

Réalisations de dispositifs plasmoniques actifs

Yann Leroux, Claire Fave, Gaëlle Trippé et Jean-Christophe Lacroix

- Résumé** En raison de la demande toujours croissante de miniaturisation de systèmes électroniques et photoniques, l'électronique moléculaire et les systèmes plasmoniques sont actuellement pressentis comme des technologies alternatives pour écrire, lire et stocker l'information. Cet article reporte la réalisation de nouveaux dispositifs plasmoniques actifs, dans lesquels la commutation électrochimique d'un film de polymère conducteur d'épaisseur nanométrique, entre son état réduit et oxydé, est utilisée pour contrôler, commuter et moduler la résonance des plasmons de surface de réseaux de nanoparticules d'or.
- Mots-clés** Plasmon de surface, photonique, électrochimie, polymères conducteurs, nanostructure.
- Abstract** **Realization of actif plasmonic devices**
Due to the continuously increasing demand for ultimate miniaturization of electronic and photonic systems, molecular electronics and plasmonic devices are currently booming as alternative technologies because of their very promising potential in writing, reading, storing, and processing information at the nanoscale. This paper reports new active molecular plasmonic devices in which the electrochemical switching of a nanometric film of conductive polymer between its reduced and oxidized state is used in order to control, switch, and modulate localized surface plasmon resonance of gold nanoparticle arrays.
- Keyword** Surface plasmon, photonic, electrochemistry, conducting polymer, nanostructure.

Les évolutions technologiques vont se heurter prochainement à des limitations physiques incontournables. Ces deux dernières décennies ont vu s'accroître l'intérêt pour trouver des solutions au remplacement des semi-conducteurs conventionnels dans les systèmes électroniques et photoniques. L'électronique moléculaire et les dispositifs plasmoniques pourraient permettre de surmonter les limites physiques et économiques des dispositifs utilisant ces derniers et sont pressentis comme technologies alternatives pour écrire, lire et stocker l'information à l'échelle nanométrique. Les polymères conducteurs ou oligomères sont proposés et utilisés comme briques élémentaires en électronique moléculaire. Le transport et le transfert électroniques à l'échelle nanométrique au sein de molécules ou de jonctions métal/molécules/métal sont largement étudiés. La commutation électrochimique de polymères conducteurs a été démontrée comme étant un moyen facile de contrôler la structure électronique et donc les propriétés de molécules greffées [1]. Cette dernière approche est une possible interprétation du sens des deux mots « électronique moléculaire » où le transfert d'un électron unique dans quelques oligomères conducteurs peut potentiellement modifier les propriétés d'une nanoparticule métallique ou de quelques molécules greffées afin d'écrire, lire et stocker l'information sur ces objets. La plasmonique vise à utiliser notamment des nanoparticules métalliques, supportant des « plasmons de surface », pour la réalisation de dispositifs permettant de telles propriétés. Un plasmon de surface est défini comme étant une oscillation collective des électrons à la surface d'un métal (or, argent...). Une des propriétés de ces nanoparticules métalliques est de présenter une absorption dans le domaine du visible, nommée plasmon de surface. Des réalisations de plusieurs dispositifs plasmoniques, comme des filtres [2], des guides d'onde [3] (voir encadré p. 25) ou

encore des sources de lumière nanoscopique [4], ont déjà été démontrées. Néanmoins, pour que la plasmonique tienne toutes ses promesses, des dispositifs actifs comme des modulateurs ou des commutateurs seront nécessaires.

Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à l'étude et à la réalisation de dispositifs plasmoniques actifs, basés sur l'utilisation des propriétés électriques des polymères conducteurs couplées aux propriétés optiques de nanoparticules d'or, pour l'obtention de modulateurs et commutateurs plasmoniques.

Résultats et discussions

Concept

Si nous considérons une particule dont les dimensions (a, b, c) sont inférieures à la longueur d'onde incidente, nous pouvons appliquer l'approximation quasi statique et la polarisabilité, α , de cette particule peut être décrite par la formule suivante :

