

Session Posters

N°	prenom	Nom	Titre
1	^Abdelhaq	Boumaarouf	Highly sensitive NbN functionalized probe for Scanning Thermal Microscopy (SThM)
2	Joao-Lucas	Rangel Silva	Two dynamic modes to simplify challenging AFM measurements
3	*Anissa	Aït Ouailal	Indentation AFM cyclique pour l'étude du couplage mécano-métabolique dans des cellules musculaires humaines
4	Elizabeth	Boer-Duchemin	Quoi doit-on prendre en considération si l'on veut mesurer la résonance plasmonique d'une nanoparticule avec un microscope à sonde locale ?
5	Van	Phan	Sensibilité en profondeur photo-thermique avec le mode Force Volume de l'AFM-IR « Vers une reconstruction tomographique des matériaux extraterrestres »
6	*Pierre	Rodriguez	Caractérisation d'une nano-antenne GHz à partir d'un centre NV
8	João Paulo	Cosas Fernandes	A simulation of the effect of polymer blends' compositions and properties on the quantification of interphases
9	João Paulo	Cosas Fernandes	Post-consumer Recycled (PCR) PE, PP, and PET Blends Evaluated via AFM Quantitative Nanomechanics Mapping
10	^Gustavo	Ninho Campos	Nanoscale Chemical Mapping of Phase Separation in Carboxylated Rubber by AFM-IR
11	Rozenn	Gautheron-Bernard	Étude des propriétés électroniques des parois d'antiphase dans des films minces semiconducteurs III-V/Si par des techniques C-AFM et KPFM.
12	Denis	Mariolle	La coextrusion de polymères : vers un échantillon de référence pour les analyses mécaniques par AFM et la dissémination des bonnes pratiques de mesure
13	*Louis	Lerey	Investigations of magnetic textures in Fe ₃ GaTe ₂ ferromagnetic flakes with large perpendicular magnetic anisotropy
14	^Thomas	Jalabert	Etude de couches minces de Pb(Zr _{0.2} Ti _{0.8})O ₃ par Switching Spectroscopy Piezoresponse Force Microscopy en mode suivi de résonance
15	David	Albertini	Optical and thermal tracking of the insulator-to-metal transition within vanadium oxide-based memristors in operation
16	Lydia	Chibane	Métrieologie corrélative pour l'étude des propriétés physico-chimiques de l'oxyde de graphène au cours de sa réduction
17	*Cyril	De Sousa	Détermination des lois de comportement en frottement par l'étude de contacts oscillants
18	*Chantal	Hareau	Champs magnétiques induits optiquement dans des nanoantennes en Or via l'Effet Faraday Inverse
19	*Christian	Roubert	Spectroscopie d'injection et d'électroluminescence tunnel des couches épitaxiales de AlGaIn émettant dans le proche UV
20	Aimeric	Ouvrard	Ordered plasmonic nanoparticles in interaction with molecules
21	^Sarah	Douri	Paramètres influents la mesure de conductivité thermique par SThM sur un échantillon nanostructuré
22	Mathieu	Mivelle	Full control of the electric and magnetic light-matter interactions through a nanomirror on a near-field tip
23	^Pavel	Varlamov	Caractérisation par STM de nanoparticules plasmoniques chirales
24	^Louis	Thomas	Nano-Caractérisation avancée par microscopies à sonde locale
25	*Michael	Tzvetkov	Extraction de la Résistance de Contact Pointe-Cristal 2D en C-AFM

Session

26	*Keke	Yuan	Tip-Enhanced ultrafast vibrational spectroscopy at the nanoscale
27	Aissam	Airoudj	Nanoscale mechanical characterization of plasma polymer thin films by AFM: relationship between crosslinking and elastic modulus
28	Pascal	Chrétien	Échantillon de référence optimisé pour l'étalonnage de mesures de résistance électrique à l'échelle nanométrique
29	Tomaso	Zambelli	Establishing a force spectroscopy protocol with oil droplets as indentors
30	Dylan	Amelot	Reversible Patterning of Azobenzene Thin-Films by Focused Laser Scanning
31	Frederic	Dubreuil	De la lubrification particulière macroscopique à son investigation nanotribologique par AFM
32	Olivier	Pluchery	Caractérisation de la limite de résolution des modes électriques du KPFM
33	Lionel	Patrone	Bichromophores auto-assemblés en monocouches pour le contrôle des propriétés optoélectroniques aux interfaces
34	*Alexis	Fagundes	Exploring the quantum properties of spin defects in 2D semiconductors
35	Agnès	Piednoir	Mesure d'adhésion entre fibres de verre par spectroscopie de force
36	Renaud	Bachelot	Near-Field Optical Chirality on Achiral Gold Nanoparticles under Linear Polarization
37	Alistair	Rowe	La mise en évidence du rôle des défauts en V dans l'amélioration du rendement des diodes électroluminescentes vertes
38	David	Talaga	A TIR-Based Multimodal Nanoscopy Platform for Correlative Imaging of Single Nano-Objects
39	Bertrand	Kierren	Electron confinement in ultrathin films of Pb on Ag(111) and electron interferometry. Model and experiments.
40	Valeria	Sheina	Moire-trapped polarons in the type-II multiferroic NiBr ₂ monolayers

* Doctorantes et Doctorants, éligibles aux prix du meilleur poster

^ Post-doc, jeunes chercheuses, jeunes chercheurs, éligibles aux prix du meilleur poster

Highly sensitive NbN functionalized probe for Scanning Thermal Microscopy (SThM)

Abdelhaq BOUMAAROUF¹, Rahul Swami¹ Nicolas Paillet¹, Pierre Gasner¹, Gwénaëlle Julié¹, Séverine Gomès² & Olivier Bourgeois¹

¹Institut Néel, CNRS-Université Grenoble Alpes, 25 avenue des Martyrs, 38042 Grenoble, France

²CETHIL UMR5008, Univ Lyon, CNRS, INSA-Lyon, UCBL1, F-69621, Villeurbanne, France

The investigation of local thermal behavior and heat dissipation at specific sites, such as in nanostructure, electronic devices, and biomolecular structures (e.g. DNA), plays pivotal role in understanding their global and macroscopic thermal response, but remains insufficiently mature. Such investigations offer new strategies for improving reliability in electronic devices, and for the thermal management at the nanoscale, besides understanding of heat transport, local thermoelectric effects and thermal conductivity mapping.

In this regard, we introduce a novel approach for probing localized thermal properties by the thermal mode of Atomic Force Microscopy, known as scanning thermal microscopy (SThM). This thermal mode allows simultaneous measurement of the topography and mapping the thermal properties of materials at small length scales. In order to improve thermometric sensitivity, a resistive NbN (niobium nitride) thermometer is integrated at the apex of a SThM probe [1,2]. NbN exhibits low thermal conductivity and high temperature coefficient of resistance ($TCR \approx |5 \times 10^{-3}| K^{-1}$), about four times higher than classic probes such as platinum or palladium, providing highly thermal sensitivity for reliable and accurate SThM measurements [2].

The nanofabrication and integration of NbN thermometers on 3D commercial AFM tip have been optimized in clean room process at Institut Néel, leading to new generation of SThM probes for local thermal measurement[3]. The NbN thin films offer operation under cryogenics conditions to characterize advanced functional materials and devices down to low temperature (see figure 1.b) [4].

