

Du nano au macro

De nouveaux matériaux à la fois transparents, flexibles et très bons conducteurs électriques

Résumé L'apport des nanomatériaux pour la fabrication de matériaux transparents conducteurs a connu un essor considérable ces dernières années. Des effets à l'échelle nanoscopique peuvent engendrer des modifications majeures à l'échelle macroscopique. C'est notamment le cas dans les deux exemples présentés dans cet article qui portent sur le développement de réseaux percolants de nanofils d'argent et de films de polymères à base de PEDOT.

Mots-clés Nanomatériaux, électrodes transparentes, nanofils métalliques, polymères conducteurs, films chauffants transparents.

Abstract From nano to macro: new flexible, transparent and highly conductive materials

The contribution of nanomaterials for the development of advanced transparent conductive materials has grown steadily in recent years. Effects at the nanoscale can cause major changes at the macroscopic scale. Two materials are presented in this article, which rely on percolating networks of silver nanowires and thin films of PEDOT based polymers.

Keywords Nanomaterials, transparent electrodes, metallic nanowires, conductive polymers, transparent heaters.

Les matériaux transparents conducteurs sont utilisés dans des applications très variées. C'est par exemple le cas pour les dispositifs optoélectroniques tels que les téléphones, les capteurs tactiles ou les écrans de télévision. De nombreux systèmes relevant du domaine de l'énergie comme les cellules solaires pour la récupération d'énergie, l'éclairage souple à basse consommation d'énergie ou le vitrage intelligent (« smart windows ») pour le confort et l'économie d'énergie par la gestion des flux thermiques font également usage de ces matériaux.

Leur essor s'est essentiellement basé sur les « oxydes transparents conducteurs » (TCO, « transparent conductive oxides »). À ce jour, c'est essentiellement l'ITO (« indium tin oxide ») qui domine le marché. Ce matériau présente des propriétés optoélectroniques remarquables, avec d'excellents ratios transparence/conduction électrique, de l'ordre de 10 à 30 ohm/□ (ohm par carré, qui est relatif à la résistance surfacique) pour une transmission dans le visible (usuellement mesurée à 550 nm) supérieure à 90 %. Malheureusement, ce matériau présente également des inconvénients majeurs, nécessitant de trouver une alternative. En effet, comme tous les TCO, l'ITO résiste mal à la contrainte mécanique et n'est donc pas adapté pour la fabrication de systèmes flexibles, qui sont en très fort développement actuellement. Pour s'en convaincre, il suffit de se tourner vers le « Consumer Electronic Show » qui voit à chaque édition la présentation croissante d'objets électroniques souples, tels que les écrans de télévision enroulables ou les smartphones flexibles. De plus, l'ITO est composé majoritairement d'indium, ce qui pose problème, cet élément étant classé comme critique (« critical raw material ») par la Commission européenne. En effet, l'indium est peu disponible sur la planète, peu recyclé, et il est essentiellement détenu par la Chine, ce qui est à considérer du point de vue géostratégique.

Depuis environ une dizaine d'années, de nombreuses équipes de recherche de l'industrie et du monde académique ont donc travaillé à trouver de nouveaux matériaux transparents conducteurs [1]. Le développement récent des nanomatériaux a ainsi largement été mis à profit par l'utilisation de

nanomatériaux carbonés ou métalliques en particulier. Si des résultats encourageants ont été obtenus avec certains nanomatériaux carbonés comme les nanotubes de carbone ou le graphène, ces matériaux restent globalement en deçà des attentes du marché, notamment pour des raisons de coût de production, de difficulté d'obtention de grandes surfaces homogènes et d'une résistance électrique trop élevée à de hauts niveaux de transparence. Parmi les nanomatériaux les plus prometteurs, on peut certainement mettre en avant ceux à base de métaux, en particulier les nanofils dont le développement a connu un essor remarquable ces dix dernières années [2-4]. Plus récemment encore, les polymères conducteurs, en particulier ceux à base de PEDOT (poly(3,4-éthylènedioxythiophène)), ont connu un regain d'intérêt au regard des performances désormais accessibles [5].

Cet article a pour but d'expliquer les grandes avancées réalisées ces dernières années selon ces deux approches, qui toutes deux permettent d'obtenir des performances exceptionnelles à l'échelle macroscopique, en s'appuyant sur une organisation optimisée de la matière à l'échelle nanoscopique.

