souple de l'électrode lorsque les nanofils sont déposés sur un plastique ou insérés dans une matrice polymère ; dans ce cas, les performances sont maintenues même avec des petits rayons de courbures (figure 4) et après plusieurs centaines de flexions du substrat.

Néanmoins, il faut relever que l'intégration de ces nanofils dans des dispositifs fonctionnels nécessite de bien maîtriser la rugosité de

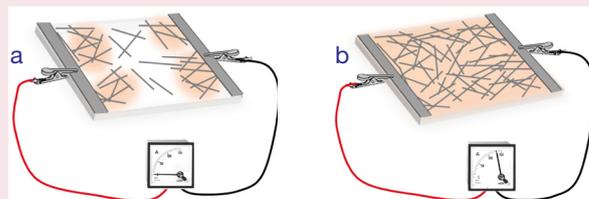
### Qu'est-ce que la percolation ?

Ce phénomène a été étudié pour la première fois en 1957 par le mathématicien anglais J.M. Hammersley. Le terme de percolation vient du latin *percolare* : couler à travers. La percolation consiste à faire passer lentement un solvant à travers un lit immobile afin d'en extraire un ou plusieurs constituants solubles. Ce concept s'est étendu à de nombreux domaines.

En effet, la percolation exprime la capacité à transmettre une information d'un site à un autre par le biais de liens. C'est un phénomène critique : si la proportion de liaisons actives est supérieure à un certain seuil, l'information « percole », c'est-à-dire qu'elle est transmise à grande distance. À l'inverse, en dessous de la valeur seuil, l'information reste confinée en son site de création. La notion de percolation est par exemple utilisée pour parler de la propagation d'un feu de forêt ou d'une épidémie.

Dans notre cas, les nanofils métalliques sont les liens qui permettent au courant de circuler d'un point à un autre de l'électrode. Si le réseau de nanofils n'est pas assez dense, aucun chemin de conduction n'est possible et l'électrode n'est pas conductrice, comme le montre la figure a. À l'inverse, à partir d'une certaine densité de fils, le réseau devient percolant (figure b) et les porteurs de charge peuvent être transportés sur toute la surface de l'électrode.

La conductivité des électrodes étant améliorée avec la densité de nanofils présents (au détriment de la transparence), la conception de celles-ci repose donc sur un compromis transparence/conductivité.



Réseaux de nanofils : a) non percolant, b) percolant.

la couche déposée, sous réserve de percer certaines couches et de créer des courts-circuits ou des résistances parasites. Afin de limiter cet effet indésirable, plusieurs techniques ont été proposées. L'inclusion de nanofils dans une matrice polymère, ou à sa surface, permet de limiter significativement ce problème. Ainsi, il a récemment été rapporté la réalisation de diodes organiques luminescentes souples ou la fabrication de cellules photovoltaïques ayant des performances identiques à celles réalisées avec de l'ITO [17-18].

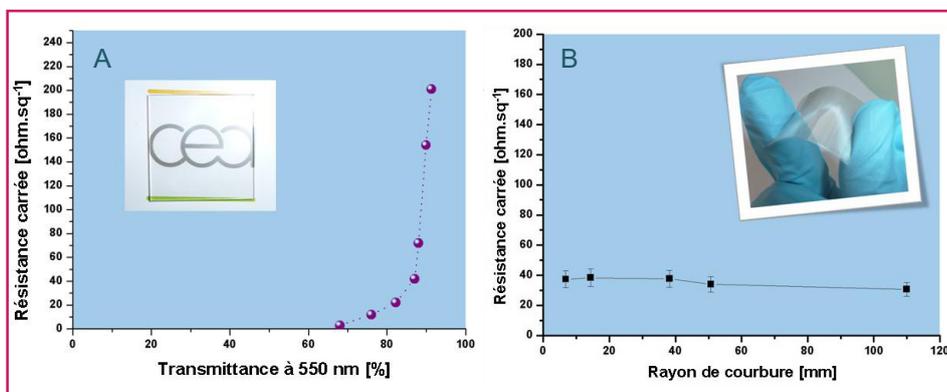


Figure 4 - Évolution de la résistance carrée en fonction A) de la transmittance (insert : électrode transparente déposée sur motif imprimé) et B) de l'angle de courbure pour une électrode sur PEN (polyéthylène-naphtalate) (insert : électrode transparente souple).

Tableau II - Comparatif entre plusieurs techniques d'électrodes souples transparentes.

ITO : oxyde d'indium-étain ; PEDOT:PSS : polymère conducteur dérivé du thiophène ; NCT : nanotubes de carbone.

	ITO	PEDOT:PSS	NCT	Graphène	Nanofils d'argent
<b>Conductivité électrique @ <math>T_{550nm}</math> 90 %</b>	+	-	-	-	+
<b>Stabilité chimique</b>	++	-	+	+	?
<b>Flexibilité</b>	-	++	++	++	++
<b>Coût des matériaux</b>	-	++	+	-	++

Nous travaillons actuellement avec les différents matériaux mentionnés ici, et à ce jour, les résultats obtenus avec les nanofils métalliques nous semblent particulièrement prometteurs. Mais il est nécessaire d'avoir plus de recul pour comparer de façon objective les avantages et inconvénients des technologies concurrentes. En résumé, des parties précédemment présentées, nous proposons dans le *tableau II* une comparaison qualitative basée sur notre expérience pour la fabrication d'électrodes transparentes souples à partir de ces matériaux.