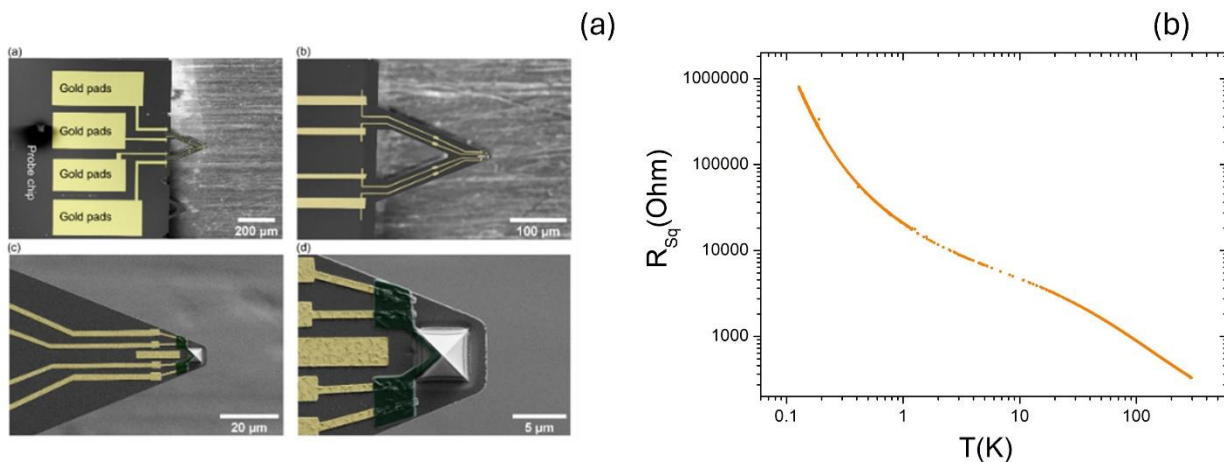


Figure 1 : (a) SEM image of an NbN (as depicted by green false color), integrated into an SThM probe (taken from [3]) . (b) Resistance per square versus temperature from room temperature down to 100 mK of NbN thin films.

References

- [1] O. Bourgeois, E. André, C. Macovei, et J. Chaussy, « Liquid nitrogen to room-temperature thermometry using niobium nitride thin films », *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 77, n° 12, p. 126108, déc. 2006, doi: 10.1063/1.2403934.
- [2] R. Swami *et al.*, « Experimental setup for thermal measurements at the nanoscale using a SThM probe with niobium nitride thermometer », *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 95, n° 5, p. 054904, mai 2024, doi: 10.1063/5.0203890.
- [3] R. Swami *et al.*, « Electron beam lithography on non-planar, suspended, 3D AFM cantilever for nanoscale thermal probing », *Nano Futur.*, vol. 6, n° 2, p. 025005, juin 2022, doi: 10.1088/2399-1984/ac7599.
- [4] T. Nguyen *et al.*, « Niobium Nitride Thin Films for Very Low Temperature Resistive Thermometry », *J. Low Temp. Phys.*, vol. 197, n° 5, p. 348-356, déc. 2019, doi: 10.1007/s10909-019-02222-6.

Two dynamic modes to simplify challenging AFM measurements

Joao-Lucas RANGEL¹, Alexei TEMIRYAZEV¹, Alice Fiocco¹, Marina TEMIRYAZEVA¹, Andrey KRAYEV²

¹ HORIBA France SAS, 14 bd Thomas Gobert, 91120 Palaiseau, France

² HORIBA Scientific, Novato, California 94949, USA

The quality of topographic images obtained using atomic force microscopy strongly depends on the accuracy of the choice of scanning parameters. This is quite complicated to do when working in semi-contact amplitude modulation mode (the most common one), since it requires optimizing many factors while finding the best compromise between them. To facilitate this task, we propose the introduction of two novel scanning techniques: Top (or vertical) mode and dissipation mode [1]. Apart from significantly simplifying and formalizing the imaging parameters choices, these two modes have the additional advantage of addressing a wide range of formerly challenging samples – from very rough ones, to molecular-size patterns.

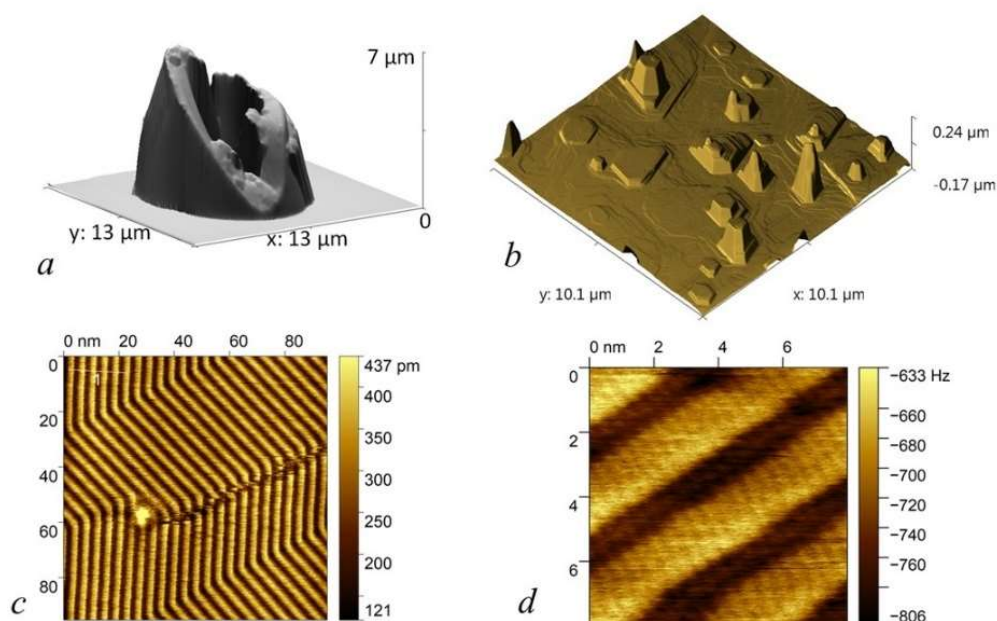


Figure: Top mode imaging (a,b): AFM images of the top of a broken micropipette (a) and the surface of bismuth telluride (b). Dissipation mode imaging (c,d): self-organization of palmityl palmitate on graphite.

More specifically, Top mode allows imaging samples with a high aspect ratio, such as objects with high vertical walls (Figure a) without artifacts caused by the tip parachuting and sticking. Since PID feedback is not used, no gain adjustments are needed. Also, the scanning is automatically adaptive, as the imaging rate depends on the surface's roughness. The amplitude can be kept low even for rough samples, thus making it possible to scan in net-attraction regime and to significantly reduce the contamination of the tip (which has negligible interactions with the sample). Last but not least, high quality images can be often obtained without performing post-processing corrections (Figure b).

On the other side, when the size of the features on the sample are smaller than the probe's radius of curvature, it is necessary to precisely adjust the interaction of the tip with the sample. This can be done with the use of the dissipation mode, which allows for a straightforward and accurate selection of the initial oscillation amplitude and the setpoint. These parameters are intrinsic related to the sharpness of the tip and therefore unique for each probe. Thanks to this mode, high resolution images could be obtained on molecular lamellar structures with a periodicity of 0.7 nm [2] (Figure c) and even on single molecular lamellae (Figure d).

References

- [1] Temiryazev A.G.; Krayev A.V.; Temiryazeva M.P. *Beilstein Journal of Nanotechnology* **2021**, *12*, 1226.
- [2] Temiryazev A.; Frolov A.; Temiryazeva M. *Carbon* **2019**, *143*, 30.