Les réseaux de nanofils métalliques

La synthèse des nanofils d'argent

La synthèse de nanomatériaux en solution est un domaine en fort développement qui permet l'obtention de nanoobjets de plus en plus complexes. En même temps, les protocoles opératoires sont souvent très délicats car certaines variations mineures peuvent avoir une influence majeure sur les produits de la réaction. La reproductibilité des synthèses peut s'avérer problématique. C'est à titre d'exemple bien connu pour les nanobâtonnets d'or dont la croissance est dépendante des traces d'iode présentes dans les réactifs de type chlorure d'ammonium [6]. C'est également le cas pour les nanofils d'argent qui sont les nanofils métalliques les plus développés et utilisés aujourd'hui. S'il est exact que l'argent est le métal le plus conducteur électriquement, la raison principale de l'essor considérable des nanofils d'argent en comparaison d'autres métaux tient sans doute plus au fait

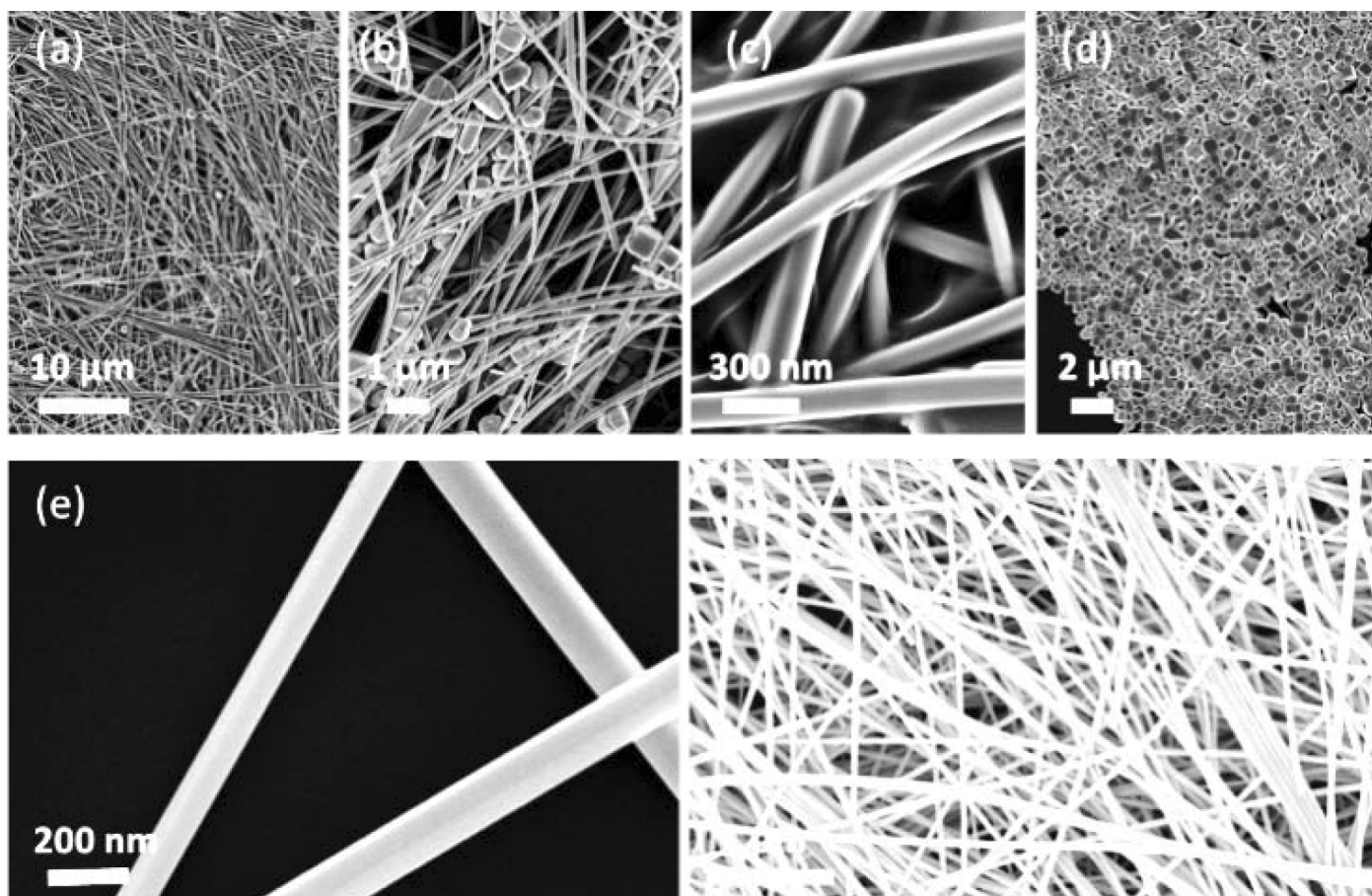


Figure 1 - (a-b-c-d) Images MEB montrant différentes vues de la même synthèse de nanofils ; (e-f) Images MEB de nanofils d'argent purifiés.

que cette synthèse est relativement facile et que ces nanomatériaux présentent une bonne stabilité intrinsèque [7-9].

