

Électrochimie et nanosciences

Jean Christophe Lacroix, Fethi Bedioui et Philippe Hapiot

Résumé Les nanosciences constituent un champ de recherche transversal où interviennent physique, chimie, science des matériaux, science des surfaces, électrochimie, biologie, informatique, etc. Elles se caractérisent par un ordre de grandeur spatiale et par l'existence de propriétés originales de la matière à cette échelle. Les recherches dans ce domaine forcent leurs objets vers cette taille. Dans cet article sont exposés quelques exemples qui montrent comment l'électrochimie apporte des moyens d'investigation et de conception pertinents pour travailler à cette échelle.

Mots-clés **Électrochimie localisée, nanoélectrochimie, SECM.**

Abstract **Electrochemistry and nanosciences**

Nanosciences are a field of transversal research involving physics, chemistry, materials, surfaces, electrochemistry, biology science, computer, etc. They are characterized by an order of spatial magnitude and the existence of original properties of matter at this scale. Research in this field forces their objects to this size. In this paper are exposed some examples that show how electrochemistry brings relevant investigation and design ways to work on this scale.

Keywords **Localized electrochemistry, nanoelectrochemistry, SECM, scanning electrochemical microscope.**

L' électrochimie permet de construire des surfaces fonctionnalisées et nanostructurées et des composants électrochimiquement commandés, d'atteindre à très bas coût des échelles ultimes en élaborant des filaments métalliques, des contacts atomiques ou des nanofils constitués de quelques molécules. Elle permet également de suivre le processus de construction de la nanostructure au cours de sa formation et offre des techniques d'étude fines de cette nanostructure. L'électrochimie est donc essentielle aux nanosciences dont elle constitue une branche.

Le lecteur trouvera ici une description succincte des thématiques centrales et les tendances nouvelles de l'électrochimie en nanosciences. Elles seront illustrées en s'appuyant principalement sur les travaux d'équipes françaises, tout en les positionnant par rapport à ceux de la communauté scientifique internationale. L'article ne prétend en aucun cas être une revue des nombreuses publications du domaine.

Microscopie et imagerie électrochimique

La première décennie de ce XXI^e siècle a permis l'essor et la diffusion dans la communauté française du microscope électrochimique, un outil indispensable pour la caractérisation de processus physico-chimiques ou électrochimiques aux interfaces. Dans cette technique, l'échantillon est observé par l'intermédiaire d'un médiateur électrogénéré à une micro-/nanoélectrode. La vision de l'échantillon est donc fonction de la nature de ce médiateur qui peut être adapté à la propriété que l'on souhaite étudier. Le champ d'application s'étend des matériaux (catalyse, corrosion, génération d'énergie, électrolyse) [1] à la biologie (cellules vivantes, biopuces) [2]. Il permet également d'initier localement un grand nombre de réactions chimiques et électrochimiques sur divers types de matériaux (éventuellement isolants) et de visualiser la réactivité locale. La résolution du SECM (« scanning electrochemical microscope ») en mode imagerie dépend de la distance de diffusion du médiateur électrogénéré. Cette distance est directement liée à la taille de la microélectrode sonde, ce qui fait que la résolution est souvent limitée. Même

si peu d'équipes essaient de repousser cette limite, des avancées importantes ont été achevées avec la réalisation d'électrodes de très petite taille, de l'ordre d'une dizaine de nanomètres, permettant même d'aller jusqu'à l'observation de phénomènes stochastiques (arrivée et réaction d'une nanoparticule sur l'électrode) [3].

Un autre moyen d'améliorer la résolution du SECM est de limiter la longueur de diffusion en attachant le médiateur à l'aide d'un bras flexible de type polyéthylène glycol (PEG) soit sur la microélectrode-sonde, soit sur l'objet lui-même [4]. Des résolutions similaires à celles de l'AFM (« atomic force microscope ») ont ainsi pu être obtenues en SECM grâce à l'utilisation de nanoparticules de 20 nm de diamètre modifiées par une sonde redox ferrocène portée par un bras flexible. L'acquisition de la topographie et du courant de sonde permet alors la mesure simultanée de deux paramètres *pour chaque nanoparticule individuelle* visible sur les images : (i) sa « hauteur », c'est-à-dire son diamètre ; (ii) un courant de sonde proportionnel à sa couverture en chaînes Fc-PEG. Ainsi peut-on, de manière unique, établir des corrélations croisées entre ces deux paramètres (*figure 1*).