Indentation AFM cyclique pour l'étude du couplage mécano-métabolique dans des cellules musculaires humaines

Anissa AÏT OUAILAL, Guillaume LAMOUR

Université Paris-Saclay, Univ Evry, CY Cergy Paris Université, CNRS, LAMBE, Evry-Courcouronnes, France

Les cellules musculaires sont soumises à des sollicitations mécaniques répétées qui modulent leur organisation cytosquelettique et leur métabolisme. Si la rigidité cellulaire est classiquement mesurée par microscopie à force atomique (AFM) via des indentations ponctuelles, la réponse mécanique dynamique sous chargement cyclique reste peu caractérisée à l'échelle subcellulaire.

Nous étudions des cellules musculaires humaines portant une mutation de la desmine, filament intermédiaire spécifique du muscle jouant un rôle central dans l'intégrité structurale et la transmission des contraintes mécaniques. Un lien entre mutation de la desmine et dysfonctionnement mitochondrial dans les cellules musculaires cardiaques a été établi [1], suggérant une altération du couplage entre architecture cytosquelettique et fonction métabolique.

Nous faisons l'hypothèse que des indentations AFM cycliques perturbent davantage l'activité mitochondriale dans les cellules mutées. Une pointe sphérique impose des cycles d'indentation contrôlés [2], en faisant varier la fréquence, la durée de sollicitation ou encore le nombre de cycles. Les courbes force-distance sont ajustées à l'aide d'un modèle de Hertz modifié afin d'extraire l'évolution du module d'Young apparent au cours du temps.

En parallèle, l'état mitochondrial après stimulation mécanique est évalué par imagerie de fluorescence du potentiel de membrane mitochondriale. L'objectif est d'explorer l'existence d'un seuil mécanique associé à une altération fonctionnelle et d'identifier d'éventuelles corrélations entre paramètres mécaniques et réponse mitochondriale.

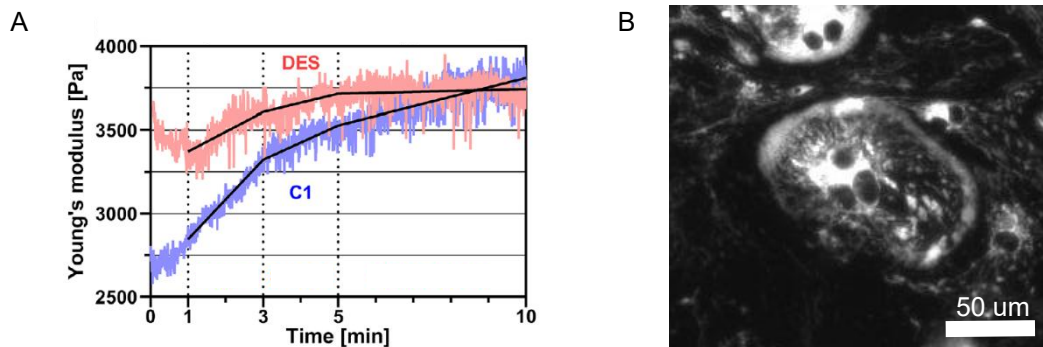


Figure 1 : (A) Rigidification locale de cellules musculaires saine (C1) et mutée (DES) en fonction du temps [2], (B) Cliché au microscope à fluorescence (bio-AFM) des mitochondries dans une cellule musculaire cardiaque (x10)

Références

- [1] Hovhannisyan et al. *Stem Cell Res Ther* (2024)
- [2] Crépin et al. *Small*. (2026)

Quoi doit-on prendre en considération si l'on veut mesurer la résonance plasmonique d'une nanoparticule avec un microscope à sonde locale ?

Mario ZAPATA-HERRERA², Benoît ROGEZ¹, Sylvie MARGUET³, Gérald DUJARDIN¹,
Elizabeth BOER-DUCHEMIN¹, Eric Le Moal¹

1. Université Paris-Saclay, CNRS, Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay, 91405 Orsay, France

2. Donostia International Physics Center (DIPC), Donostia-San Sebastián 20018, Spain

3. Université Paris-Saclay, CEA, CNRS, NIMBE, 91191 Gif-sur-Yvette, France

Alors que les plasmons polaritons de surface (SPP) sont le plus souvent excités par la lumière, une source électrique de SPP de taille nanométrique et à faible énergie est essentielle pour de nombreuses applications futures. Une possibilité prometteuse pour une telle source est une jonction tunnel polarisée, c'est-à-dire un « sandwich » métal-isolant-métal auquel une différence de potentiel a été appliquée. Dans une telle structure (qui peut également être formée entre la pointe d'un microscope à effet tunnel (STM) et une nanoparticule plasmonique), le courant tunnel inélastique excite les modes optiques de l'échantillon, y compris les SPP. Lorsqu'un microscope à effet tunnel est combiné avec un microscope optique inversé, les distributions spatiale, angulaire et énergétique de la lumière résultante peuvent être étudiées et analysées. À l'aide de ce dispositif expérimental, nous avons étudié l'excitation par jonction tunnel des lentilles et cristaux plasmoniques, des nanoparticules, des semi-conducteurs 2D et des empilements de couches minces [1-5].

Dans une étude récente, nous avons notamment utilisé la luminescence induite par STM combinée à la microscopie en champ sombre pour étudier les résonances plasmoniques des nanoparticules cubiques dans l'air [6]. Étonnamment, lorsque le courant tunnel est utilisé pour exciter les modes plasmoniques localisés de la nanoparticule, l'émission résultante est décalée en longueur d'onde par rapport à celle obtenue lorsque l'échantillon est excité optiquement (voir figure 1 ci-dessous). Une étude numérique minutieuse montre que ces décalages ne sont pas simplement le résultat de la présence de la pointe (non plasmonique), mais sont le résultat de l'existence d'un pont d'eau dans l'espace entre la pointe et l'échantillon et du fait que la nanoparticule est excitée dans le champ proche. Ces résultats montrent l'importance de prendre en compte les conditions ambiantes ainsi que la géométrie précise de l'excitation lorsque des jonctions à l'échelle nanométrique sont impliquées dans l'excitation de la luminescence plasmonique.

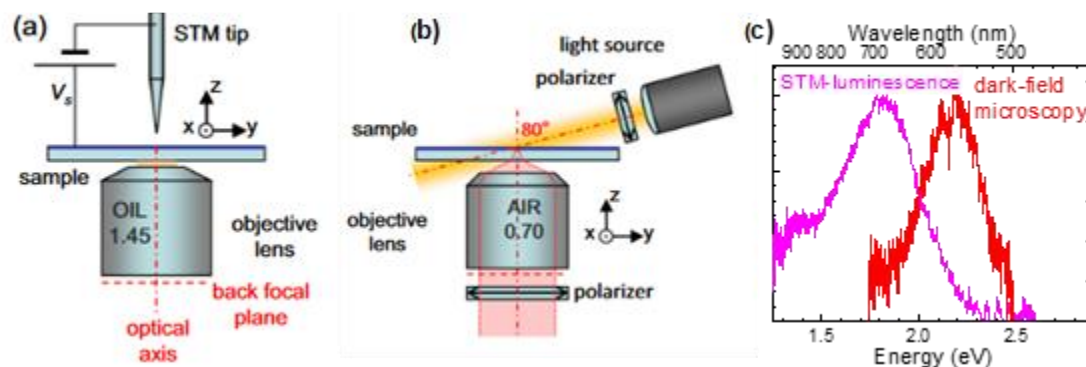


Figure 1 : Excitation STM et microscopie en champ sombre d'une nanoparticule plasmonique. (a) Schéma de l'expérience d'excitation STM. (b) Schéma de l'expérience de microscopie en champ sombre. (c) Résultat montrant le décalage net des spectres obtenus à partir des deux méthodes d'excitation différentes. Ce décalage est attribué 1) à la présence de la pointe, 2) au pont d'eau qui se forme entre la pointe STM et l'échantillon lorsqu'on travaille à l'air libre, 3) et au fait qu'on excite la nanoparticule en champ proche.