## Conclusion et perspectives

Les limitations des technologies actuelles pour la réalisation d'électrodes transparentes souples à bas coût ont stimulé la créativité des chercheurs pour le développement de matériaux variés et innovants. Bien entendu, ces nouvelles possibilités techniques étant encore très récentes, il convient d'être prudent et de valider la pertinence de chacune d'entre elles au regard des applications visées, notamment en réalisant des études plus approfondies sur le vieillissement des matériaux, l'amélioration des techniques de dépôt (rapidité, débit, résolution...) ou encore le coût global. Il est également nécessaire de ne pas s'arrêter à l'amélioration des propriétés intrinsèques des électrodes, mais aussi de valider le passage vers des dispositifs fonctionnels. Cette intégration est particulièrement importante car l'empilement de couches peut se révéler délicat pour diverses raisons (incompatibilité chimique, démouillage...). Le choix de la « bonne » électrode transparente dépend avant tout des besoins identifiés pour le dispositif à fabriquer.

Les chimistes et les spécialistes des matériaux travaillent à l'élaboration d'une large palette de techniques ; parions que d'autres apparaîtront prochainement, et que certaines d'entre elles trouveront des applications à grande échelle dans très peu de temps.

## Note et références

- (1) La *résistance carrée* traduit la capacité d'un plan à conduire l'électricité indépendamment de ses dimensions.
- [1] Badeker K., Electrical conductivity and thermo-electromotive force of some metallic compounds, *Ann. Phys.*, **1907**, 22, p. 749.
- [2] Littleton J.T., Brevet US (Corning) 2,118,795 (priorité **1931**).
- [3] Gordon R.G., Criteria for choosing transparent conductors, *MRS Bulletin*, **2000**, 25, p. 52.
- [4] Pasquarelli R.M., Ginley D.S., O'Hayre R., Solution processing of transparent conductors: from flask to film, *Chem. Soc. Rev.*, **2011**, 40, p. 5406.
- [5] *Les Échos, High-Tech & Médias*, 6 juillet **2011**, p. 24.
- [6] Reuter S., Das R., *Transparent conductive films for flexible electronics 2010-2020*, IDTechEx Reports, Cambridge, **2010**.
- [7] Kang M.G., Guo L.J., Nanoimprinted semitransparent metal electrode and its application in OLED, *Adv. Mater.*, **2007**, 19, p. 1391.
- [8] [www.polyic.com/poly-tc.php](http://www.polyic.com/poly-tc.php)
- [9] [www.clevios.com](http://www.clevios.com)
- [10] Roth S., Park H.J., Nanocarbonic transparent conductive films, *Chem. Soc. Rev.*, **2010**, 39, p. 2477.
- [11] Geim A.K., Novoselov K.S., The rise of graphene, *Nature Materials*, **2007**, 6, p. 183.
- [12] Nair R.R., Blake P., Grigorenko A.N., Novoselov K.S., Booth T.J., Stauber T., Peres N.M.R., Geim A.K., Fine structure constant defines visual transparency of graphene, *Science*, **2008**, 320, p. 1308.
- [13] Kim K.S., Zhao Y., Jang H., Lee S.Y., Kim J.M., Kim K.S., Ahn J.-H., Kim P., Choi J.-Y., Hong B.H., Large-scale pattern growth of graphene films for stretchable transparent electrodes, *Nature*, **2009**, 457, p. 706.
- [14] Yang S.B., Kong B.-S., Jung D.-H., Baek Y.-K., Han C.-S., Oh S.-K., Jung H.-T., Recent advances in hybrids of carbon nanotube network films and nanomaterials for their potential applications as transparent conducting films, *Nanoscale*, **2011**, 3, p. 1361.
- [15] [www.unidym.com/products/transparent.html](http://www.unidym.com/products/transparent.html)
- [16] Liu J., Hersam M.C.H., Recent developments in carbon nanotube sorting and selective growth, *MRS Bulletin*, **2010**, 35, p. 315.
- [17] Gaynor W., Burkhard G.F., McGehee M.D., Peumans P., Smooth nanowire/polymer composite transparent electrodes, *Adv. Mater.*, **2011**, 23, p. 2905.
- [18] Yu Z., Zhang Q., Li L., Chen Q., Niu X., Liu J., Pei Q., Highly flexible silver nanowire electrodes for shape-memory polymer light-emitting diodes, *Adv. Mater.*, **2011**, 23, p. 664.



C. Mayousse



C. Celle



A. Carella



J.-P. Simonato

Céline Mayousse est doctorante, Caroline Celle et Alexandre Carella, chercheurs, au Département des Technologies des nanomatériaux du LITEN au CEA-Grenoble\* ; Jean-Pierre Simonato y est responsable du groupe CAN (Chimie Appliquée aux Nanoobjets).

\* Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives, LITEN/DTNM/LCRE, 17 rue des Martyrs, F-38054 Grenoble Cedex 9.  
Courriel : [jean-pierre.simonato@cea.fr](mailto:jean-pierre.simonato@cea.fr)



Je suis membre de  
la Société Chimique de France,  
et vous ?

Rejoignez le réseau des chimistes : votre association !  
[www.societechimiquedefrance.fr](http://www.societechimiquedefrance.fr)



Société Chimique de France