

# Réalisation de transistors fibreux électrochimiques et de circuits électroniques textiles

Xuyuan Tao, Vladan Koncar et Claude Dufour

## Résumé

Après une présentation du principe de fonctionnement des transistors électrochimiques, cet article expose les développements de transistors fibreux électrochimiques sur fils textiles (Kevlar® et coton), ainsi que la réalisation de circuits électroniques. Des applications électriques utilisant ce type de transistors fibreux sont ensuite développées, tels les circuits numériques (inverseur et porte « NOR ») et analogiques (amplificateur), qui sont facilement intégrés dans un tissu et permettent des applications à faible fréquence.

## Mots-clés

**Textiles intelligents, transistor fibreux, transistor électrochimique, circuit textile, PEDOT/PSS.**

## Abstract

### Realization of fibrous electrochemical transistors and textile electronic circuits

After describing the principle of electrochemical transistors, this article presents the development of fibrous electrochemical transistors on textile yarns (cotton and Kevlar®), and the realization of electronic circuits as well. Electrical applications using this type of fibrous transistors are then developed, such as digital (inverter and gate "NOR") and analog circuits (amplifier), which are easily integrated into a fabric and satisfy the need of low frequency applications.

## Keywords

**Smart textiles, fibrous transistor, electrochemical transistor, textile circuit, PEDOT/PSS.**

Le textile intelligent est devenu un domaine de recherche très actif depuis une dizaine d'années [1-3]. Il se compose de plusieurs disciplines : génie textile, matériaux organiques, électronique, microélectronique, chimie, automatique, mécanique, etc. En utilisant les matériaux organiques semi-conducteurs, électrochimiques et électrochromiques, des applications avancées peuvent être réalisées avec des systèmes textiles, par exemple des circuits électroniques, capteurs ou écrans. Toutefois, il n'existe pas encore de circuit électronique purement textile. Les circuits électroniques textiles actuels n'utilisent que des transducteurs de traction ou de température en fonction de la variation de résistance électrique, puisqu'il manque encore certains composants électroniques textiles avancés. Ainsi, afin de valoriser le circuit électronique textile, il est nécessaire de développer des composants électroniques textiles plus avancés comme des transistors ou des diodes.

Avant de présenter les résultats obtenus dans le développement de transistors fibreux et leur intégration dans des circuits électriques, rappelons leur principe de fonctionnement.

## Principe de fonctionnement des transistors électrochimiques

En 1984, H.S. White *et coll.* ont rapporté la création de transistors électrochimiques dans un dispositif en solution comprenant trois électrodes, en employant le polypyrrole comme matériau actif [4]. Ce travail a ouvert la voie à une série d'études intéressantes montrant l'utilisation réussie de différents polymères conducteurs pour fabriquer des transistors électrochimiques. Parmi ces polymères, le poly(3,4-éthylènedioxythiophène) dopé par polystyrène sulfone (PEDOT:PSS) a été le plus utilisé [5-6].

Afin de montrer le principe de fonctionnement d'un transistor électrochimique, un exemple concret est présenté dont le canal est composé du PEDOT:PSS. Il s'agit d'un polymère conducteur dans un état oxydé noté PEDOT<sup>+</sup>:PSS<sup>-</sup>. Quand il est réduit sous l'effet du courant électrique, il devient neutre et on l'appelle PEDOT<sup>0</sup>. On utilise souvent un gel contenant des ions sodium comme électrolyte dans le but de réduire le PEDOT<sup>+</sup>:PSS<sup>-</sup>. Le prototype de transistor est présenté sur la *figure 1a*.