Références

- [1] Cao, S., Le Moal, E., Boer-Duchemin, E., Dujardin, G., Drezet, A., Huant, S. *Applied Physics Letters*, **2014**, *105*, 111103.
- [2] Cannesson, D., Le Moal, E., Cao, S., Quélin, X., Dallaporta, H., Dujardin, G., Boer-Duchemin, E., *Opt. Express*, **2016** *24*, 26186.
- [3] Pommier, D., Bretel, R., Parra López, L. E., Fabre, F., Mayne, A., Boer-Duchemin, E., Dujardin, G., Schull, G., Berciaud, S., Le Moal, E., *Phys. Rev. Lett.*, **2019**, *123*, 027402.
- [4] Cao, S., Zapata-Herrera, M., Campos, A., Le Moal, E., Marguet, S., Dujardin, G., Kociak, M., Aizpurua, J., Borisov, A. G., Boer-Duchemin, E., *ACS Photonics* **2020**, *7*, 1280.
- [5] Pommier, D., Hufschmitt, Z., Zhang, C., Lai, Y., Dujardin, G., Le Moal, E., Sauvan, C., Greffet, J.-J., Wang, J., Boer-Duchemin, E., *ACS Photonics* **2023**, *10*, 2641.
- [6] Zapata-Herrera, M., Rogez, B., Marguet, S., Dujardin, G., Boer-Duchemin, E., Le Moal, E. *Phys Rev B* **2024**, *109*, 155433.

Sensibilité en profondeur photo-thermique avec le mode Force Volume de l'AFM-IR

« Vers une reconstruction tomographique des matériaux extraterrestres »

Van PHAN¹, Julien ROJAS², Jérémie MATHURIN², Olivier SUBLEMONTIER³, Emmanuel DARTOIS¹, Cécile ENGRAND⁴, Ariane DENISET-BESSEAU², Alexandre DAZZI²

¹Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay – Université Paris-Saclay CNRS, 91400, Orsay, ²Institut de Chimie Physique – Université Paris-Saclay CNRS, 91400, Orsay, ³Université Paris-Saclay, CEA, CNRS, NIMBE, 91191, Gif sur Yvette, ⁴IJCLab, Université Paris-Saclay, CNRS, 91405 Orsay Cedex, France

Introduction. La microscopie à force atomique couplée à l'infrarouge photothermique (AFM-IR) permet une imagerie chimique et une spectroscopie sans marquage, avec une résolution latérale nanométrique, en combinant un microscope à force atomique avec un laser infrarouge pulsé et accordable. Cette technique est particulièrement adaptée à l'étude de la spéciation chimique dans des matériaux hétérogènes, tels que les composites organique-minéral, où les interactions moléculaires et l'organisation des phases se produisent à l'échelle nanométrique. Cependant, l'interprétation quantitative des données AFM-IR nécessite une compréhension détaillée de la profondeur effective de sonde dans les systèmes mixtes organique-minéral, comme par exemple rencontrés dans les météorites ou les particules de poussières extraterrestres [1], [2]. Les signaux AFM-IR résultent à la fois de contributions de surface et de subsurface, et sont influencés par plusieurs paramètres, incluant : la profondeur de pénétration, qui est dépendante de la fréquence; la longueur de diffusion thermique; les propriétés élasto-plastiques et l'amortissement mécanique [3]. Dans les échantillons chimiquement et mécaniquement hétérogènes, ces effets couplés peuvent limiter la localisation précise du signal. Le mode récent frequency-sweep force volume (FV) AFM-IR permet de surmonter en partie ces limitations en : réduisant les forces de cisaillement, corrigeant les effets liés à l'hétérogénéité mécanique, et permettant une analyse infrarouge sensible à la profondeur grâce à des mesures multifréquences [4].

Méthodes. Nous étudions de manière systématique la profondeur effective de sonde du mode FV AFM-IR dans des mélanges modèles organique-minéral, afin de quantifier l'influence des paramètres de composition et des propriétés physiques sur la réponse photothermique. Trois séries d'échantillons modèles ont été analysées : (i) un échantillon en biseau de polystyrène (PS) déposé sur un substrat de SiO₂, (ii) un dépôt de SiO₂ sur un substrat de PS, et (iii) des billes de SiO₂ dispersées dans une matrice de PS. Les échantillons ont été analysés à l'aide d'un microscope Dimension IconIR (Bruker), équipé d'un laser QCL (Daylight Solutions, 1860-757 cm⁻¹) d'un levier de type Y-shape (0.03 N/m, 13 kHz). Une série de cartographies infrarouges a été réalisée en mode FV, couvrant une gamme de fréquences comprise entre 10 et 3000 kHz, aux nombres d'onde 1600 cm⁻¹ et 1060-1000 cm⁻¹, correspondant respectivement aux vibrations aromatiques (liaisons C=C du polystyrène) et aux vibrations des silicates (élongations Si-O des silicates).

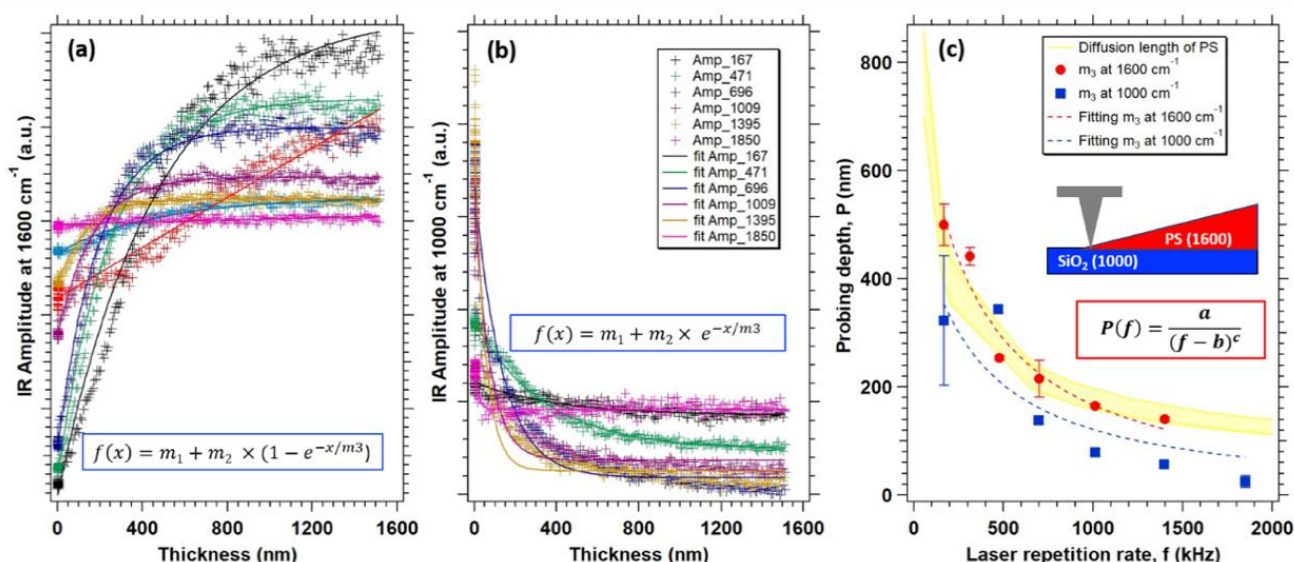


Figure 1 : Étalonage de la profondeur de sonde pour : (a) la bande caractéristique du PS, (b) la bande du SiO₂ sous-jacente au PS pour l'ensemble des fréquences de résonance, à partir d'un échantillon de type biseau de PS sur SiO₂, (c) l'évolution de la profondeur de sonde en fonction du taux de répétition du laser en mode FV AFM-IR.