Un autre volet important de l'application du SECM concerne l'étude de matériaux et de structures moléculaires, composites ou hybrides, et les possibilités d'appréhender leur réactivité chimique à une échelle locale et/ou multi-échelles, ce qui ouvre de nouveaux champs d'investigation et autorise l'élaboration et la caractérisation de nano-objets, comme les supra- et supermolécules, les assemblages moléculaires, les dendrimères, les couches minces, etc. Il est de plus en plus couplé avec des méthodes spectroscopiques locales qui permettent d'entrevoir des perspectives nouvelles variées. Plusieurs exemples d'utilisation du SECM dans ces domaines sont explicités dans les articles de M. Etienne *et al.*, S. Griveau *et al.* et B. Jusselme *et al.* qui suivent celui-ci.

Fonctionnalisation, micro- et nanostructurations de surfaces

Il convient également de noter l'activité de recherche soutenue dans le cadre de l'élaboration de matériaux, de

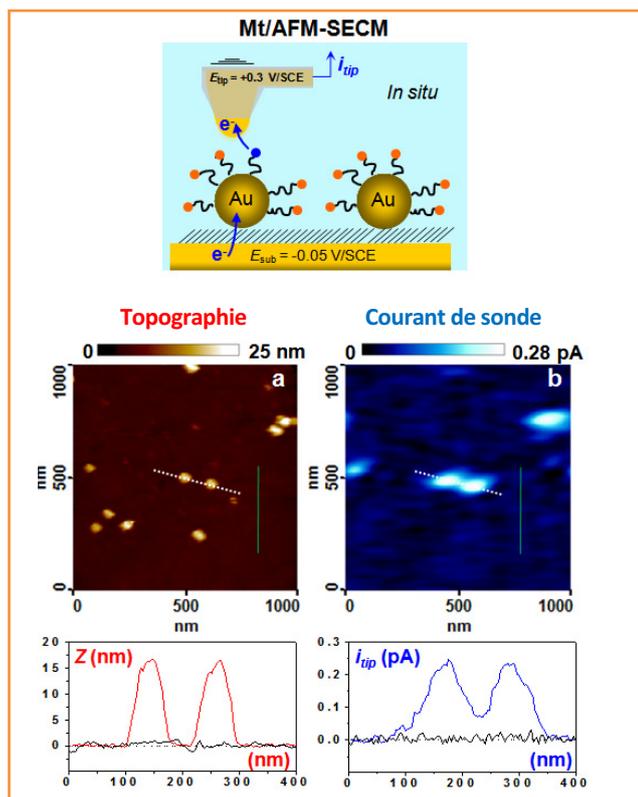


Figure 1 - Imagerie AFM-SECM en mode tapping d'une surface d'or à couche auto-assemblée de 11-amino 1-undécane-thiol portant des nanoparticules d'or Fc-PEGylées d'environ 20 nm de diamètre. Images en topographie et en courant de sonde acquises simultanément. Les graphiques représentent les coupes des images effectuées : le long de la ligne pointillée blanche passant par deux nanoparticules (tracé rouge pour la topographie et bleu pour le courant) ; le long de la ligne verte passant par une zone exempte de particule (tracé noir). Les potentiels de sonde et de substrat sont respectivement $E_{tip} = +0,30$ V/ESC et $E_{sub} = -0,05$ V/ESC (d'après [4]).

couches minces et de structures moléculaires, composites ou hybrides *via* des réactions de modification de surfaces initiées par électrochimie et en particulier par électroréduction de sels de diazonium. Cette méthode de dépôt, qui conduit au greffage covalent de molécules organiques sur une grande variété de matériaux d'électrode, s'avère compétitive par rapport aux méthodes d'auto-assemblage sur or à base de thiol. Au titre de réalisations récentes, la *figure 2A* présente une stratégie permettant d'obtenir des couches mixtes multifonctionnelles par greffage d'une première molécule apportée à la surface grâce à une encapsulation dans des cyclodextrines, leur désorption permettant, dans une deuxième étape, le greffage d'un deuxième diazonium dans les espaces libérés générant ainsi des surfaces multifonctionnelles [5]. La *figure 2B* présente le greffage sur des surfaces de calixarènes portant des groupes amines, ce qui conduit à l'immobilisation d'un gabarit moléculaire permettant également par la suite d'obtenir des surfaces multifonctionnelles [6]. Une autre stratégie, basée sur des étapes de protection/déprotection, permet à la fois de limiter le dépôt à des couches monomoléculaires [7], d'espacer les molécules greffées *via* l'utilisation de substituants de tailles variables et de fonctionnaliser par « chimie click » la couche moléculaire (*figure 2C*). Enfin, les *figures 2D* et *2E* montrent l'intégration de couches ultraminces constituées d'oligothiophènes greffés de manière covalente [8] dans des jonctions moléculaires fabriquées par des procédés CMOS (« complementary metal oxide