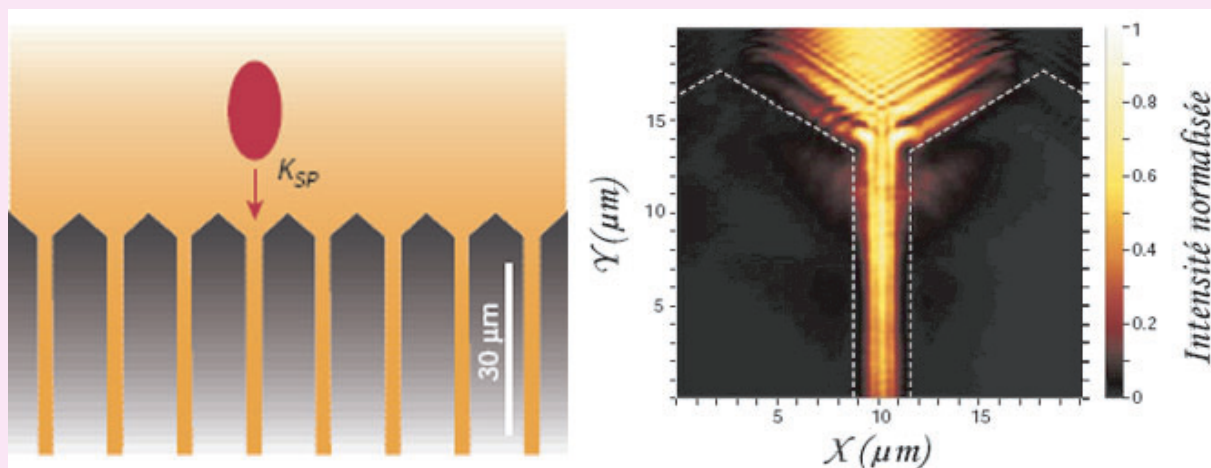
$$\alpha = \frac{4}{3} \pi abc \frac{\epsilon_M - \epsilon_1}{\epsilon_1 + L_i (\epsilon_M - \epsilon_1)} \quad (1)$$

avec ϵ_M la fonction diélectrique du métal, ϵ_1 la constante diélectrique du milieu environnant les nanoparticules, et L_i le facteur de forme des particules ($\Sigma L_i = 1$, et $L_i = 1/3$ pour une sphère).

D'après la formule (1), nous pouvons voir que la résonance plasmon de nanoparticules métalliques est très sensible à la taille et la forme des particules, ainsi qu'à la nature du métal utilisé mais aussi du milieu environnant les nanoparticules. La très grande sensibilité des résonances de plasmons de surface à leur environnement en a ainsi fait des candidats très étudiés pour la réalisation de capteurs, tant chimiques que

Le guide d'onde plasmonique, un exemple de dispositif plasmonique

Un des challenges économiques actuels est la miniaturisation de composés électroniques et photoniques. La plasmonique utilisant des matériaux nanostructurés peut potentiellement répondre à ces exigences, en contrôlant et manipulant la lumière à l'échelle nanométrique. En 2003, Barnes *et al.* ont démontré la possibilité de manipuler et contrôler la lumière en réalisant un guide d'onde plasmonique [3]. La partie gauche de la *figure* ci-dessous présente le dispositif nécessaire à la réalisation d'un tel guide d'onde. Celui-ci consiste en un dépôt d'un film d'or de 40 nm d'épaisseur sur un substrat de verre, avec des bandes de 2,5 μm de large. Le point rouge indique la portion du métal illuminé (800 nm) par réflexion interne totale. La partie droite montre une image de la propagation de l'onde plasmon de surface sur ce film d'or, réalisée grâce à un microscope à effet tunnel optique (PSTM). Elle démontre la propagation de l'onde plasmon de surface le long d'une des bandes d'or sur environ 15 μm .



Représentation schématisée du guide d'onde réalisé par Barnes *et al.* (à gauche) et image PSTM de ce guide d'onde (à droite) obtenue lors d'une excitation par réflexion interne totale au niveau du point rouge du schéma de principe. D'après [3].

biologiques ou physiques. Certains dispositifs plasmoniques fonctionnant en configuration de Kretschmann (films d'or fins déposés sur des prismes) sont déjà commercialisés [5]. C'est ce « milieu environnant » qui va nous intéresser plus particulièrement, et que nous pouvons faire varier réversiblement en utilisant les propriétés redox de polymères conducteurs.