Résultats et discussions. En combinant des mesures expérimentales FV AFM-IR avec des approches de modélisation théorique et numérique, nous identifions les paramètres clés contrôlant la sensibilité en profondeur et la génération du signal dans des systèmes hétérogènes. Ces résultats permettent d'établir un

cadre méthodologique pour calibrer la profondeur effective de sonde en imagerie FV AFM-IR en fonction du taux de répétition du laser (kHz) (Fig. 1), fournissant ainsi des lignes directrices pratiques pour une caractérisation chimique fiable aux interfaces organique-inorganique. Dans le modèle proposé, x désigne l'épaisseur locale de l'échantillon en biseau à la position de la pointe, et m_1 - m_3 représentent les paramètres d'ajustement, parmi lesquels m_3 correspond à la profondeur effective de sondage (nm)

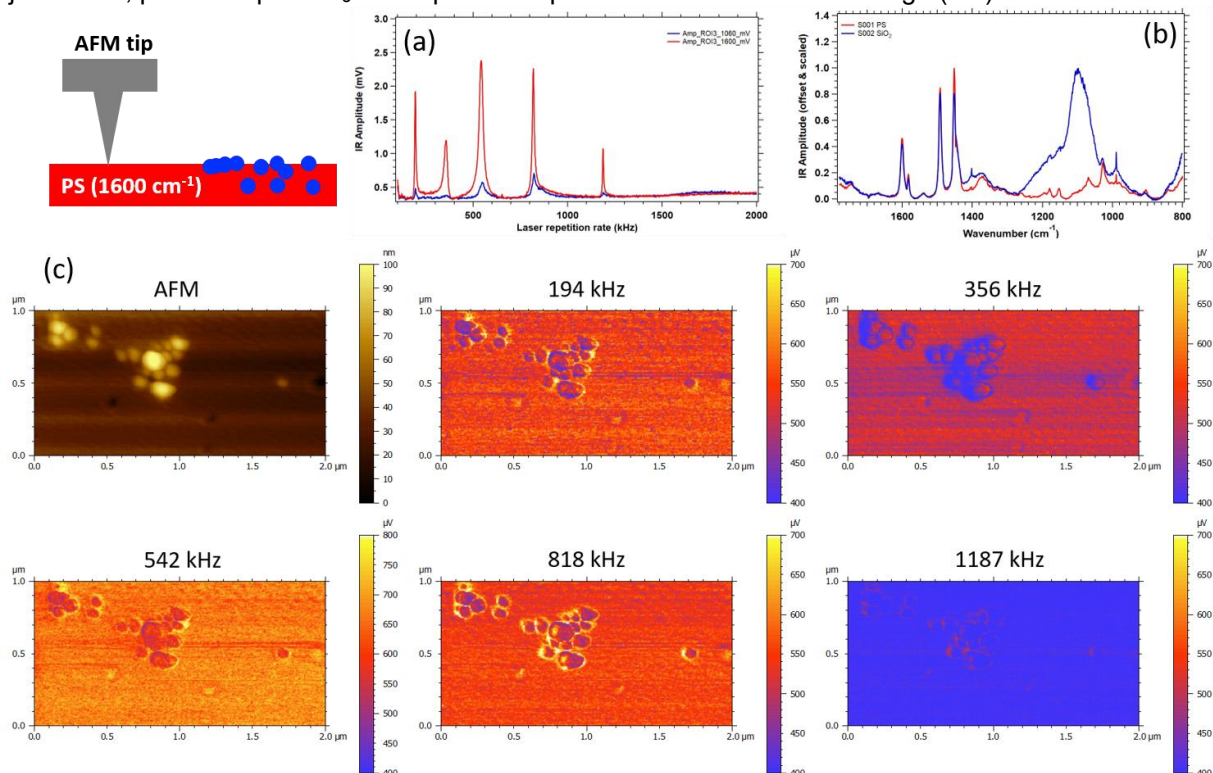


Figure 2 : Billes de SiO₂ dispersées dans une matrice de PS. (a) Profils fréquentiels mesurés sur le substrat de PS (rouge) à 1600 cm⁻¹ et sur les billes de SiO₂ (bleu) à 1060 cm⁻¹ ; (b) Spectres du substrat de PS (rouge) et des billes de SiO₂ (bleu) acquis en mode contact ; (c) Images AFM et cartographies chimiques des sphères de SiO₂ dans la matrice de PS, enregistrées à la bande aromatique du PS (1600 cm⁻¹), pour différents modes de résonance en fréquence FV dans la gamme 100–2000 kHz : 194 kHz, 356 kHz, 542 kHz, 818 kHz et 1187 kHz.

Par ailleurs, l'exploitation des données AFM-IR en régime multifréquence ouvre la voie à des reconstructions tridimensionnelles (3D) à l'échelle nanométrique, illustrées ici par l'imagerie de sphères de SiO₂ dispersées dans une matrice de polystyrène (Fig. 2). Les balayages fréquentiels (100–2000 kHz) et les spectres infrarouges associés permettent de distinguer clairement les signatures chimiques du SiO₂ (bande Si–O à 1060 cm⁻¹) et du PS (bandes à 1600, 1492 et 1450 cm⁻¹). Les cartographies chimiques acquises à 1600 cm⁻¹ révèlent un contraste marqué entre les deux phases, les sphères de SiO₂ présentant une faible absorption par rapport à la matrice de PS. L'évolution du contraste en fonction de la fréquence de résonance met en évidence une augmentation de la profondeur de détection, confirmant que le mode FV AFM-IR permet d'accéder à une information résolue en profondeur par modulation de la fréquence d'excitation.

Conclusions. Dans ce travail, nous avons développé une méthodologie robuste permettant d'étalonner la profondeur de sonde en mode FV AFM-IR, à partir de deux systèmes modèles complémentaires : un échantillon en biseau de PS sur un substrat de SiO₂ et un dépôt de SiO₂ sur un substrat de PS. Grâce à ces étalonnages, nous visons la reconstruction tomographique tridimensionnelle (3D) de sphères de SiO₂, afin de déterminer leur géométrie en subsurface au sein d'une matrice de PS. Une méthodologie dédiée à une reconstruction 3D complète est actuellement en cours de développement. Le principal avantage du mode FV AFM-IR réside dans sa capacité d'acquisition, qui permet de collecter simultanément des cartographies chimiques sur une large gamme de fréquences (0-3000 kHz) en mode balayage fréquentiel. Cette approche permet également de corriger des effets liés aux propriétés mécaniques contrastées des matériaux, tels que le PS (souple) et le SiO₂ (rigide), en prenant en compte la variation de la position des pics de résonance ainsi que des valeurs d'amortissement.

Références

- [1] V. T. H. Phan *et al.*, *Meteorit. Planet. Sci.*, pp. 1–19, 2024.
- [2] J. Mathurin *et al.*, *Astron. Astrophys.*, vol. 684, pp. 1–14, 2024.
- [3] A. Dazzi *et al.*, *Anal. Chem.*, 2024.
- [4] M. Wagner *et al.*, *ACS Nano*, vol. 19, pp. 18791–18803, 2025.