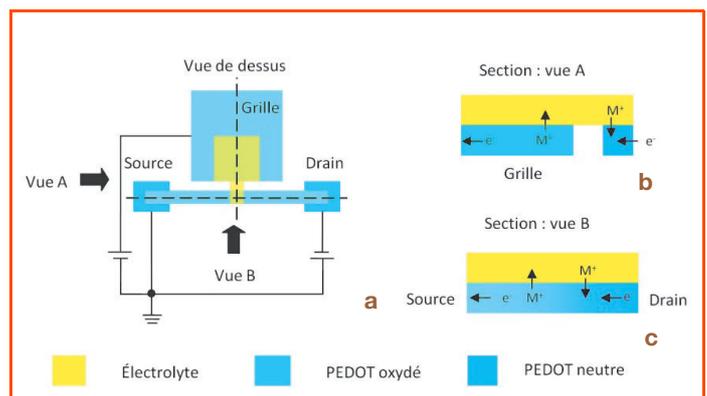
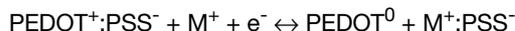


Figure 1 - Prototype de transistor électrochimique.

Le principe de fonctionnement d'un transistor électrochimique est le suivant : lorsque la tension de la grille  $V_g$  est égale à zéro, le transistor est en état « on » (état d'impédance faible) et permet le passage d'un courant élevé par le canal. Ensuite, un potentiel négatif est appliqué sur le drain (d) et un potentiel positif est appliqué sur la grille (g). Dans ce cas, la courbe d'intensité  $I_d = f(V_d)$  dépend de la tension  $V_g$ , c'est-à-dire de l'état de réduction électrochimique du canal. Cette

réaction dépend de deux facteurs différents. Lorsque la grille est chargée positivement, les cations de l'électrolyte entrent dans le canal de PEDOT:PSS (eq. 1), où  $M^+$  représente le cation de l'électrolyte, et l'électron  $e^-$  dérive de l'électrode source connectée à la masse *figure 1b*.



Lorsque le potentiel sur le drain est légèrement négatif, la courbe  $I_d = f(V_d)$  est linéaire quelle que soit la tension de la grille  $V_g$ . Ce mode de fonctionnement du transistor électrochimique est équivalent au régime linéaire du transistor à effet de champ. Lorsque le potentiel du drain décroît davantage, le courant du drain commence à être saturé et le pincement du canal est observé. Ce mode de fonctionnement est équivalent au régime de saturation du transistor à effet de champ. L'effet de pincement est provoqué par la différence de potentiel le long du canal (*figure 1c*). Le champ électrique associé à l'intérieur du canal est alors opposé à celui au cœur de l'électrolyte à côté du canal PEDOT:PSS. Ce champ électrique établit aussi un état d'équilibre redox avec un gradient de concentration de PEDOT réduit du côté de l'électrode du drain chargée négativement.

## Réalisations et résultats

Avant d'élaborer le transistor fibreux, nous enduisons le fil (en coton ou en Kevlar®) par voie « trempage-retrait » en utilisant un montage développé dans notre laboratoire (*figure 2*). C'est un type d'enduction « roll-to-roll » en continu. Le fil enduit est séché par un four tubulaire ou par un décapeur. La vitesse de passage est de 0,5 mm/min ; la température de chauffage est d'environ 80-110 °C. Ce montage est installé sous une hotte aspirante.

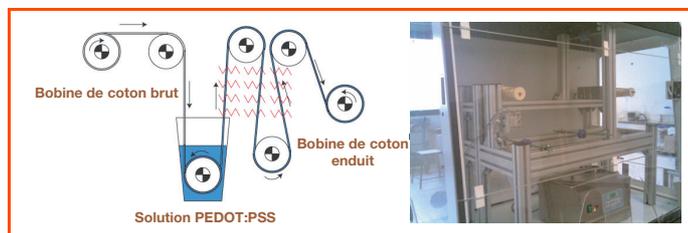


Figure 2 - Montage d'enduction par voie « trempage-retrait » en continu de polymère PEDOT:PSS sur le fil en coton.