Afin de réaliser des dispositifs plasmoniques actifs, nous avons utilisé la polyaniline (PANI) comme polymère conducteur. Il est connu qu'il est possible d'électro-déposer facilement des films de PANI d'épaisseur nanométrique sur ITO (oxyde d'indium et d'étain, en anglais « indium tin oxide ») et or, mais aussi de commuter très rapidement ce genre de films entre son état réduit et isolant et son état oxydé et conducteur [6]. De plus, la polyaniline peut être électro-commutée un grand nombre de fois sans dégradation du signal électrochimique. Les réseaux de nanoparticules d'or présentant des plasmons de surface localisés, utilisés dans cette étude, ont été fabriqués par lithographie assistée par faisceau d'électrons [7]. L'obtention de ces réseaux de nanoparticules d'or et l'interprétation des résultats présentée ici n'a pu être possible qu'avec le concours de l'équipe Plasmonique, spectroscopies exaltées de surface de l'ITODYS (UMR 7086) à l'Université de Paris 7-Denis Diderot et l'équipe Nano-optique de l'Institute for physics de l'Université de Graz en Autriche.

Réalisation d'un premier dispositif plasmonique : le modulateur plasmonique

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à l'influence de l'état redox de la PANI sur un réseau (réseau A) de nanoparticules d'or sphériques [8]. La *figure 1* présente les spectres d'extinction optique de ce réseau à l'air (courbe 1), dans l'eau (courbe 2), puis recouvert d'un film de PANI dans

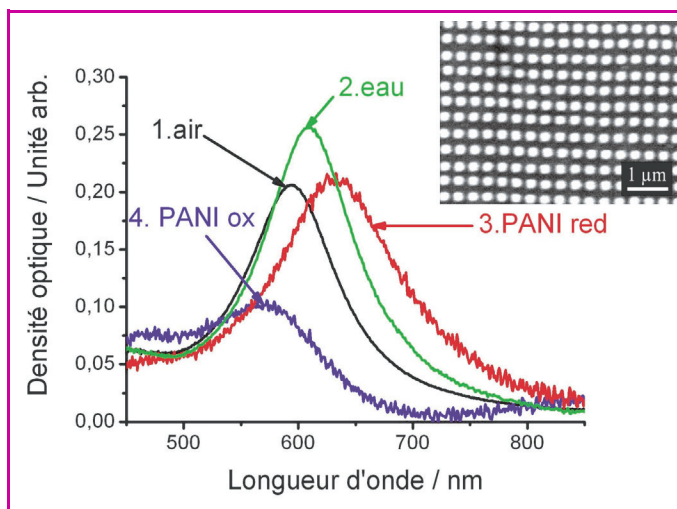


Figure 1 - Spectres d'extinction du réseau A (1) à l'air, (2) dans l'eau, (3) recouvert d'un film de PANI de 75 nm dans son état réduit, et (4) d'un film de PANI de 75 nm dans son état oxydé.

Réseau A : nanoparticules d'or sphériques de diamètre $d = 150$ nm, de hauteur $h = 40$ nm. Le pas de réseau (Λ) utilisé est de 220 nm selon les deux directions du plan, appelé X et Y. Encart : Image MEB du réseau A.

son état réduit (courbe 3), et dans son état oxydé (courbe 4). La variation de la constante diélectrique du milieu environnant les nanoparticules d'or entre l'air et l'eau doit engendrer une modulation de la résonance plasmon du réseau A (d'après la formule (1)). Effectivement, nous constatons un déplacement de la résonance plasmon du réseau A vers les plus grandes longueurs d'onde, lorsque la constante diélectrique du milieu environnant les nanoparticules augmente. Cette expérience témoin confirme le caractère très sensible de ce type de

réseau de nanoparticules d'or à leur environnement. Sur la *figure 1*, nous pouvons aussi observer que le dépôt d'un film d'épaisseur nanométrique (100 nm) de PANI dans son état réduit induit un déplacement supplémentaire vers les grandes longueurs d'onde de la résonance plasmon (courbe 3). Cette première constatation nous permet, entre autres, d'estimer la valeur de la fonction diélectrique de la PANI dans son état réduit à une valeur plus importante que celle de l'eau. Plus important, lorsque nous électro-commutons la PANI, de son état réduit à son état oxydé (courbe 4), nous observons un important déplacement hypsochrome (plus de 60 nm) de la résonance plasmon, en deçà de celle obtenue à l'air, ainsi qu'une importante décroissance de la densité optique et une diminution de la durée de vie de la résonance plasmon (élargissement à mi-hauteur du pic observé). Cet effet est totalement réversible et a pu être observé répétitivement plus d'une heure en électro-commutant le système plus de 360 fois [8]. Cette première expérience valide le concept utilisé ici pour moduler réversiblement la résonance plasmon d'un réseau de nanoparticules d'or, en utilisant les propriétés redox d'un film de polymère conducteur.