semiconductor ») pour réaliser des dispositifs d'électronique moléculaire [9]. Citons également, entre autres, les utilisations en électrocatalyse, dont quelques exemples sont présentés dans l'article de B. Jousselmé *et al.* (voir p. 54), ainsi que l'immobilisation de polyoxométallates, de particules magnétiques, de polymères ou de biomolécules [10].

De véritables architectures hautement contrôlées à plusieurs échelles peuvent être élaborées au travers de membranes nanoporeuses, d'assemblages tridimensionnels [11] ou bidimensionnels de nanoparticules (lithographie par nanosphère) [12] ou de phases lyotropes cristallines servant de moules pour l'obtention de méso- et micropores organisés [13]. Les substrats ainsi obtenus servent de base et de plateforme pour de nouvelles recherches dans de multiples domaines et dépassent souvent le périmètre de l'électrochimie et des nanosciences.

Un autre développement récent concerne la fonctionnalisation locale, précise et contrôlée des surfaces actives en combinant les principes des réactions développées pour l'électrosynthèse de matériaux à l'échelle macro et l'ultramicroélectrochimie [14-15]. Les domaines d'applications sont là encore très variés : électronique moléculaire et organique, matériaux et biomatériaux pour capteurs, matériaux fonctionnels intelligents.

Électronique, mémoires et jonctions moléculaires

D'une manière plus générale, l'électrochimie localisée intervient dans des domaines nouveaux pour elle comme la nanoélectronique. Ainsi, bon nombre de dispositifs de mémoires et quelques dispositifs logiques considérés par

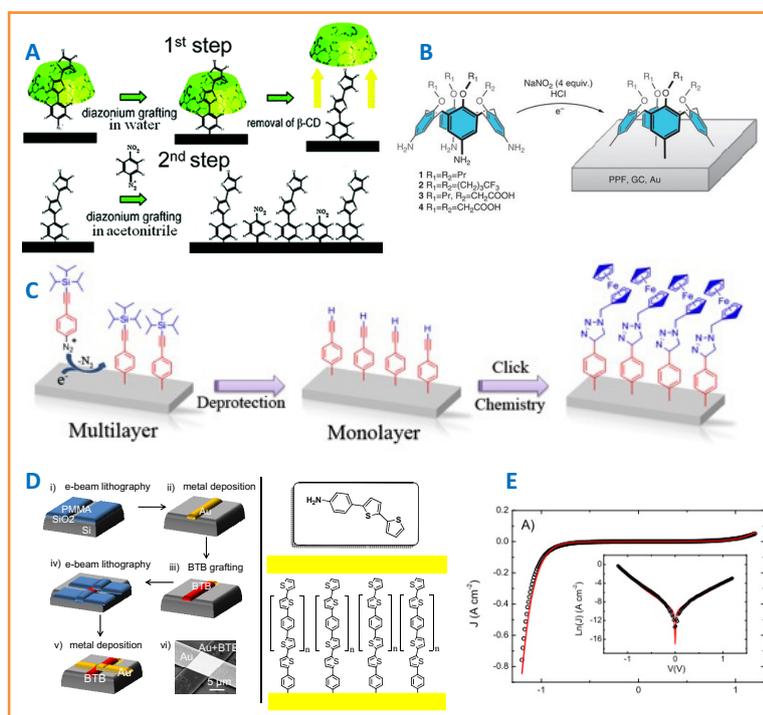


Figure 2 - Exemples de réalisation de systèmes utilisant des électroréductions de sels de diazoniums. A) Couche mixte obtenue par une stratégie en deux étapes basée sur l'encapsulation de diazoniums peu solubles dans l'eau (d'après [5]). B) Greffage de gabarit moléculaire à base de calixarènes (d'après [6]). C) Stratégie basée sur l'utilisation de diazonium portant des groupes trialkylsilyle encombrants (d'après [7]). D) Étape de fabrication d'une jonction métal/molécule/métal, les molécules incorporées étant des oligomères de thiophènes (d'après [9]). E) Courbe I(V) de ce type de jonction moléculaire.