Le procédé de fabrication de ces nanofils est basé sur la réduction de sels d'argent en milieu polyol [10]. Il est intéressant de noter que sans élément extérieur particulier, le mélange de précurseurs que l'on peut considérer comme isotropes conduit à la formation d'objets unidimensionnels (nanomatériaux 1D). En général, les nanofils obtenus ont une longueur de quelques microns ou dizaines de microns pour un diamètre de seulement quelques dizaines de nanomètres. Avec un ajustement précis des réactifs et des conditions réactionnelles, il est possible de moduler indépendamment la longueur ou le diamètre moyen des nanofils [11].

Deux points très importants sont malheureusement trop rarement abordés dans les travaux publiés sur la synthèse de nanomatériaux et il semble souhaitable de le rappeler ici. Premièrement, le rendement de la réaction en produit isolé et purifié n'est pratiquement jamais indiqué, ce qui est un sérieux problème puisque le coût du procédé repose grandement sur ce point. Secondement, très (trop) généralement, des images au microscope électronique à balayage de nanomatériaux purifiés sont montrées sans discussion critique. Cela peut poser question, car la sélection d'images spécifiques peut limiter l'information sur les produits de synthèse globaux et les sous-produits. Pour illustrer ce point, la *figure 1* montre différentes images réalisées sur un même brut réactionnel et sur un lot de nanofils purifiés.

La purification des nanofils est un point crucial pour plusieurs raisons. Le polymère utilisé pour la synthèse (polyvinylpyrrolidone) restant légèrement en surface des nanofils (épaisseur de quelques nm) peut induire une résistance de contact

accrue aux interconnexions et augmenter la résistance électrique. La présence de petites nanoparticules métalliques (de plus grande dimension inférieure à 50 nm) est également néfaste car ces espèces ne participent pas au système percolant de conduction électrique, mais diminuent la transparence et augmentent la diffusion de la lumière. Enfin, la présence de particules métalliques de taille micronique est également indésirable en raison d'effets optiques similaires et de problèmes de rugosité aux interfaces lorsque les réseaux de nanofils sont utilisés dans la fabrication de structures multicouches.

Cette purification de nanofils d'argent est loin d'être simple. Elle dépend de la composition du milieu à purifier, et en particulier des dimensions des nanofils. Il faut en effet appliquer des conditions différentes pour purifier des nanofils ayant des diamètres moyens de 30 ou de 90 nm. Le procédé que nous avons développé, breveté et licencié est basé sur une double décantation dans des milieux à viscosités différentes, qui permet dans un premier temps d'enlever les nanoparticules du brut réactionnel, puis d'enlever les grosses particules afin d'obtenir *in fine* un produit permettant la fabrication de systèmes transparents conducteurs de haute performance.

Fonctionnement, applications, pertinence industrielle

Pour comprendre l'essence du fonctionnement de ces systèmes, il faut introduire brièvement le concept de percolation. Lorsqu'on dépose sur une surface (transparente dans notre cas) un ensemble de nanofils de façon aléatoire, il faut en déposer suffisamment pour que ceux-ci atteignent le « seuil de percolation », c'est-à-dire que des chemins électriques soient réalisés par connexion de plusieurs nanofils

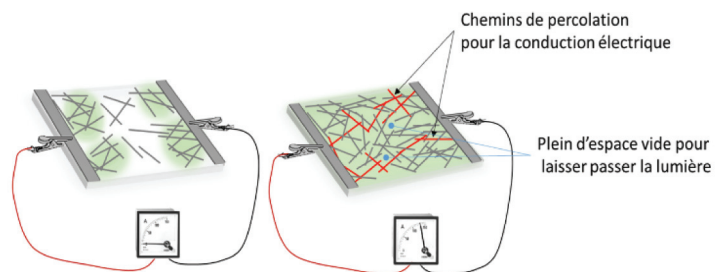


Figure 2 - À gauche : système sous le seuil de percolation donc non conducteur ; à droite : avec plus de nanofils, obtention de chemins de percolation conducteurs (spécifiés en rouge).

pour transporter les électrons d'une électrode latérale à une autre (figure 2) [12]. Il ne faut pas en déposer trop non plus pour rester le plus transparent possible. Des quantités de seulement quelques dizaines de mg de nanofils par m² permettent d'obtenir d'excellentes performances (équivalentes à l'ITO), typiquement moins de 20 ohm/□ pour une transmission dans le domaine visible supérieure à 90 %.