Simulation

En utilisant un modèle de particule simple, il nous est possible de modéliser qualitativement le comportement optique observé en *figure 1*. Comme noté auparavant, le déplacement bathochrome de la résonance plasmon entre la présence d'un film de PANI dans son état réduit et l'eau indique clairement que la fonction diélectrique de la PANI dans son état réduit est plus importante que la constante diélectrique de l'eau. À l'inverse, l'effet hypsochrome observé lors de la commutation de la PANI dans son état oxydé indique que la fonction diélectrique de celle-ci, dans son état oxydé, est inférieure à celle de l'air. Le modèle de particule simple utilisé ici nous permet de calculer le facteur de rendement d'extinction (Q_{ext}) de particules métalliques suivant leur nature et forme, mais surtout de la constante diélectrique du milieu environnant ces particules. La *figure 2*

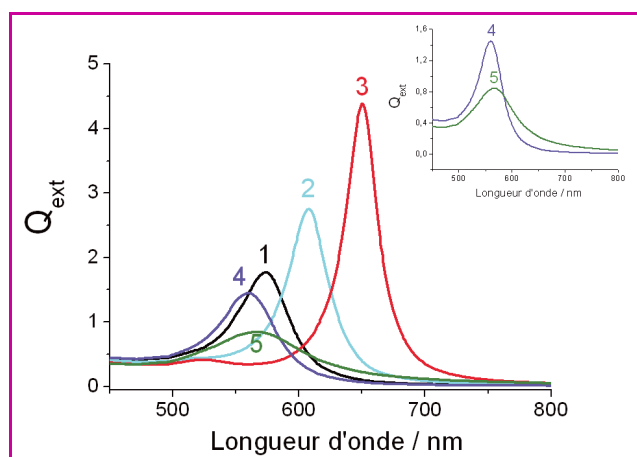


Figure 2 - Facteurs de rendement d'extinction calculés pour différentes valeurs de la constante diélectrique du milieu environnant les nanoparticules : 1) à l'air ($\epsilon_{\text{effec}} = 2,28$, courbe noire), 2) dans l'eau ($\epsilon_{\text{effec}} = 3,06$, courbe cyan), 3) recouvert d'un film de PANI dans son état réduit ($\epsilon_{\text{effec}} = 4$, courbe rouge), et 4) dans son état oxydé ($\epsilon_{\text{effec}} = 2$, courbe bleue et $\epsilon_{\text{effec}} = 2 + 0,5 i$, courbe verte).

Encart : agrandissement des courbes représentant la PANI dans son état oxydé, avec une fonction diélectrique complexe (courbe verte) ou réelle (courbe bleue).

présente les résultats qualitatifs obtenus avec ce modèle pour une nanoparticule d'or sphérique dans l'air (en utilisant une constante diélectrique effective prenant en compte le substrat d'ITO, courbe 1), dans l'eau (courbe 2), recouvert d'un film de PANI dans son état réduit (courbe 3) et dans son état oxydé (courbes 4 et 5).

Comme nous pouvons le voir sur la *figure 2*, la modulation obtenue avec ce système peut simplement s'expliquer par la variation de la fonction diélectrique de la PANI, lorsque celle-ci est électro-commutée de son état réduit à son état oxydé. Nous observons en même temps une diminution de la densité optique de la résonance plasmon dans ces conditions. L'encart de la *figure 2* présente l'effet induit par l'introduction d'une partie imaginaire dans la fonction diélectrique du milieu (fonction diélectrique complexe). Outre une diminution plus importante de la densité optique de la résonance plasmon, l'introduction d'une partie imaginaire engendre un élargissement à mi-hauteur de la résonance plasmon, c'est-à-dire une diminution de la durée de vie de la résonance plasmon comme observée dans la *figure 1*. L'observation d'une telle propriété est très intéressante. En effet, il serait alors possible d'obtenir une commutation totale et réversible de la résonance plasmon de particules métalliques si la partie imaginaire de la fonction diélectrique de leur milieu environnant était suffisamment importante pour que la durée de vie de ces plasmons soit quasi nulle. Dans la littérature, Baba *et al.* ont entrepris de déterminer expérimentalement les valeurs de la fonction diélectrique d'un film de PANI lorsque celui-ci passe de l'état réduit à l'état oxydé [9]. Deux observations principales ressortent de cette étude. La première est l'apparition d'une partie imaginaire dans la fonction diélectrique de la PANI lorsque celle-ci est dans son état oxydé et conducteur. La deuxième est que cette fonction diélectrique peut varier fortement en fonction de la longueur d'onde d'observation. Ainsi, selon la position de la bande plasmon étudiée, l'électro-commutation d'un film de PANI n'aura pas le même effet sur la modulation et/ou la commutation de celle-ci. La *figure 3* présente les facteurs de rendement d'extinction simulés en utilisant les valeurs de la fonction diélectrique de la PANI à deux longueurs d'onde différentes (632,8 et 1 152 nm) décrite par Baba *et al.* et en utilisant le modèle de particule simple, comme précédemment en *figure 2*.