L'électrolyte est ensuite préparé selon la référence [7]. La solution électrolytique jaune transparente est prête à utiliser après avoir été traitée à l'ultrason pendant 10 min. Elle peut être conservée pendant plusieurs mois à température de 4-6 °C.

La résistance du fil avec le revêtement de PEDOT:PSS est mesurée par la méthode de « deux points » sur une distance aléatoire. La résistance linéique du fil en coton est d'environ 26,82 kΩ/cm et 13,83 kΩ/cm pour le fil en Kevlar® (*figure 3*).

On élabore les transistors fibreux électrochimiques sous deux formes différentes : « croisé » et « ligne parallèle ».

- **Fils croisés** : deux fils avec le revêtement PEDOT:PSS sont croisés sur un support plastique avec les vis métalliques (*figure 4a*). La hauteur des fils peut être réglée par les vis de manière précise. Les deux fils ne doivent pas se toucher pour éviter le contact électrique direct. Une goutte de la solution électrolytique est ensuite ajoutée au niveau du croisement

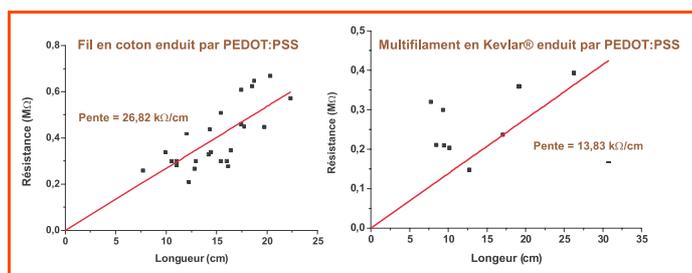


Figure 3 - Résistance linéique du fil en coton et en Kevlar® enduit par PEDOT:PSS.

des fils. Après avoir été chauffé à 65 °C pendant 1 min, l'électrolyte devient solide et transparent (*figure 4b*). Puisque c'est une forme croisée, deux fils sont symétriques au niveau de la topologie, l'un de ces fils pouvant fonctionner comme le drain et la source, et l'autre comme la grille, et réciproquement. Imaginons l'intégration de ce type de transistor fibreux dans un tissu ; le procédé de mise en place de l'électrolyte n'est pas pratique car la solution est facilement absorbée par le tissu à cause de la force capillaire. Par conséquent, un point dur pourrait modifier la sensation du toucher de ce tissu.

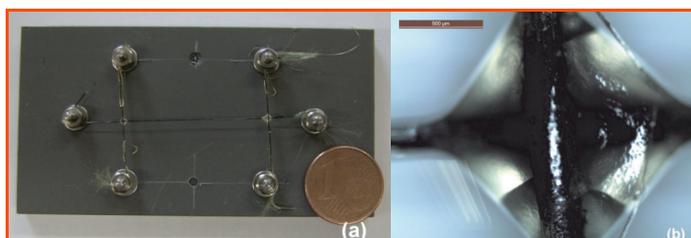


Figure 4 - a) Deux transistors fibreux électrochimiques sont fixés sur un support plastique par les vis métalliques sous forme croisée ; b) Croisement des fils avec un électrolyte.

- **Fils parallèles** : afin d'éviter l'inconvénient du point dur, on peut élaborer un transistor sous la forme de fils parallèles. Le procédé d'élaboration du dispositif est présenté sur la *figure 5*. On prépare deux fils avec le revêtement de PEDOT:PSS comme le filament de drain/source et le filament de grille (*figure 5a*). Une goutte de solution électrolytique est mise en place sur un fil avec le revêtement de PEDOT:PSS (*figure 5b*). Une fois l'électrolyte devenu solide (par chauffage), le fil est enduit par une couche isolante de résine BCB35 (CYCLO-TENE™ 3022-35) (*figure 5c*). Puis ce fil est coupé au niveau de l'électrolyte (*figure 5a*). Il est ensuite assemblé par torsion avec un autre fil revêtu de PEDOT:PSS. Enfin, les deux fils sont « collés » par une deuxième goutte fine d'électrolyte (*figure 5e*). Le revêtement de résine BCB35 sert à éviter de mettre les deux fils en contact électrique. Puisque cette