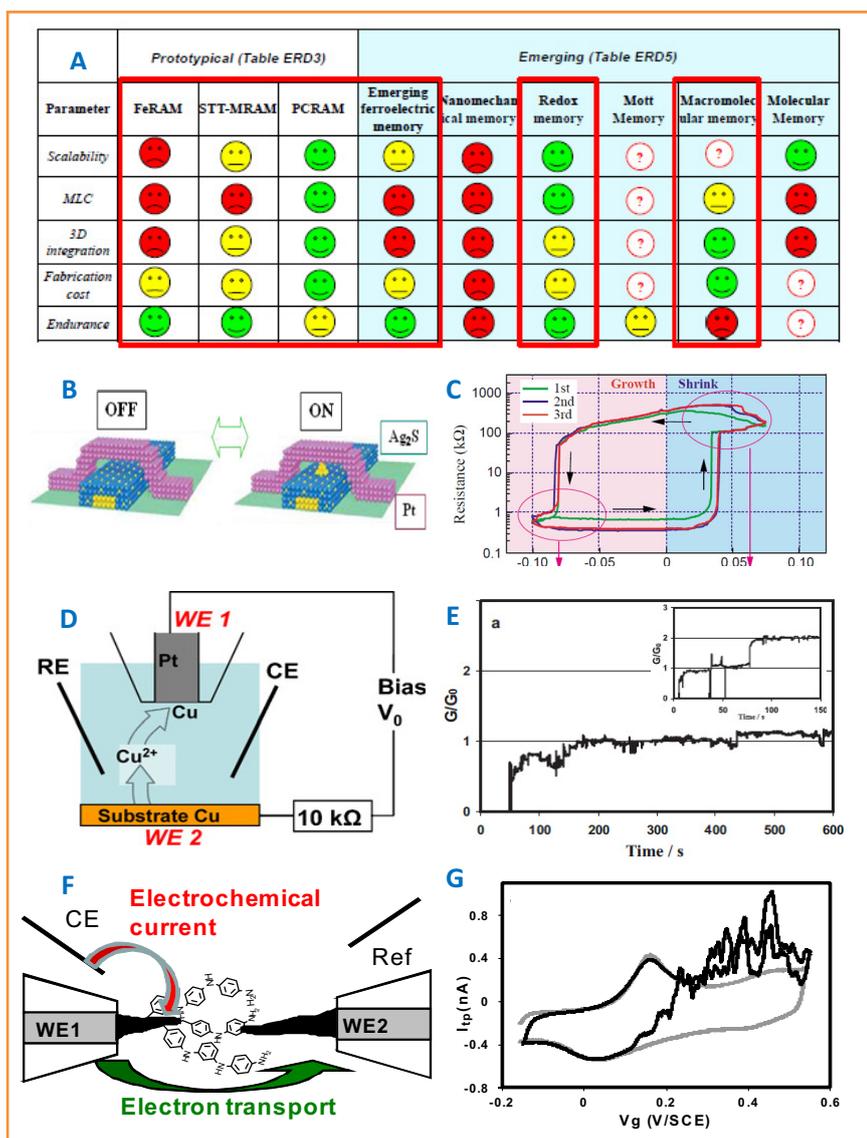


Figure 3 - A) Tableau de mérite des technologies émergentes pour la réalisation de mémoires électroniques d'après l'ITRS (d'après [16]). B) Commutateur atomique, une des technologies émergentes de mémoire redox (d'après [17]). C) Caractéristique I(V) montrant le fonctionnement mémoire d'un commutateur atomique. D) Schéma de principe de la fabrication d'un contact atomique obtenu à l'aide d'une configuration SECM (d'après [18]). E) Conductance de $1 G_0$ d'un contact atomique créé entre les deux électrodes (insert, commutation entre 1 et $2 G_0$ du même contact atomique) (d'après [18]). F) Jonction moléculaire électrochimiquement commutable obtenue dans une configuration SECM (d'après [19]). G) Réponse courant tension montrant le courant de transport à travers la jonction moléculaire s'ajoutant au courant électrochimique permettant le dopage des chaînes de polyaniline reliant deux microélectrodes (d'après [19]).