Nous pouvons constater que pour un film de PANI donné, il est possible, suivant la longueur d'onde étudiée, d'obtenir soit une modulation soit une commutation de la résonance

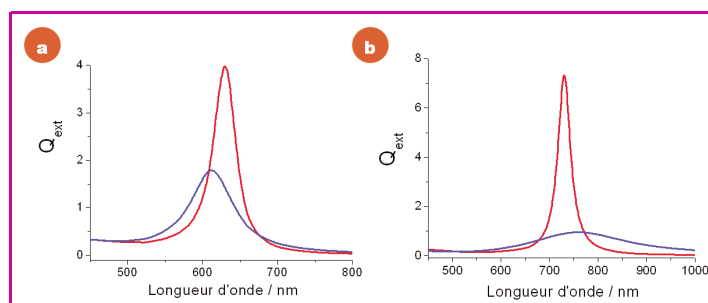


Figure 3 - Facteurs de rendement d'extinction calculés pour différentes valeurs de la fonction diélectrique de la PANI, a) sur un réseau virtuel de particules d'or présentant une résonance plasmon à 630 nm ($\epsilon_{\text{PANI red}} = 2$ et $\epsilon_{\text{PANI ox}} = 1,75 + 0,2 i$), et b) sur un réseau virtuel de particules d'or présentant une résonance plasmon à 740 nm ($\epsilon_{\text{PANI red}} = 2,05$ et $\epsilon_{\text{PANI rox}} = 2,2 + 0,9 i$).

Les valeurs de la fonction diélectrique de la PANI à différentes longueurs d'onde sont extraites des résultats présentés dans la référence [9].

plasmon. Comme mentionné précédemment, la position de la résonance plasmon de particules métalliques va être non seulement dépendante, pour un métal donné, du milieu environnant, mais aussi de la forme des nanoparticules (formule (1)). Ainsi, pour un réseau de nanoparticules d'or sphériques, nous obtenons une seule résonance plasmon. L'utilisation d'un réseau de nanoparticules d'or allongées va nous permettre d'obtenir deux résonances plasmons distinctes, une en polarisant la lumière selon le petit axe des particules et une selon le grand axe des particules. Nous obtenons donc un comportement anisotrope optique. En modulant la taille de ces particules allongées, il sera alors possible d'obtenir un réseau où l'effet de l'électrocommutation de la PANI ne sera pas le même du fait de la différence de longueur d'onde entre les deux résonances plasmons du même réseau de nanoparticules d'or allongées.

Réalisation d'un deuxième dispositif plasmonique : le commutateur plasmonique

La figure 4 présente les résultats obtenus sur un tel type de réseau (réseau B) ayant deux résonances plasmons distinctes suivant la polarisation de la lumière.

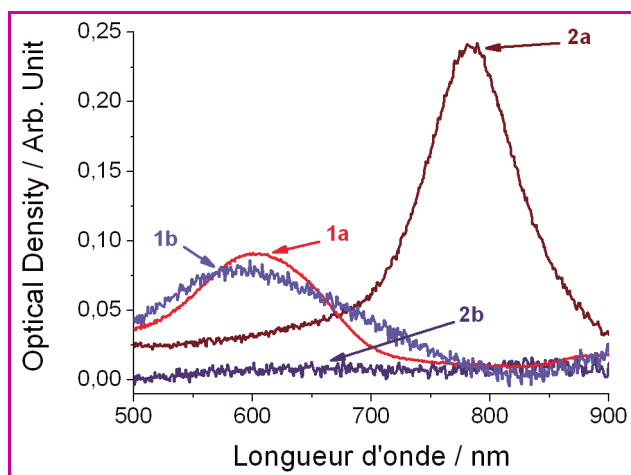


Figure 4 - Spectres d'extinction du réseau B avec une lumière polarisée suivant le petit axe (1) et le grand axe des particules (2) à l'air (a) et recouvert d'un film de PANI de 50 nm dans son état oxydé (b).