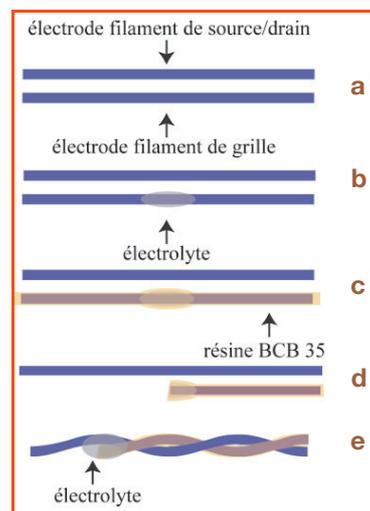


Figure 5 - Procédé d'élaboration de transistor fibreux sous la forme « ligne parallèle ».

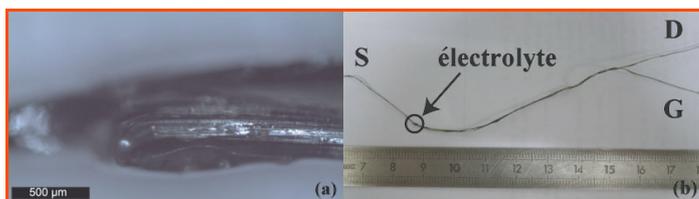


Figure 6 - a) Électrolyte mis en place dans un transistor fibreux sous la forme des filaments parallèles ; b) Transistor fibreux électrochimique.

forme n'est pas symétrique, l'un des filaments fonctionne comme drain et source et l'autre comme grille (figure 6). Cette forme de transistor est facile à intégrer dans un tissu ou autre structure textile étant donné qu'il se présente sous forme d'un fil classique avec un contact d'un côté et deux de l'autre.

Les caractéristiques électriques des transistors fibreux sont présentées sur la figure 7 (forme « ligne parallèle » sur le fil en Kevlar®). Le régime linéaire et de saturation sont observables de manière évidente. De plus, la tension appliquée sur la grille est faible (-1,5 V), ce qui est pratique pour les applications textiles en termes de sécurité. Le rapport on/off est de  $1,9 \times 10^3$  pour le transistor fibreux sur le fil en Kevlar® et de  $1,22 \times 10^2$  pour le fil en coton.

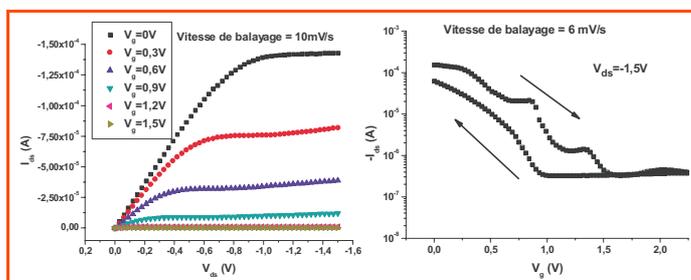


Figure 7 - Caractéristiques de sorties d'un transistor électrochimique fibreux sous la forme « ligne parallèle » en Kevlar®.

## Applications

La combinaison de transistors et d'autres composants (résistance, condensateur, inductance) aboutit à des circuits électroniques ayant pour but de réaliser des fonctions telles qu'inverseur ou amplificateur. Ici, nous avons utilisé les transistors fibreux afin de réaliser deux types de circuits électroniques (numérique et analogique). Les transistors utilisés pour le circuit électronique sont les transistors électrochimiques fibreux en coton ou en Kevlar® sous différentes formes.