Caractérisation d'une nano-antenne GHz à partir d'un centre NV

Pierre Rodriguez, Mathieu Mivelle

Institut des NanoSciences de Paris, UMR 7588, CNRS, Sorbonne Université 75005, Paris

La miniaturisation croissante des dispositifs opérant dans le régime des micro-ondes (technologies quantiques, spintronique, télécommunications) exige le développement d'outils de caractérisation capables de sonder ces champs électromagnétiques avec une résolution spatiale nanométrique. À ces échelles, les techniques de mesure conventionnelles se heurtent à la limite de diffraction et à des effets de bord complexes à maîtriser.

Ce poster présente l'utilisation de la microscopie à champ proche équipée d'un centre NV (Nitrogen-Vacancy) du diamant comme solution de rupture pour cartographier le rayonnement micro-onde. Ce tour de force repose sur la technique de Résonance Magnétique Détectée Optiquement (ODMR). En exploitant la résonance de spin électronique du centre NV, naturellement située à 2,87 GHz (à champ magnétique nul), ce défaut ponctuel agit comme un capteur quantique ultrasensible. Plus précisément, l'application de séquences impulsionnelles permet de mesurer la fréquence des oscillations de Rabi du spin de l'électron. Cette méthode convertit l'amplitude locale du champ micro-onde en une variation de fluorescence mesurable optiquement de manière totalement non invasive.

En balayant le centre NV à proximité immédiate d'une surface structurée, nous démontrons la possibilité de cartographier localement l'intensité du champ micro-onde généré et d'en extraire la fréquence de résonance avec une résolution spatiale sub-longueur d'onde, dictée par la taille du défaut atomique et sa distance à l'échantillon.

Ces résultats soulignent le double rôle du centre NV : à la fois objet d'étude quantique fondamental et outil de métrologie de pointe. La capacité de sonder l'interaction ondes-matière à l'échelle nanométrique dans la bande des micro-ondes ouvre de nouvelles voies pour la conception, le diagnostic et l'optimisation des futures technologies GHz intégrées. ^[1]

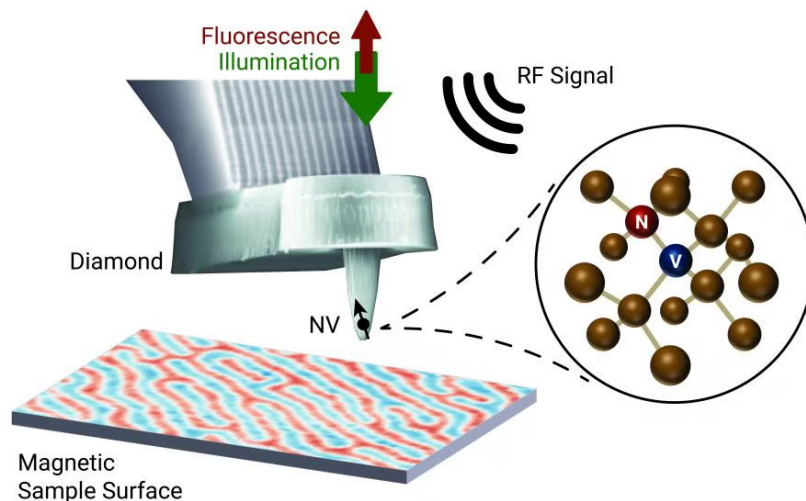


Figure 1: Microscope AFM à centre NV ^[2]

Références

1. Romana Schirhagl, Kevin Chang, Michael Loretz, Christian L. Degen, *The Annual Review of Physical Chemistry* **2014** Nitrogen-Vacancy Centers in Diamond: Nanoscale Sensors for Physics and Biology, 2014.
2. Qzabre, <https://www.qzabre.com/how-it-works> **2026** How it works, 2026.

A simulation of the effect of polymer blends' compositions and properties on the quantification of interphases

Yan FARIA GUIMARÃES SILVA¹, Marina EICHEMBERGER M. MERGULHÃO^{2,3}, Gustavo NINHO CAMPOS³, João Paulo COSAS FERNANDES³

¹Univ. Grenoble Alpes, CEA, CNRS, IRIG-SyMMES, F-38000, Grenoble, France

²Federal University of São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo 13565-905, Brazil

³Univ. Grenoble Alpes, CNRS, CERMAV, F-38000, Grenoble, France

The interphase in immiscible and partially miscible polymer blends plays a critical role in governing macroscopic mechanical performance, yet its quantitative determination remains strongly dependent on both material parameters and measurement methodology. In particular, nanomechanical mapping AFM is widely used to probe local modulus distributions, where the interphase fraction and thickness are frequently estimated from histograms[1,2] and line profiles of mechanical contrast [3–5]. However, the apparent interphase fraction extracted from such histograms does not only reflect intrinsic thermodynamic interdiffusion, but also depends on blend composition, domain size, modulus mismatch, and instrumental convolution effects.

In this work, we develop a simplified numerical simulation to systematically investigate how polymer blend composition and phase-specific properties influence the quantification of interphases derived from AFM nanomechanical histograms. In an initial approach, the model describes two-phase systems with tunable composition, mechanical properties, and controlled interphase volume fraction and mechanical gradients. By varying these parameters, we generated synthetic nanomechanical maps and corresponding modulus histograms that mimic AFM nanomechanical measurements. The simulated datasets allow us to decouple intrinsic interphase characteristics from measurement-induced broadening and statistical overlap between phases.

We will discuss how reduced mechanical contrast between phases significantly complicates histogram-based phase separation, and how composition asymmetry strongly biases interphase quantification through statistical weighting effects. These findings highlight that histogram-derived interphase fractions are not purely material constants but convolution-dependent parameters that should be accounted for when performing such analyses. This study provides a quantitative framework to interpret AFM nanomechanical data in multiphase systems and establishes guidelines for more reliable interphase analysis in polymer/elastomer blends and nanostructured materials. Examples of real-case studies using elastomeric/polymeric blends will be presented.

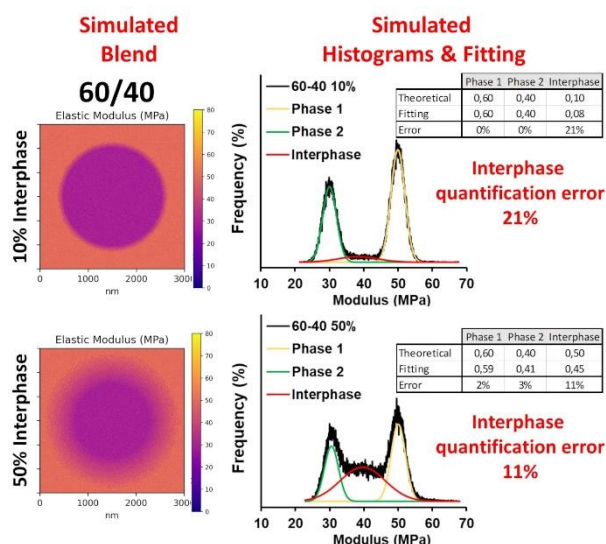


Figure 1 : Simulated nanomechanical maps and corresponding property histograms of a blend with 10% and 50% volume fraction of interphases.