l'ITRS (International Technology Roadmap for the Semiconductor) comme susceptibles d'émerger dans les cinq à dix prochaines années sont basés sur des réactions électrochimiques localisées sur des surfaces de moins de 400 nm^2 et dans des électrolytes solides ou polymères confinés d'épaisseurs nanométriques (figure 3A) [16]. La compréhension des phénomènes redox dans de tels milieux est très certainement un enjeu important de la prochaine décennie. De tels dispositifs, couplant électrochimie et nanoélectronique, justifient l'emploi du terme « nanoelectroionic » de plus en plus utilisé par la communauté concernée. À titre d'exemple, Aono a développé, à partir de 2005, des commutateurs atomiques (figure 3B et C) basés sur la création et la rupture de filament métallique entre deux électrodes (l'une en platine, l'autre en argent) séparées par un électrolyte solide à base de sulfure d'argent. L'application d'une différence de potentiel

d'à peine un volt permet la création d'un filament d'argent reliant les deux électrodes. La conductance de ce filament est contrôlée par la zone du filament correspondant à son plus petit diamètre. Celle-ci peut être constituée d'un seul atome et, dans ce cas, la conductance du fil est quantifiée et vaut $1 G_0$ (quantum de conductance, $77 \mu\text{S}$ ou $12,9 \text{ kohms}$). La rupture de ce fil conduit à une résistance entre les deux électrodes bien plus grande de l'ordre de quelques Mohms. Cette commutation entre deux états de résistance différente est donc très facile à mesurer (figure 3C). Ces dispositifs constituent l'une des technologies émergentes des mémoires résistives avec des performances qui surpassent d'ores et déjà celle des mémoires Flash [17].

Il apparaît clairement à travers cet exemple que l'électrochimie localisée dans un milieu confiné permet de fabriquer à très bas coût des systèmes ultimes comme des nanofils dont la conductance est contrôlée par quelques atomes [18] ou quelques molécules (contacts atomiques ou jonction métal/molécule/métal). Initialement maîtrisé à l'aide de montage à deux électrodes, l'utilisation d'un montage de type SECM à quatre électrodes (figure 3D) permet de contrôler finement la formation de contacts atomiques, présentant des conductances multiples entières du quantum de conductance (figure 3E) ainsi que leur rupture, ou bien de construire des jonctions métal/oligomère-électroactifs/métal impliquant un nombre limité d'oligomères reliant les deux électrodes [19]. Enfin, ces types de jonction, impliquant des filaments électroactifs, s'avèrent électrochimiquement commutables et sont donc analogues à des transistors (figure 3F et G).

L'établissement de relations structures/propriétés et/ou structures/réactivité, la compréhension des phénomènes au sein de milieux confinés (électrodes modifiées, polymères, mono- et multicouches organisées, dispositifs de nano-électronique, nanogap, nanopores...) est une tendance lourde. Ces recherches sont accompagnées par des développements théoriques sur les processus de diffusion-réaction à des échelles de longueur nano ou micro pour les systèmes confinés ou dans des structures contrôlées [20].

Électrochimie bipolaire

Ces dernières années ont également vu l'émergence de l'électrochimie bipolaire qui s'est développée dans de multiples directions dont certaines liées aux nanosciences (synthèse de particules Janus, maîtrise de la localisation de la réactivité sur des micro-objets) [21]. Cette approche est unique car elle permet d'adresser électrochimiquement des objets dans une solution sans contact direct avec des électrodes. Cette originalité est porteuse de ruptures scientifiques et technologiques importantes. À titre d'exemple, cette électrochimie a été utilisée pour propulser des micro-objets. Ainsi, si un côté de l'objet agit comme une anode pendant que l'autre agit comme une cathode en générant des bulles à des vitesses différentes, ces réactions électrochimiques localisées