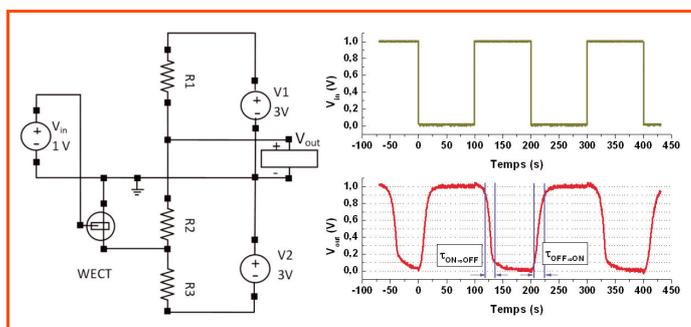


Figure 8 - Schéma de circuit et caractéristique de sortie d'un inverseur réalisé avec un transistor fibreux sous forme « croisé » sur fil en coton (largeur de pulse : 200 s).

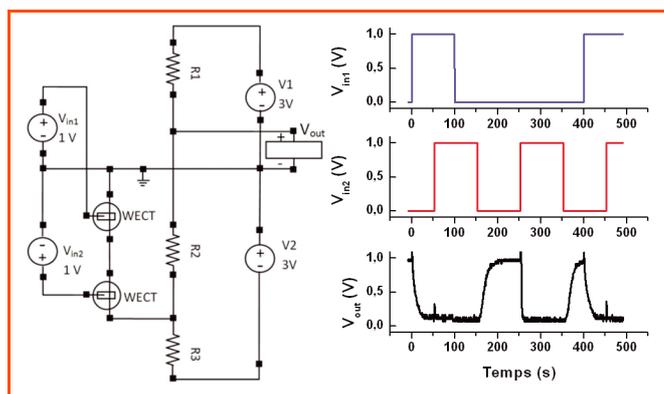


Figure 9 - Schéma et caractéristique de sortie d'un circuit « NOR-gated » réalisé avec deux transistors fibreux sous forme « croisé » et « ligne parallèle » sur fil en coton.

Selon la figure 8, un inverseur peut être facilement réalisé en combinant un transistor fibreux et un fil conducteur. Pour obtenir la fonction d'inverseur, les relations entre les résistances sont :

$$R_1 = R_2 + R_3 \quad \text{et} \quad R_3 = 2 R_2$$

Lorsque l'entrée,  $V_{in1}$ , est égale à 1 V, la sortie,  $V_{out}$ , est égale à 0 V, et réciproquement. La durée d'un cycle de pulse d'entrée est de 200 s et le rapport cyclique est égal à 50 %. Le temps de commutation  $\tau_{ON \rightarrow OFF}$  est d'environ 16 s, et  $\tau_{OFF \rightarrow ON}$  est d'environ 17,5 s.

Lorsque deux transistors fibreux sont connectés en série à la place d'un transistor, un circuit électronique « NOR-gated » peut être réalisé (figure 9). Tous les fils sont cousus manuellement dans le tissu. La figure 10 montre les photos des circuits électroniques textiles réalisés par les transistors fibreux sous forme « croisé » et « ligne parallèle ».

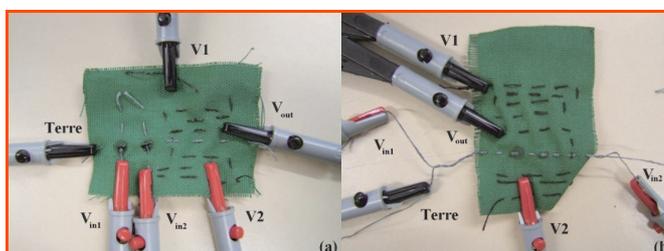


Figure 10 - a) Circuit « NOR-gated » réalisé avec deux transistors fibreux sous forme « croisé » en utilisant le fil en coton et b) sous forme « ligne parallèle ».