Références

- [1] E. Ueda, K. Nakajima, *Nihon Reorji Gakkaishi* **2020**, *48*, 91.
- [2] X. Liang, K. Nakajima, *Macromolecules* **2022**, *55*, 6023.
- [3] B. Megevand, S. Pruvost, L.C. Lins, S. Livi, J.-F. Gerard, J. Duchet-Rumeau, *RSC Adv.* **2016**, *6*, 96421.
- [4] D. Wang, T.P. Russell, T. Nishi, K. Nakajima, *ACS Macro Lett.* **2013**, *2*, 757.
- [5] T.-T. Li, S.-B. Cheng, L.-F. Feng, X.-P. Gu, C.-L. Zhang, G.-H. Hu, *Chinese Journal of Polymer Science* **2022**, *40*, 421.

Post-consumer Recycled (PCR) PE, PP, and PET Blends Evaluated via AFM Quantitative Nanomechanics Mapping

Marina E. M. MERGULHÃO^{1,2}, Lucas Henrique STAFFA¹, João Paulo COSAS FERNANDES²

¹Federal University of São Carlos (UFSCar), São Carlos, São Paulo, 136565-905, Brazil

²Univ. Grenoble Alpes, CNRS, CERMAV, F-38000, Grenoble, France

The growing demand for circular economy strategies has intensified the recycling of post-consumer polymers such as polyethylene (PE), polypropylene (PP), and polyethylene terephthalate (PET). However, mechanical recycling of mixed plastic streams and multilayer films remains highly challenging due to the intrinsic immiscibility of these polymers, resulting in phase-separated morphologies and poor interfacial adhesion [1]. These incompatibilities significantly compromise mechanical performance and limit reuse applications, devaluing the post-consumer plastic waste. Therefore, efficient compatibilization strategies are essential to improve interfacial interactions and enable recovery of properties in recycled polymer blends. In this context, neoalkoxy titanates have been studied as an additive alternative for recycling and are expected to promote interfacial adhesion through proton-coordination mechanisms and to induce chain-reformation reactions during melt processing, making them attractive for the recovery of recycled and degraded post-consumer polymers [2, 3]. This study investigates the influence of a neoalkoxy titanate (LICA 12) on the compatibilization of post-consumer recycled (PCR) PE/PP/PET binary and ternary blends, as well as on recycled polymers alone. Additionally, the work evaluates the effect on the recovery and regeneration of properties degraded during thermo-mechanical processing cycles and environmental exposure, aiming to assess its potential as a multifunctional additive for recycled systems. The central objective of this study is to investigate the effect of the additive in each of the phases of the blend through nanomechanical measurements. Quantitative nanomechanics mappings via AFM enable probing the elastic modulus, adhesion, and deformation properties across different phases, providing direct insight into interphase formation and compatibilization efficiency [4]. Each polymeric phase can be identified by their modulus contrast, and the compatibilizer affinity can be inferred by understanding the phase-specific modulus evolutions within the complex system of recycled ternary blends [5]. By correlating nanomechanical mapping with morphological observations, this study seeks to elucidate the role of the neoalkoxy titanate in modifying the blend's phase dispersion, moduli gradient across interfaces, and other effects on the individual polymers.

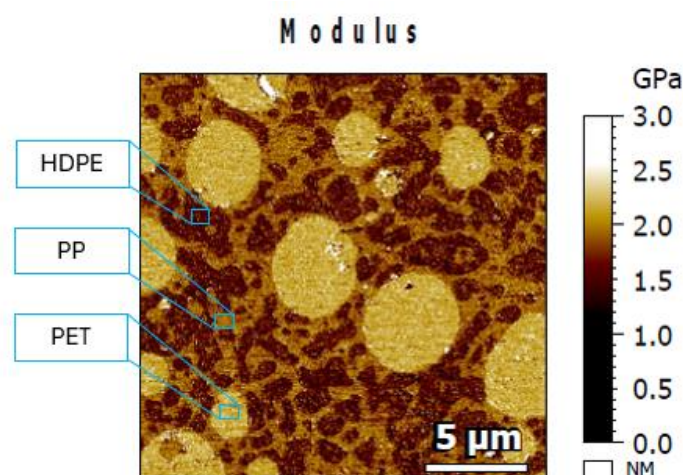


Figure 1: 10 x 10 μm^2 AFM image of the Modulus of a ternary blend PE/PP/PET.

Références

- [1] Ragaert, K. Delva, L.; Geem, K. V. *Waste Manag.* **2017**, 69, 24.
- [2] Monte, S. J. *Functional Fillers for Plastics* **2010**, 91.
- [3] Zamir, S. S. Fathi, B. *Elastomers Plast.* **2025**, 57, 1072.
- [4] Fernandes, J. P. C. Castro, L. D. C. Mareau, V. H. Pessan, L. A. Gonon, L. *Polymer* **2018**, 146, 151.
- [5] Li, H.-X.; Russell, T. P. Wang, D. *Chin. J. Polym. Sci.* **2021**, 39, 651.

Nanoscale Chemical Mapping of Phase Separation in Carboxylated Rubber by AFM-IR

Gustavo Ninho Campos^{1*}, João P. Cosas Fernandes^{1*}

¹Université Grenoble Alpes, CNRS, CERMAV, 601 Rue de la Chimie, Grenoble 38000 Cedex 9, France.

*Corresponding authors: gustavo.ninhocampos@cermav.cnrs.fr; joao.cosas@cermav.cnrs.fr

Carboxylated nitrile rubber (XNBR) is a terpolymer composed of acrylonitrile, butadiene, and acrylic acid, forming a versatile elastomer network combining ionic (ZnO-mediated) and covalent (sulfur) cross-links. Ionic cross-links form rigid domains that can reversibly soften at elevated temperatures, while covalent cross-links provide permanent network integrity and thermal stability. Understanding the nanoscale organization of these networks is essential for tailoring the macroscopic mechanical performance of XNBR. Atomic Force Microscopy (AFM) using the PinPoint mode for nanomechanical mapping revealed pronounced nanophase separation comprising a soft phase, a hard phase, and localized high-modulus domains. The local mechanical response of each phase is associated with differences in cross-linking mechanisms and monomer distribution. To further probe the chemical origin of this phase separation, AFM-IR with PiFM in homodyne detection (direct mode) was employed to spatially resolve the chemical composition at the nanoscale. Characteristic vibrational bands corresponding to butadiene (970 and 912 cm^{-1}), acrylonitrile (2235 cm^{-1}), and acrylic acid (1700–1730 cm^{-1} for COOH and 1580 cm^{-1} for COO⁻) were identified. The identification of each phase will be discussed, taking into consideration the presence of surface contaminants and mechanical cross-talk with the IR intensity. More broadly, this work discusses the potential and limitations of AFM-IR as a powerful yet underexplored tool for elucidating phase-specific chemistry in rubber materials, opening new opportunities to elucidate structure–property relationships in complex elastomer systems.

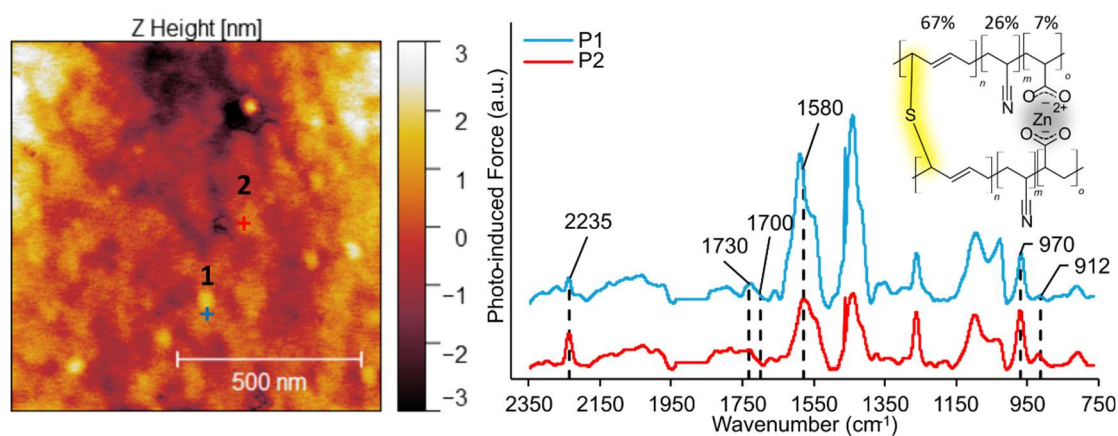


Figure 1: $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ height image with the points selected to obtain IR spectra of a sample of XNBR cured with zinc oxide. The spectra highlight the wavenumbers assigned to acrylonitrile (2235 cm^{-1}), acrylic acid (1700–1730 cm^{-1} for COOH and 1580 cm^{-1} for COO⁻), and butadiene (970 and 912 cm^{-1}).