Au-delà du concept de base de la percolation nécessaire au bon fonctionnement de ces systèmes conducteurs transparents, des phénomènes se jouant à très petite échelle ont un impact considérable sur les performances finales dans les dispositifs. Par exemple, il a été mis en évidence l'activation de chemins de percolation selon différents traitements, par exemple chimiques, thermiques ou électriques. Une manière de visualiser ces chemins percolants a été l'utilisation de la technique LiT (« lock-in infrared thermography ») qui permet de détecter la génération de chaleur dans des chemins de percolation, celle-ci étant inhérente à l'effet Joule lors du passage du courant électrique passant dans ces chemins [13-14] (figure 3).

Comme mentionné dans l'introduction, de nombreuses applications de ces matériaux sont liées à l'énergie. Un exemple caractéristique est la fabrication de cellules photovoltaïques. L'utilisation des électrodes à nanofils sur différents types de cellules photovoltaïques a été évaluée avec succès (objet de plusieurs dépôts de brevets). En particulier, il a été montré que les cellules à hétérojonction qui présentent des surfaces très rugueuses peuvent s'accommoder de l'utilisation d'électrodes à base de nanofils car ceux-ci sont extrêmement souples et permettent un dépôt conforme, comme montré sur la figure 4. Un avantage supplémentaire des systèmes à base de nanofils est leur grande transparence jusque dans l'infrarouge, ce qui n'est pas le cas des TCO. Ceci présente notamment un intérêt certain pour la réalisation de cellules tandem qui connaissent actuellement un très fort développement [15]. Ces nanofils ont également été intégrés dans des cellules et des modules photovoltaïques sur substrats flexibles de type

PEN (polynaphtalate d'éthylène). Les rendements de conversion obtenus avec un semi-conducteur organique ont été comparables aux performances obtenues avec le matériau de référence (ITO), tout en permettant une grande flexibilité du dispositif. Après des premiers essais en cellule classique de 0,28 cm², un travail d'intégration a été réalisé afin de pouvoir monter jusqu'à l'échelle du module de 25 cm² comprenant 11 cm² de surface active (figure 5).

D'autres intégrations ont également été réalisées, en marge des applications directes pour l'énergie, telles que des antennes, des photodétecteurs et des systèmes de blindage électromagnétique. Enfin, la fabrication de films chauffants transparents est également un sujet de grand intérêt pour de nombreuses applications [16], par exemple dans l'industrie automobile. Dans ce cadre, la maîtrise de la synthèse des nanofils est essentielle : par la diminution d'un facteur 2 du diamètre des nanofils (de 60 à 30 nm), il est possible de conserver les propriétés électriques et thermiques des réseaux de nanofils en diminuant très significativement le facteur haze (diffusion de la lumière). Ceci permet de rendre le système compatible avec des normes optiques très strictes. Il est donc primordial de comprendre que des problèmes se posant à l'échelle macroscopique peuvent trouver une solution à l'échelle nanoscopique, avant tout par la maîtrise de la synthèse chimique de nanomatériaux en solution et par leur mise en œuvre dans des conditions optimales.

Bien que les quantités de nanofils utilisées soient très faibles, il convient de vérifier l'impact toxicologique potentiel de ceux-ci afin d'assurer la sécurité des fabricants et des utilisateurs. La probabilité de contact est faible et largement maîtrisable lors des procédés de fabrication ainsi que lors des intégrations dans des dispositifs (dans des matrices, avec des encapsulants, etc.). Néanmoins, il est nécessaire de collecter des données toxicologiques afin de prévenir tout risque majeur potentiel et de connaître les effets biologiques de ces nanomatériaux. Diverses études ont été entreprises dans ce sens. L'optimisation de la synthèse pour la réalisation de « standards » à dimensions contrôlées a permis de mesurer l'impact des facteurs de formes sur la nanotoxicité. Une première étude a montré que les nanofils sont peu toxiques pour les macrophages, notamment en comparaison avec d'autres composés connus pour être inflammatoires comme certaines nanoparticules de silice [11]. La seconde a été plus focalisée sur le processus d'internalisation et de compréhension des mécanismes d'action, en particulier les phénomènes de cytotoxicité potentiellement induits par la rigidité des nanofils [17]. Un résultat majeur qui ressort de ces deux études est la faible toxicité intrinsèque des nanofils et l'impact de leur facteur de forme sur les mécanismes en jeu pendant et après