La caractéristique électrique est également présentée sur la figure 9. Il y a deux entrées,  $V_{in1}$  et  $V_{in2}$ . La durée d'un cycle de  $V_{in1}$  est de 400 s et celle d'un cycle de  $V_{in2}$  est de 200 s, avec une largeur de pulse « on » de 100 s dans les deux cas. Nous constatons que la sortie,  $V_{out}$ , est égale à 1 V lorsque les deux entrées sont égales à 0 V. Dans les autres cas, la sortie est égale à 0 V. De plus, une augmentation instantanée de la tension de sortie est observée lorsque l'une ou l'autre des entrées commute de 0 V à 1 V ( $t = 0$  s, 50 s, 250 s, 400 s et 450 s). Ce phénomène est dû à une hydrolyse d'électrolyte provoquée par l'excitation positive de grille [8].

Hormis les circuits numériques textiles, le circuit analogique textile peut être également réalisé par le transistor fibreux. Le plus simple circuit analogique, l'« amplificateur », est développé avec un transistor fibreux et un fil conducteur. Le schéma du circuit et les

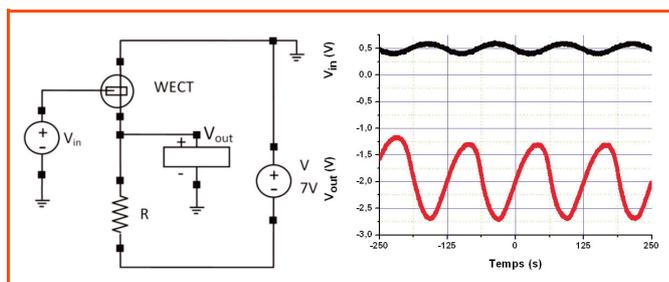


Figure 11 - Schéma et caractéristique électrique d'un circuit électrique d'un amplificateur réalisé avec un transistor fibreux et un fil conducteur.

caractéristiques électriques sont présentés sur la figure 11. Son entrée est un signal sinusoïdal ( $V_{in}(t) = 0,5 - 0,1 \sin(2\pi t/125)$ ). Nous constatons que la sortie est un signal oscillatoire avec la même période de cycle. La valeur de sortie oscillatoire est de  $-2,75$  V à  $-1,25$  V. Le gain d'amplification atteint 7,5. La sortie ressemble à un signal sinusoïdal. Toutefois, elle incline légèrement vers la droite. Ce phénomène réside dans le fait que la réduction est moins rapide que l'oxydation comme présenté auparavant. Ce circuit analogique ouvre la possibilité de développer des amplificateurs de capteurs, comparateurs, filtres sélectifs de fréquences, oscillateurs, régulations à l'asservissement, etc.

## Perspectives

Des transistors fibreux électrochimiques ont été réalisés avec un système intelligent (électrique et électronique) intégré dans la structure textile. La suite de ce projet réside dans deux aspects : la mise en œuvre et la valorisation des composants textiles électriques. Afin d'amoindrir le coût, le procédé de fabrication industrielle en grande série a besoin d'une procédure simple et efficace. La méthode « retrait-trempage » est un candidat convenable, comme nous l'avons montré ici. Toutefois, la régularité et la qualité de la couche enduite restent encore un problème, qui est dû généralement au procédé d'enduction par voie solution. Il dépend de la vitesse d'enduction, de la méthode de séchage, de la viscosité de la solution, de la tension superficielle de substrat, etc. Une deuxième piste de développement réside dans la valorisation des composants textiles électriques. Le fil conducteur peut constituer un circuit électronique simple pour réaliser un capteur de tension [9-10] ou de posture [11-12], etc. [13]. De plus, à l'aide de composants plus avancés comme le transistor fibreux, on peut réaliser un circuit électronique complexe. Des capteurs biologiques [14] et des écrans textiles [15-16] pourraient ainsi être développés.