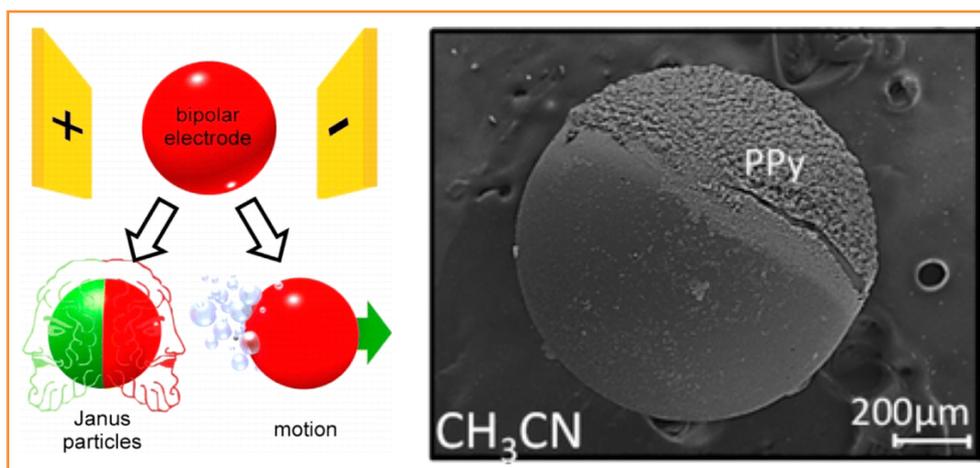


Figure 4 - À gauche : schéma de principe de l'électrochimie bipolaire (d'après [21a]). À droite : exemple de particule Janus obtenue par électrochimie bipolaire dans l'acétonitrile (d'après [21d]).

induisent une force qui permet d'actionner mécaniquement l'objet [21b]. Ce concept pourrait permettre de contrôler en 3D le mouvement de ces objets et conduire à de nombreuses applications, par exemple en microfluidique.

L'électrochimie bipolaire a aussi permis la synthèse de particules Janus et de nombreux systèmes asymétriques (nanotubes de carbone portant une tête d'or, nanoparticules semi-conductrices portant une couronne de polymères conducteurs...) ont pu être obtenus (figure 4). Plus généralement, de tels systèmes asymétriques, souvent très difficiles à obtenir, peuvent avoir un fort impact dans de nombreuses applications technologiques dans les domaines de l'énergie ou des matériaux et objets multifonctionnels.

Cette thématique émergente devrait poursuivre son essor dans les années à venir avec des applications potentielles non seulement dans le domaine des nanosciences, mais également en chimie analytique et en chimie des matériaux de manière générale.

Conclusion

Les quelques exemples d'utilisation de l'électrochimie en nanosciences présentés permettent de clairement montrer au lecteur une vision prometteuse et unique de ce qui est en train d'être élaboré aujourd'hui et contribuent à la perception de l'actualité électrochimique, particulièrement féconde dans de multiples directions tournées vers de nombreuses applications.

Références

- [1] a) Ahn H.S., Bard A.J., Surface interrogation of CoPi water oxidation catalyst by scanning electrochemical microscopy, *J. Am. Chem. Soc.*, **2015**, *137*, p. 612 ; b) Sun T., Yu Y., Zacher B.J., Mirkin M.V., Scanning electrochemical microscopy of individual catalytic nanoparticles, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2014**, *53*, p. 14120.
- [2] Razzaghi F., Seguin J., Amar A., Griveau S., Bedioui F., Biological cell morphology studies by scanning electrochemical microscopy imagery at constant height: contrast enhancement using biocompatible conductive substrates, *Electrochimica Acta*, **2015**, *157*, p. 95.
- [3] a) Park J.H., Thorgaard S.N., Zhang B., Bard A.J., Single particle detection by area amplification: single wall carbon nanotube attachment to a nano-electrode, *J. Am. Chem. Soc.*, **2013**, *135*, p. 5258 ; b) Stuart E.J.E., Tschulik K., Batchelor-McAuley C., Compton R.G., Electrochemical observation of single collision events: fullerene nanoparticles, *ACS Nano*, **2014**, *8*, p. 7648.
- [4] a) Demaille C., Anne A., Combined atomic force microscopy-scanning electrochemical microscopy, In *Nanoelectrochemistry*, M.V. Mirkin, S. Amemiya (eds), CRC Press, **2015** ; b) Huang K., Anne A., Bahri M.A., Demaille C., Probing individual redox PEGylated gold nanoparticles by electrochemical-atomic force microscopy, *ACS Nano*, **2013**, *7*, p. 4151.