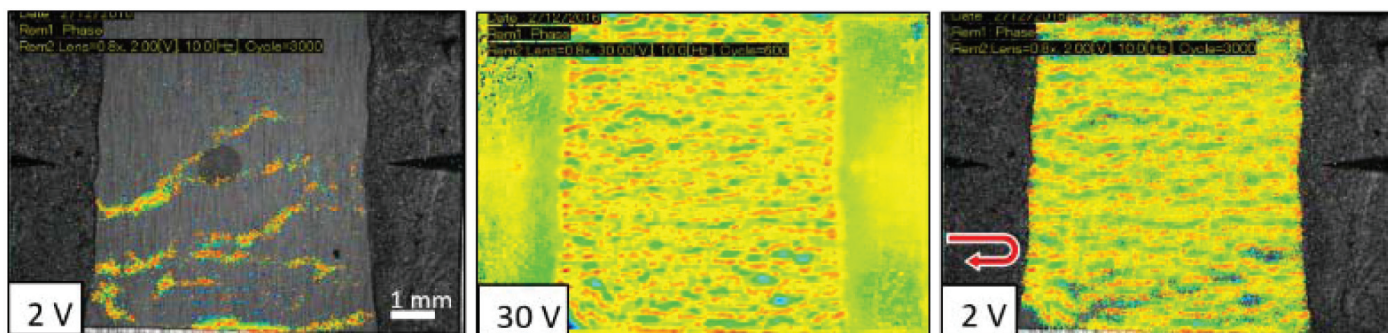


Figure 3 - Images obtenues par imagerie infrarouge. À gauche : visualisation de quelques chemins de percolation par application de 2 V. Au milieu : activation à 30 V avec homogénéisation de la surface. À droite : retour à 2 V ; on constate l'activation de nombreux chemins de percolation (en comparaison de l'image complètement à gauche).

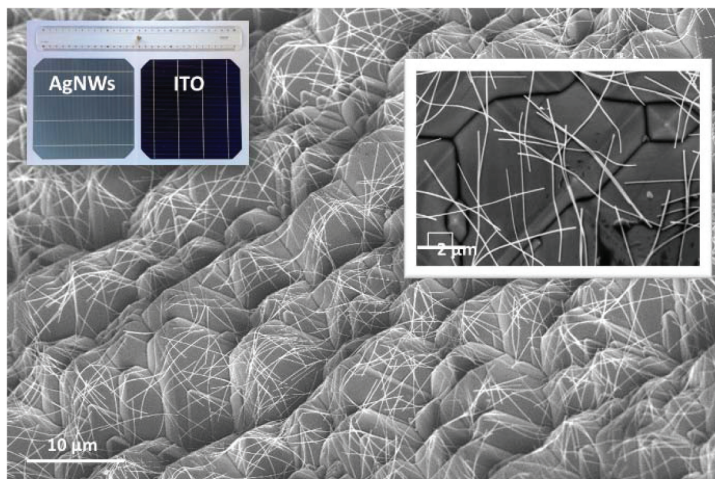


Figure 4 - Dépôt de nanofils sur une surface rugueuse de silicium. L'encart à gauche montre deux cellules à base d'ITO et de nanofils. L'encart à droite montre la souplesse des nanofils permettant un dépôt conforme.

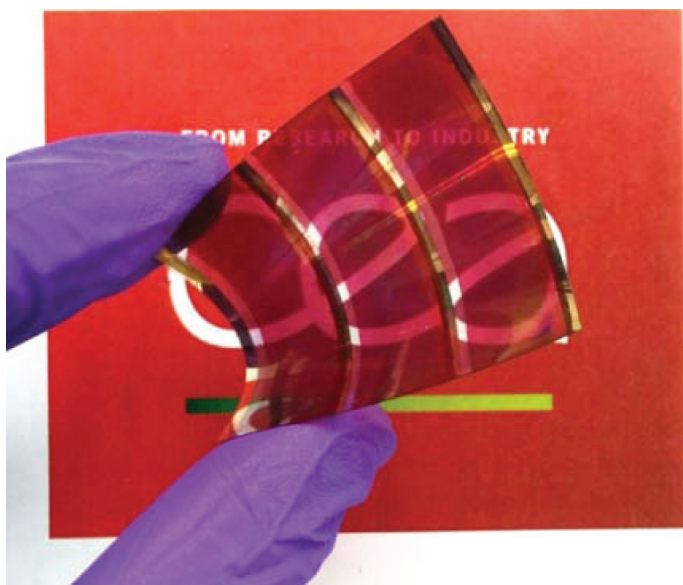


Figure 5 - Module photovoltaïque organique semi-transparent avec des électrodes en nanofils d'argent.

l'endocytose. Par la modulation des dimensions des nanofils, il est possible de contenir la toxicité de ceux-ci à des seuils très bas. Les conclusions de ces travaux viennent compléter d'autres rapports déjà publiés et contribuent ainsi à une meilleure compréhension des possibles effets toxicologiques des nanofils d'argent.