## Références

- [1] Tao X., *Smart fibres, fabrics and clothing: Fundamentals and applications*, Woodhead Publishing, 2001.
- [2] Tao X., *Wearable electronics and photonics*, Woodhead Publishing, 2005.
- [3] Mattila H.R., *Intelligent textiles and clothing*, Woodhead Publishing, 2006.
- [4] White H.S., Kittlesen G.P., Wrighton M.S., Chemical derivatization of an array of three gold microelectrodes with polypyrrole: fabrication of a molecule-based transistor, *J. Am. Chem. Soc.*, **1984**, 106(18), p. 5375.
- [5] Mabeck J.T. et al., Microfluidic gating of an organic electrochemical transistor, *Appl. Phys. Lett.*, **2005**, 87(1), p. 013503.
- [6] Nilsson D. et al., Electrochemical logic circuits, *Adv. Mater.*, **2005**, 17(3), p. 353.
- [7] Hamedi M., Forchheimer R., Inghanas O., Towards woven logic from organic electronic fibres, *Nat. Mater.*, **2007**, 6(5), p. 357.
- [8] Said E. et al., Effects of the ionic currents in electrolyte-gated organic Field-effect transistors, *Adv. Funct. Mater.*, **2008**, 18(21), p. 3529.
- [9] Wijesiriwardana R., Inductive fiber-meshed strain and displacement transducers for respiratory measuring systems and motion capturing systems, *IEEE Sensors Journal*, **2006**, 6(3), p. 571.
- [10] Zhang H. et al., Conductive knitted fabric as large-strain gauge under high temperature, *Sensors and Actuators A: Physical*, **2006**, 126(1), p. 129.
- [11] Huang C.T. et al., A wearable yarn-based piezo-resistive sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, **2008**, 141(2), p. 396.
- [12] Lorussi F. et al., Wearable, redundant fabric-based sensor arrays for reconstruction of body segment posture, *IEEE Sensors Journal*, **2004**, 4(6), p. 807.
- [13] Choi S., Jiang Z.W., A wearable cardiorespiratory sensor system for analyzing the sleep condition, *Expert Systems with Applications*, **2008**, 35(1-2), p. 317.
- [14] Macaya D.J. et al., Simple glucose sensors with micromolar sensitivity based on organic electrochemical transistors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, **2007**, 123(1), p. 374.
- [15] Matyba P. et al., Graphene and mobile ions: the key to all-plastic, solution-processed light-emitting devices, *ACS Nano*, **2010**, 4(2), p. 637.
- [16] Sandstrom A., Matyba P., Edman L., Yellow-green light-emitting electrochemical cells with long lifetime and high efficiency, *Appl. Phys. Lett.*, **2010**, 96(5), p. 053303.



X. Tao



V. Koncar



C. Dufour

### Xuyuan Tao

est maître de conférences à l'École Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles (ENSAIT)\*.

### Vladan Koncar

est directeur du laboratoire scientifique du laboratoire de GÉnie et Matériaux TEXTiles (GEMTEX), EA 2461\*\*, professeur et directeur de recherche à l'ENSAIT\*.

### Claude Dufour

est maître de conférences HC à l'Université des Sciences et Technologies de Lille\*\*.

\* ENSAIT/GEMTEX, 2 allée Louise et Victor Champier, BP 30329, F-59056 Roubaix Cedex.

Courriels : xuyuan.tao@ensait.fr, vladan.koncar@ensait.fr

\*\* Université des Sciences et Technologies de Lille, IEMN, UMR CNRS 8520, avenue Poincaré, BP 60069, F-59652 Villeneuve d'Ascq.  
Courriel : claude.dufour@iemn.univ-lille1.fr



Société Chimique de France

facebook

La SCF sur Facebook, vous aimez ?

Parlez-en autour de vous,

et invitez vos amis et collègues à nous rejoindre !

• [www.facebook.com/pages/Soci%C3%A9t%C3%A9-Chimique-de-France/114534205270205](http://www.facebook.com/pages/Soci%C3%A9t%C3%A9-Chimique-de-France/114534205270205)