- [5] a) Santos L., Ghilane J., Lacroix J.C., Formation of mixed organic layers by stepwise electrochemical reduction of diazonium compounds, *J. Am. Chem. Soc.*, **2012**, *134*, p. 5476 ; b) Santos L., Ghilane J., Martin P., Lacaze P.C., Randriamahazaka H., Lacroix J.C., Host-guest complexation: a convenient route for the electroreduction of diazonium salts in aqueous media and the formation of composite materials, *J. Am. Chem. Soc.*, **2010**, *132*, p. 1690.
- [6] Mattiuzzi A., Jabin I., Mangeney C., Roux C., Renaud O., Santos L., Bergamini J.F., Hapiot P., Lagrost C., Electrografting of calix[4]arene diazonium salts to form versatile robust platforms for spatially controlled surface functionalization, *Nature Com.*, **2012**, *3*, p. 2121/1.
- [7] Leroux Y.R., Fei H., Noël J.-M., Roux C., Hapiot P., Efficient covalent modification of a carbon surface: use of a silyl protecting group to form an active monolayer, *J. Am. Chem. Soc.*, **2010**, *132*, p. 14039.
- [8] Stockhausen V., Ghilane J., Martin P., Trippé-Allard G., Randriamahazaka H., Lacroix J.C., Grafting oligothiophenes on surfaces by diazonium electroreduction: a step toward ultrathin junction with well-defined metal/oligomer interface, *J. Am. Chem. Soc.*, **2009**, *131*, p. 14920.
- [9] a) Martin P., Della Rocca M.L., Anthore A., Lafarge P., Lacroix J.C., Organic electrodes based on grafted oligothiophene units in ultrathin, large area, molecular junction, *J. Am. Chem. Soc.*, **2012**, *134*, p. 154 ; b) Yan H., Bergren A.J., McCreery R., Della Rocca M.L., Martin P., Lafarge P., Lacroix J.C., Activationless charge transport across 4.5 to 22 nm in molecular electronic junctions, *PNAS*, **2013**, *110*(14), p. 5326 ; c) Sayed Y., Bayat A., Kondratenko M., Leroux Y., Hapiot P., McCreery R.L., Bilayer molecular electronics: all-carbon electronic junctions containing molecular bilayers made with "click" chemistry, *J. Am. Chem. Soc.*, **2013**, *135*, p. 12972.
- [10] a) Gam Derouich S., Rinfray C., Izzet G., Pinson J., Gallet J.J., Kanoufi F., Proust A., Combellas C., Control of the grafting of hybrid polyoxometalates on metal and carbon surfaces: toward submonolayers, *Langmuir*, **2014**, *30*, p. 2287 ; b) Ktari N., Quinson J., Teste B., Siaugue J.M., Kanoufi F., Combellas C., Immobilization of magnetic nanoparticles onto conductive surfaces modified by diazonium chemistry, *Langmuir*, **2012**, *28*, p. 12671.
- [11] Lalo H., Bon-Saint-Côme Y., Plano B., Etienne M., Walcarius A., Kuhn A., Site selective generation of sol-gel deposits in layered bimetallic macroporous electrode architecture, *Langmuir*, **2012**, *28*, p. 2323.
- [12] a) Santos L., Martin P., Ghilane J., Lacaze P.C., Lacroix J.C., Micro/nanostructured polypyrrole surfaces on oxidizable metals as smart electro-switchable coatings, *ACS Applied Materials & Interfaces*, **2013**, *5*, p. 10159 ; b) Santos L., Ghilane J., Lacroix J.C., Surface patterning based on nanosphere lithography and electroreduction of in situ generated diazonium cation, *Electrochem. Comm.*, **2012**, *18*, p. 20 ; c) Cernat A., Griveau S., Martin P., Lacroix J.C., Farcau C., Sandulescu R., Bedioui F., Electrografted nanostructured platforms for click chemistry, *Electrochem. Comm.*, **2012**, *23*, p. 141.
- [13] Guillemin Y., Ghanbaja J., Aubert E., Etienne M., Walcarius A., Electro-assisted self-assembly of cetyltrimethylammonium-templated silica films in aqueous media: critical effect of counteranions on the morphology and mesostructure type, *Chem. Mater.*, **2014**, *26*, p. 1848.
- [14] Noel J.M., Latus A., Lagrost C., Volanschi E., Hapiot P., Evidence for OH radical production during electrocatalysis of oxygen reduction on Pt surfaces: consequences and application, *J. Am. Chem. Soc.*, **2012**, *134*, p. 2835.
- [15] a) Lhenry S., Leroux Y.R., Orain C., Conan F., Cosquer N., Poul N.L., Renaud O., Le Mest Y., Hapiot P., Locally induced and self-induced "electroclick" onto a self-assembled monolayer: writing and reading with SECM under unbiased conditions, *Langmuir*, **2014**, *30*, p. 4501 ; b) Quinton D., Maringa A., Griveau S., Nyokong T., Bedioui F., Surface patterning using scanning electrochemical microscopy to locally trigger a "click" chemistry reaction, *Electrochem. Comm.*, **2013**, *31*, p. 112.
- [16] Assessment of the potential & maturity of selected emerging research memory technologies workshop & ERD/ERM working group meeting (6-7 avril 2012), ITRS winter conference, Hsinchu, Taiwan (5 déc. 2012), www.itrs.net/reports.html
- [17] a) Terabe K., Hasegawa T., Nakayama T., Aono M., *Nature*, **2005**, *433*, p. 47 ; b) Lacaze P.C., Lacroix J.C., in *Mémoires électroniques: Mémoires électroniques organiques non-volatiles*, Ed. Hermès Penton, **2014**.
- [18] a) Janin M., Ghilane J., Lacroix J.C., Scanning electrochemical microscopy for the fabrication of copper nanowires: atomic contacts with quantized conductance, and molecular adsorption effect, *Electrochimica Acta*, **2012**, *83*, p. 7 ; b) Leroux Y.R., Fave C., Zigah D., Trippé G., Lacroix J.C., Atomic contacts via electrochemistry in water/cyclodextrin media: a step toward protected atomic contacts, *J. Am. Chem. Soc.*, **2008**, *130*(40), p. 13465 ; c) Chen Z.B., Peng Z.L., Liang J.H., Zhou X.S., Wu D.Y., Amatore C., Mao B.W., Gold atomic contact: electron conduction in the presence of interfacial charge transfer, *Electrochem. Comm.*, **2014**, *47*, p. 41.