Ceci est une des composantes de la démarche globale développée pour atteindre l'industrialisation de cette nouvelle nanotechnologie. Une conjonction d'études, notamment techniques (chimie, procédés chimiques, intégrations dans des dispositifs, extrapolation de lignes de fabrication), technicoéconomiques (benchmark, marchés, structure de coûts) ou encore de type HSE (hygiène sécurité environnement) et réglementaire, doit être mise en œuvre afin d'estimer la faisabilité concrète de l'innovation et d'en assurer sa pertinence industrielle.

Au vu de nombreuses annonces faites par des fabricants d'écrans tactiles ou de nos collaborations sur le marché français, il apparaît que l'histoire des nanofils d'argent n'en est probablement qu'à ses débuts et que de belles perspectives sont ouvertes. Néanmoins, il est probable qu'un unique

nouveau système d'électrode transparente ne pourra pas convenir à toutes les applications, et que pour chaque système fonctionnel, il conviendra de choisir la solution idoine. C'est pourquoi nous avons également commencé à développer une nouvelle génération d'électrodes transparentes, à base de polymères cette fois.

Les polymères très conducteurs

Les polymères conducteurs sont des matériaux relativement récents qui ont notamment valu l'attribution du prix Nobel de chimie en 2000 à Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid et Hideki Shirakawa « pour la découverte et le développement des polymères conducteurs ». Certains de ces matériaux présentent également la propriété remarquable d'être partiellement transparents dans le domaine visible. Le plus connu, commercialement disponible, est le PEDOT:PSS (poly(3,4-éthylènedioxythiophène : poly(styrène sulfonate) de sodium). Il est largement utilisé pour la réalisation de revêtements antistatiques, mais également pour le développement de cellules solaires, de vitrages intelligents et bien d'autres systèmes. Il présente à la fois une conductivité électrique intéressante et une bonne transmittance dans le visible. Néanmoins, sa conductivité électrique intrinsèque ($0,1 \text{ S cm}^{-1}$) ou celle obtenue après dopage ($\sim 1\,000 \text{ S cm}^{-1}$) restent significativement en deçà des autres matériaux étudiés pour le remplacement des TCO.

Il a été possible, par une démarche de modifications chimiques successives, d'optimiser la structure du matériau organique pour en augmenter sa conductivité, tout en veillant à conserver ses excellentes propriétés de transparence. Le PSS peut ainsi être avantageusement substitué par des contre-anions beaucoup plus petits, ce qui permet d'améliorer à la fois le dopage primaire lié à la densité de porteurs de charges et le dopage secondaire relatif à l'organisation des chaînes de PEDOT (figure 6a). Les premiers essais ont rapidement conduit à des conductivités supérieures à $1\,200 \text{ S cm}^{-1}$ et ont permis en plus de mettre en évidence un caractère métallique de la conduction dans ces nouveaux matériaux [18]. Par ajout d'un co-solvant, il a été possible de ralentir la réaction de polymérisation de l'EDOT, permettant l'obtention d'une structure

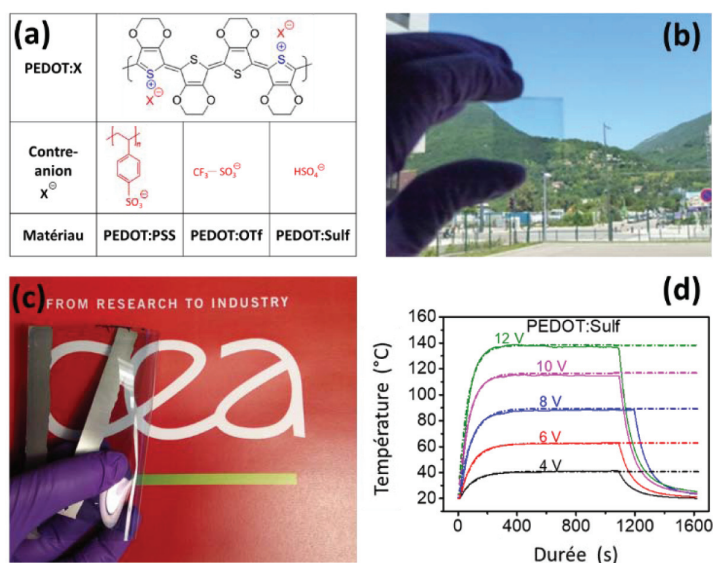


Figure 6 - (a) Formules des polymères synthétisés. Films transparents 100 % polymère déposés sur du verre (b) et sur du PEN (c). (d) Courbes de chauffage sous différentes tensions en fonction du temps. Les courbes en pointillé correspondent à la température calculée.

mieux ordonnée et comprenant de nombreuses nanocristallites. Des conductivités supérieures à $5\,400\text{ S cm}^{-1}$ ont été mesurées, et des expériences à très basse température ont été positivement associées à un modèle de conduction prenant en compte la complexité du milieu de conduction (cristallites, zones amorphes, effet tunnel, etc.) [19].