Réseau B : nanoparticules d'or allongées de hauteur $h = 40$ nm et de diamètre $2y = 280$ nm selon le grand axe des particules (axe Y) et $2x = 130$ nm selon le petit axe (axe X). Le pas de réseau est égal à 315 nm selon X et à 440 nm selon Y.

Une modulation (courbe 1b figure 4) de la résonance plasmon est obtenue lorsque la lumière est polarisée selon le petit axe des particules, mais on obtient une extinction totale (courbe 2b figure 4) lorsqu'elle est polarisée selon le grand axe des particules. Cet effet est réversible et a pu être observé pendant plus d'une heure d'électrocyclage [10].

Parallèlement aux résultats présentés ici, nous avons effectué une étude sur ces phénomènes de modulation et/ou commutation selon l'épaisseur de PANI déposée à la surface de réseaux de nanoparticules d'or [11]. Les résultats obtenus montrent que l'épaisseur du film de PANI contrôle

l'amplitude de la modulation de résonances plasmons de réseaux de nanoparticules d'or, mais permet aussi d'obtenir, pour un même réseau, soit un modulateur, soit un interrupteur de résonances plasmons. Une étude en potentiel nous a permis de mettre en évidence un contrôle progressif de la modulation de la résonance plasmon en fonction du potentiel appliqué au dispositif, c'est-à-dire en fonction du taux de dopage de la PANI. Il est alors possible de modifier avec précision les propriétés optiques de nanoparticules d'or en fonction du taux de dopage du polymère conducteur entourant les nanoparticules [11]. Enfin, des résultats similaires ont été obtenus en utilisant des colloïdes d'or déposés entre deux films nanométriques de polymère conducteur [12].

Conclusions et perspectives

La combinaison de polymères conducteurs et de nanoparticules d'or nous a permis de réaliser de nouveaux types de dispositifs plasmoniques actifs. Les propriétés redox de la PANI nous permettent de moduler et/ou commuter les propriétés optiques de nanoparticules d'or, sous forme colloïdale ou organisées en réseaux de nanoparticules lithographiées sur ITO. Il est alors possible, selon la forme des particules et leur organisation en réseaux, de réaliser des modulateurs et/ou des commutateurs plasmoniques réversibles. Le phénomène proposé, responsable de la différence de comportement observée sur les réseaux de nanoparticules d'or allongées, est basé sur la forte variation de la fonction diélectrique de la polyaniline à différentes longueurs d'onde. L'épaisseur du film de polyaniline est un autre moyen de contrôler les propriétés optiques de ces dispositifs, modulateur ou commutateur, ainsi que leur efficacité. Enfin, la commande extérieure nous permettant d'obtenir de telles propriétés optiques est le potentiel appliqué au système. Celui-ci permet de moduler et/ou commuter de façon progressive et réversible la résonance plasmon de surface localisée des réseaux de nanoparticules d'or utilisés. Des résultats similaires, en modulation, ont été obtenus sur des dispositifs à base de colloïdes d'or. Les perspectives liées à ce travail seraient l'utilisation d'autres polymères conducteurs, ainsi que l'étude du temps de commutation de ce type de dispositifs (forcement limité ici par les processus électrochimiques). Le concept développé ici est, selon nous, applicable à l'ensemble des dispositifs plasmoniques existant à l'heure actuelle. Les dispositifs plasmoniques développés par d'autres équipes comme des sources de lumière nanoscopique, des filtres ou encore des guides d'onde plasmonique sont une bonne représentation du type de dispositifs possible à améliorer. En effet, tous ces dispositifs innovants sont passifs (au sens électronique du terme). L'application de notre concept à ces dispositifs permettrait d'obtenir par exemple des routeurs d'onde plasmonique, en le couplant à des guides d'onde plasmonique, ou encore d'obtenir un interrupteur sur des filtres plasmoniques.

Les travaux présentés ici ont fait l'objet de citations dans trois brevets portant sur la réalisation de multiplexeur, de portes et de routeurs plasmoniques [13].

Des approches similaires mais couplant nanoparticules d'or et transistor plastique à effet de champ seront très certainement développées et devraient conduire à des dispositifs plasmoniques actifs tout solide.