- [19] Janin M., Ghilane J., Lacroix J.C., When electron transfer meets electron transport in redox-active molecular nanojunctions, *J. Am. Chem. Soc.*, **2013**, *135*, p. 2108.
- [20] a) Pebay C., Sella C., Thouin L., Amatore C., Mass transport at infinite regular arrays of microband electrodes submitted to natural convection: theory and experiments, *Anal. Chem.*, **2013**, *85*, p. 12062 ; b) Klymenko O.V., Svir I., Oleinick A., Amatore C., A novel approach to the simulation of electrochemical mechanisms involving acute reaction fronts at disk and band microelectrodes, *ChemPhysChem*, **2012**, *13*, p. 845.
- [21] a) Loget G., Zigah D., Bouffier L., Sojic N., Kuhn A., Bipolar electrochemistry: from materials science to motion and beyond, *Acc. Chem. Res.*, **2013**, *46*, p. 2513 ; b) Loget G., Kuhn A., Propulsion of microobjects by dynamic bipolar self-regeneration, *J. Am. Chem. Soc.*, **2010**, *132*, p. 15918 ; c) Loget G., Roche J., Gianessi E., Bouffier L., Kuhn A., Indirect bipolar electrodeposition, *J. Am. Chem. Soc.*, **2012**, *134*, p. 20033 ; d) Kong S., Fontaine O., Roche J., Bouffier L., Kuhn A., Zigah D., Electropolymerization of polypyrrole by bipolar electrochemistry in an ionic liquid, *Langmuir*, **2014**, *30*, p. 2973.



J.C. Lacroix



F. Bedioui



P. Hapiot

Jean Christophe Lacroix

est professeur à l'UFR de Chimie de l'Université Paris Diderot et directeur adjoint du laboratoire ITODYS UMR 7086 où il anime l'équipe « Nano-électrochimie »¹.

Fethi Bedioui

est directeur de recherche au CNRS, directeur scientifique et des relations industrielles de Chimie ParisTech².

Philippe Hapiot

est directeur de recherche au CNRS, affecté à l'Institut des Sciences chimiques de Rennes³.

¹ Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité, ITODYS, UMR 7086 CNRS, 15 rue Jean-Antoine de Baïf, F-75205 Paris Cedex 13.
Courriel : lacroix@univ-parisdiderot.fr

² PSL Research University, Chimie ParisTech, Unité de technologies chimiques et biologiques pour la santé, 11 rue Pierre et Marie Curie, F-75005 Paris.
Courriel : fethi.bedioui@chimie.paristech.fr

³ Institut des Sciences chimiques de Rennes, CNRS, Université de Rennes 1, UMR 6226, Équipe MaCSE, Campus de Beaulieu, F-35042 Rennes Cedex.
Courriel : philippe.hapiot@univ-rennes1.fr



LAB

www.knf.fr

4 boulevard d'Alsace 68128 Village-Neuf

CONCEPTEUR | FABRICANT

ÉVAPORATEURS ROTATIFS • GROUPES DE POMPAGE • CONTRÔLEURS DE VIDE

Découvrez nos nouveaux équipements pour le laboratoire

RC 600



SCC 950



VC 900

Pour + d'infos, contactez-nous : lab@knf.fr