Outre la très bonne conductivité obtenue, ce matériau présente une excellente transparence et un caractère diffusant de la lumière extrêmement faible ($< 0,2\%$). La première utilisation ciblée a été la réalisation de films chauffants transparents (figure 6d). De très bonnes performances ont été mises en évidence lors de cette intégration grâce aux propriétés intrinsèques de ces nouveaux matériaux : chauffage stabilisé à plus de $100\text{ }^\circ\text{C}$ à basse tension, facilité de fabrication, grande flexibilité, puissance de plusieurs milliers de watts par m^2 , etc. C'est à notre connaissance la première réalisation d'un film chauffant transparent à haute performance composé à 100% de polymère organique [20]. Plutôt que de voir ce type de matériau comme le successeur des nanofils, il est sans doute préférable de le considérer comme une autre alternative prometteuse et complémentaire en vue du remplacement des TCO.

Affaire à suivre : rendez-vous dans dix ans

Depuis la première utilisation des matériaux conducteurs transparents il y a environ quatre-vingts ans, des progrès considérables ont été réalisés. Les TCO restent à ce jour la référence, mais des besoins nouveaux et des avancées scientifiques importantes ont permis de développer des alternatives crédibles. Parmi les plus prometteuses, les réseaux de nanofils métalliques et les polymères conducteurs pourraient jouer un rôle majeur. Dans les deux cas, des effets à l'échelle nanoscopique engendrent de profondes modifications de performances à l'échelle macroscopique. À titre d'exemple, la morphologie des nanofils a un impact majeur sur la diffusion de la lumière et l'optimisation des contacts entre nanofils joue un rôle crucial pour une percolation optimale du système. Pour les polymères, le changement de contre-anions et la génération de nanocristallites permettent d'obtenir des conductivités allant jusqu'à presque $6\,000\text{ S cm}^{-1}$.

Au-delà des propriétés intrinsèques des matériaux, de nouvelles utilisations se font jour. En particulier, les films chauffants transparents flexibles apparaissent d'intérêt pour de très nombreuses applications. Et puisque chaque application nécessite des besoins spécifiques, il est fort probable que plusieurs technologies différentes, mais complémentaires, trouveront un aboutissement industriel. Rendez-vous dans dix ans pour un premier bilan.

L'auteur remercie toutes les personnes qui ont contribué à ces études, en particulier les stagiaires, CDD, postdoctorants, ainsi que les docteurs ou docteurs (C. Mayousse, N. Massonnet, A. Cabos, B. Bessaïre, E. Yvenou, S. Sim, M. Gueye, A. Schultheiss, D. Toybou, T. Sannicolo et M. Touron), tous les collaborateurs internes CEA (C. Celle, A. Carella, B. Laguitton, R. Demadrille, J. Faure-Vincent, A. Revaux, S. Yahiaoui, S. Desousanobre, F. Masse, S. Berson...), les collaborateurs externes (D. Bellet, D. Muñoz-Rojas, T. Rabilloud, D. Vuillaume, B. Gilbert, A. Brioude, A. Djouadi, H. Bouchiat...), ainsi que le CEA, la DGA, l'ANR, le CNRS, l'Université Grenoble Alpes, l'Europe et les différents partenaires (startups, PME, PMI, grands groupes industriels) pour leurs financements qui ont permis ces développements.