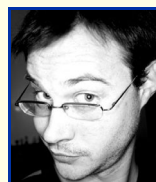
Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier tous les collaborateurs ayant participé activement à la réalisation de ces expériences et résultats, et plus particulièrement Nordin Felidj, Johan Grand, Georges Lévi, Jean Aubard pour toutes les intenses discussions sur ce sujet, ainsi que Joachim R. Krenn, Johan Grand et Andreas Hohenau pour la réalisation des réseaux de nanoparticules d'or. Les auteurs remercient également le Ministère de la Recherche, le programme de recherche ANR (ANR06BLAN0296), ainsi que le projet de service d'échange autrichien Amadée 8/2006 pour leur support financier.

Cet article a été écrit suite à l'obtention du **prix de thèse 2008 de la division Chimie physique** de la Société Chimique de France (DCP-SCF) par Yann Leroux. Sa thèse, intitulée « Électrochimie sur surfaces nanostructurées et nano-électrochimie : des dispositifs plasmoniques actifs aux contacts atomiques », décrit notamment l'étude et la conception de dispositifs plasmoniques actifs, basés sur l'utilisation des propriétés de commutation de polymères conducteurs, dont il est question dans cet article, ainsi que la réalisation de contacts atomiques par voie électrochimique et l'étude de l'adsorption moléculaire sur ce type de fils quantiques. Cette dernière partie ayant déjà fait l'objet d'un article dans *L'Actualité Chimique*, elle n'est pas traitée ici [14-15].

Références

- [1] Mangelney C., Lacroix J.-C., Chane-Ching K.I., Jouini M., Villain F., Ammar S., Jouini N., Lacaze P.-C., Conducting-polymer electrochemical switching as an easy means for control of the molecular properties of grafted transition metal complexes, *Chemistry-A European Journal*, **2001**, 7(23), p. 5029.
- [2] Haynes C.L., Van Duyne R.P., Dichroic optical properties of extended nanostructures fabricated using angle-resolved nanosphere lithography, *Nano Letters*, **2003**, 3(7), p. 939.
- [3] Barnes W.L., Dereux A., Ebbesen T.W., *Nature*, **2003**, 424, p. 824.
- [4] Lezec H.J., Degiron A., Devaux E., Linke R.A., Martin-Moreno L., Garcia-Vidal F.J., Ebbesen T.W., Beaming light from a subwavelength aperture, *Science*, **2002**, 297(5582), p. 820.
- [5] www.biacore.com
- [6] a) Lacroix J.-C., Diaz A.F., Electrolyte effects on the switching reaction of polyaniline, *J. Electrochem. Soc.*, **1988**, 135(6), p. 1457 ; b) Lacroix J.-C., Kanazawa K.K., Diaz A., Polyaniline: A very fast electrochromic material, *J. Electrochem. Soc.*, **1989**, 136(5), p. 1308.
- [7] Lamprecht B., Krenn J.R., Schider G., Dittlbacher H., Salerno M., Felidj N., Leitner A., Aussenegg F.R., Weeber J.C., Surface plasmon propagation in microscale metal stripes, *Applied Physics Letters*, **2001**, 79(1), p. 51.
- [8] Leroux Y.R., Lacroix J.-C., Chane-Ching K.I., Fave C., Felidj N., Lévi G., Aubard J., Krenn J.R., Hohenau A., Conducting polymer electrochemical switching as an easy means for designing active plasmonic devices, *J. Am. Chem. Soc.*, **2005**, 127(46), p. 16022.
- [9] Baba A., Tian S., Stefani F., Xia C., Wang Z., Advincula R.C., Johannsmann D., Knoll W., Electropolymerization and doping/dedoping properties of polyaniline thin films as studied by electrochemical-surface plasmon spectroscopy and by the quartz crystal microbalance, *J. Electrochem. Soc.*, **2004**, 151(1), p. 95.
- [10] Leroux Y., Lacroix J.-C., Fave C., Stockhausen V., Felidj N., Grand J., Hohenau A., Krenn J.R., Active plasmonic devices with anisotropic optical response: A step toward active polarizer, *Nano Letters*, **2009**, 9(5), p. 2144.
- [11] Leroux Y., Lacroix J.-C., Fave C., Trippé G., Felidj N., Aubard J., Hohenau A., Krenn J.R., Tunable electrochemical switch of the optical properties of metallic nanoparticles, *ACS Nano*, **2008**, 2(4), p. 728.
- [12] Leroux Y., Eang E., Fave C., Trippé G., Lacroix J.-C., Conducting polymer/gold nanoparticle hybrid materials: A step toward electroactive plasmonic devices, *Electrochemistry Communications*, **2007**, 9(6), p. 1258.
- [13] a) Hyde R.A., Jung E.K.Y., Myhrvold N.P., Pendry J.B., Tegreene C.T., Wood Jr. L.L., Plasmon multiplexing, U.S. **2009**, Cont.-in-part of Ser. No. US 2007-649710, filed on 4 Jan 2007, now patentedPat. CODEN: USXXAM US 7627206 B2 20091201 AN 2009:1499953 ; b) Hyde R.A., Jung E.K.Y., Myhrvold N.P., Pendry J.B., Tegreene C.T., Wood Jr. L.L., Plasmon gate, U.S. **2009**, Cont.-in-part of Ser. No. US 2007-649710, filed on 4 Jan 2007, now patentedPat. CODEN: USXXAM US 7542633 B2 20090602 AN 2009:668721 ; c) Hyde R.A., Jung E.K.Y., Myhrvold N.P., Pendry J.B., Tegreene C.T., Wood Jr. L.L., Plasmon router, U.S. **2009**, Cont.-in-part of US Ser. No. 649,710. CODEN: USXXAM US 7505649 B2 20090317 CAN 150:317309 AN 2009:332226.
- [14] Leroux Y.R., Fave C., Zigah D., Trippé-Allard G., Lacroix J.-C., Contacts atomiques par voie électrochimique en milieu eau/cyclodextrine : un pas vers des contacts atomiques encapsulés, *L'Act. Chim.*, **2008**, 320-321, p. 83.
- [15] Leroux Y.R., Fave C., Zigah D., Trippé-Allard 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.



Y. Leroux



C. Fave



G. Trippé

Yann Leroux (auteur correspondant) est chargé de recherche au CNRS au Laboratoire de Matière condensée et Systèmes Electroactifs (MaCSE) de Rennes*. Il a effectué sa thèse au laboratoire ITODYS** et a reçu le **prix de thèse de la division Chimie physique en 2008**.

Claire Fave est chargée de recherche au CNRS, **Gaëlle Trippé** est ingénieur d'étude au CNRS, et **Jean-Christophe Lacroix** est professeur, à l'ITODYS**, Université Paris 7-Denis Diderot.



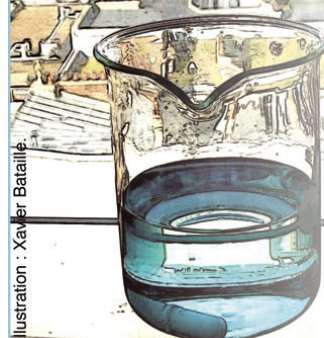
J.-C. Lacroix

* Laboratoire de Matière Condensée et Systèmes Electroactifs (MaCSE), Sciences Chimiques de Rennes, UMR 6226, Université de Rennes 1, Campus de Beaulieu, Bât. 10C, F-35042 Rennes Cedex.
Courriel : yann.leroux@univ-rennes1.fr

** ITODYS, Université Denis Diderot-Paris 7, Bâtiment Lavoisier, 15 rue Jean Antoine de Baif, F-75205 Paris Cedex 13.
Courriels : claire.fave@univ-paris-diderot.fr, trippe@univ-paris-diderot.fr, lacroix@univ-paris-diderot.fr

Ressources nationales de chimie

www.educnet.education.fr/rnchimie



RNChimie (Ressources nationales de chimie) est un site destiné aux enseignants des lycées généraux et technologiques, des BTS et des CPGE. Vous y trouverez plus de 600 protocoles de travaux pratiques, des recommandations pédagogiques, des cours, des exercices, des présentations sous forme de diaporamas téléchargeables, des fiches techniques de TP, des informations relatives à la sécurité mais aussi de l'histoire des sciences, des informations et des données sur les techniques spectroscopiques et chromatographiques dont des données expérimentales directement utilisables. Vous y trouverez également des cours, TD et applications sur les plans d'expérience (mathématiques), des cours et exercices de génie chimique, des exemples de TP basés sur la démarche d'investigation.

**RNChimie, c'est 600 pages web,
700 fichiers doc/zip, 930 documents pdf
et des dizaines de diaporamas à votre disposition !**