- [1] Mayousse C., Celle C., Carella A., Simonato J.-P., Électrodes transparentes souples : chimie et nanos pour le futur, *L'Act. Chim.*, **2012**, 362, p. 29.
- [2] Sannicolo T., Lagrange M., Cabos A., Celle C., Simonato J.-P., Bellet D., Metallic nanowire-based transparent electrodes for next generation flexible devices: a review, *Small*, **2016**, 12, p. 6052.
- [3] Ye S., Rathmell A.R., Chen Z., Stewart I.E., Wiley B.J., Metal nanowire networks: the next generation of transparent conductors, *Adv. Mater.*, **2014**, 26, p. 6670.
- [4] Langley D., Giusti G., Mayousse C., Celle C., Bellet D., Simonato J.-P., Flexible transparent conductive materials based on silver nanowire networks: a review, *Nanotechnology*, **2013**, 24, 452001.
- [5] Gueye M.N., Carella A., Faure-Vincent J., Demadrille R., Simonato J.-P., Progress in understanding structure and transport properties of PEDOT-based materials: a critical review, *Prog. Mater. Sci.*, **2020**, 108, 100616.
- [6] Smith D.K., Miller N.R., Korgel B.A., Iodide in CTAB prevents gold nanorod formation, *Langmuir*, **2009**, 25, p. 9518.
- [7] Deignan G., Goldthorpe I.A., The dependence of silver nanowire stability on network composition and processing parameters, *RSC Adv.*, **2017**, 7, p. 35590.
- [8] Celle C., Cabos A., Fontecave T., Laguitton B., Benayad A., Guettaz L., Pélissier N., Nguyen V.H., Bellet D., Muñoz-Rojas D., Simonato J.-P., Oxidation of copper nanowire based transparent electrodes in ambient conditions and their stabilization by encapsulation: application to transparent film heaters, *Nanotechnology*, **2018**, 29, 085701.
- [9] Mayousse C., Celle C., Fraczkiewicz A., Simonato J.-P., Stability of silver nanowire based electrodes under environmental and electrical stresses, *Nanoscale*, **2015**, 7, p. 2107.
- [10] Sun Y., Gates B., Mayers B., Xia Y., Crystalline silver nanowires by soft solution processing, *Nano Lett.*, **2002**, 2, p. 165.
- [11] Toybou D., Celle C., Aude-García C., Rabilloud T., Simonato J.-P., A toxicology-informed, safer by design approach for the fabrication of transparent electrodes based on silver nanowires, *Environ. Sci.: Nano*, **2019**, 6, p. 684.
- [12] Bellet D., Lagrange M., Sannicolo T., Aghazadehchors S., Nguyen V., Langley D., Muñoz-Rojas D., Jiménez C., Bréchet Y., Nguyen N., Transparent electrodes based on silver nanowire networks: from physical considerations towards device integration, *Materials*, **2017**, 10, p. 570.
- [13] Sannicolo T., Muñoz-Rojas D., Nguyen N.D., Moreau S., Celle C., Simonato J.-P., Bréchet Y., Bellet D., Direct imaging of the onset of electrical conduction in silver nanowire networks by infrared thermography: evidence of geometrical quantized percolation, *Nano Lett.*, **2016**, 16, p. 7046.
- [14] Sannicolo T., Charvin N., Flandin L., Kraus S., Papanastasiou D.T., Celle C., Simonato J.-P., Muñoz-Rojas D., Jiménez C., Bellet D., Electrical mapping of silver nanowire networks: a versatile tool for imaging network homogeneity and degradation dynamics during failure, *ACS Nano*, **2018**, 12, p. 4648.
- [15] Sun Y., Chang M., Meng L., Wan X., Gao H., Zhang Y., Zhao K., Sun Z., Li C., Liu S., Wang H., Liang J., Chen Y., Flexible organic photovoltaics based on water-processed silver nanowire electrodes, *Nat. Electron.*, **2019**, 2, p. 513.
- [16] Celle C., Mayousse C., Moreau E., Basti H., Carella A., Simonato J.-P., Highly flexible transparent film heaters based on random networks of silver nanowires, *Nano Res.*, **2012**, 5, p. 427.
- [17] Lehmann S.G., Toybou D., Pradas del Real A.-E., Arndt D., Tagmount A., Viau M., Safi M., Pacureanu A., Cloetens P., Bohic S., Salomé M., Castillo-Michel H., Omaña-Sanz B., Hofmann A., Vulpe C., Simonato J.-P., Celle C., Charlet L., Gilbert B., Crumpling of silver nanowires by endolysosomes strongly reduces toxicity, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **2019**, 116, p. 14893.
- [18] Massonnet N., Carella A., de Geyer A., Faure-Vincent J., Simonato J.-P., Metallic behaviour of acid doped highly conductive polymers, *Chem. Sci.*, **2015**, 6, p. 412.
- [19] Gueye M.N., Carella A., Massonnet N., Yvenou E., Brenet S., Faure-Vincent J., Pouget S., Rieutord F., Okuno H., Benayad A., Demadrille R., Simonato J.-P., Structure and dopant engineering in PEDOT thin films: practical tools for a dramatic conductivity enhancement, *Chem. Mater.*, **2016**, 28, p. 3462.
- [20] Gueye M.N., Carella A., Demadrille R., Simonato J.-P., All-polymeric flexible transparent heaters, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2017**, 9, p. 27250.

Jean-Pierre SIMONATO,

Directeur de recherche, Département des Nouveaux Matériaux, CEA-LITEN, Université Grenoble Alpes.

Il a reçu le prix Innovation Chimie & Énergie 2019 de l'interdivision Énergie de la Société Chimique de France.

*jean-pierre.simonato@cea.fr