Keyword: elastomer, carboxylated nitrile rubber, cross-linking, phase separation, AFM

Étude des propriétés électroniques des parois d'antiphase dans des films minces semiconducteurs III-V/Si par des techniques C-AFM et KPFM.

Rozenn Bernard¹, Michel Ramonda², Audrey Gilbert³, Tony Rohel¹, Julie Le Pouliquen¹, Gilles Patriarche⁴, Ludovic Largeau⁴, Nicolas Bertru¹, Jean-Baptiste Rodriguez³, Eric Tournié³, Yoan Léger¹, Charles Cornet¹

1 Institut FOTON, UMR 6082, CNRS, INSA Rennes, Univ Rennes, Rennes F-35000, France

2 CTM, Université de Montpellier, Montpellier F-34000, France

3 IES, UMR 5214, Université de Montpellier, CNRS, Montpellier F-34000, France

4 C2N, Université Paris Saclay, CNRS, UMR 9001, Palaiseau F-91120, France

L'épitaxie de semiconducteurs III-V sur substrat silicium induit la formation de défauts cristallins à l'interface III-V/Si, notamment des parois d'antiphase (APBs), qui se propagent dans la structure active et altèrent les performances des dispositifs (laser, cellule PV). Ces défauts, dont les propriétés physiques dépendent de leur nature, de leur symétrie et de leur orientation de propagation [1-2], peuvent agir comme des canaux conducteurs émergents. Bien que des travaux récents aient montré que leur formation et leur propagation soient liées aux conditions de l'épitaxie III-V et de la reconstruction de surface du substrat Si [3-6], leurs propriétés à l'échelle nanométrique restent peu explorées [7].

Dans cette étude, nous caractérisons les propriétés électroniques locales des APBs dans des films minces de GaP/Si et GaAs/Si élaborés par épitaxie par jets moléculaires (MBE), en utilisant deux techniques complémentaires de microscopie à force atomique à pointe conductrice (C-AFM) et de microscopie à sonde de Kelvin (KPFM). Afin de s'affranchir des effets de topographie de surface et d'oxydation, les échantillons sont analysés, sous atmosphère contrôlée, en vue plane en sortie d'épitaxie et après un procédé de polissage mécano-chimique (CMP).

Nos résultats mettent en évidence des hétérogénéités locales de conduction et de potentiel de surface au niveau des APBs, reflétant la nature et les propriétés spécifiques de ces parois par rapport au reste de la matrice III-V. De plus, nous démontrons que plusieurs types de parois peuvent coexister dans un même échantillon, et que leurs propriétés sont fortement influencées par les conditions de croissance du III-V et la préparation de surface du substrat Si.

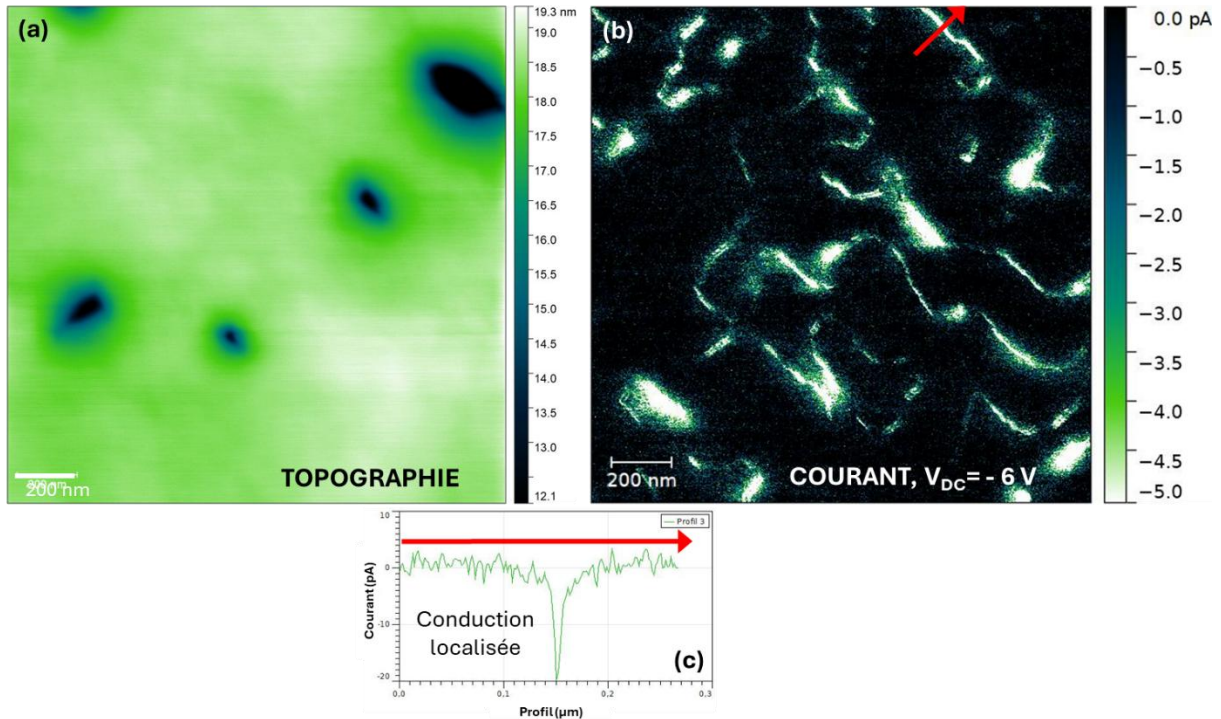


Figure 1 : Cartographies de la topographie (a) et du courant (b) mesurées, en vue de dessus, par AFM à pointe conductrice (C-AFM), avec une polarisation $V_{DC} = -6V$, sur une couche de GaP (500nm)/Si (100) - 1° off [110] polie par procédé mécano-chimique (CMP). (c) Profil du courant mesuré à travers une paroi d'antiphase (APB).

References:

- [1] L. Chen et al, *Adv. Sci.* **2022**, 9, 2101661
- [2] L. Chen et al, *Phys. Rev. B* **2022**, 106 (16), 165310
- [3] I. Lucci et al, *Phys. Rev. Mater.* **2018**, 2, 060401
- [4] C. Cornet et al, *Phys. Rev. Mater.* **2020**, 4, 053401
- [5] M. Rio Calvo et al, *Adv. Electr. Mater.* **2022**, 8, 2100777
- [6] A. Gilbert et al, *Adv. Opt. Mater.* **2023**, 11, 2203050
- [7] V. Iglesias et al, *Micro. Eng.* **2015**, 147, 31

La coextrusion de polymères : vers un échantillon de référence pour les analyses mécaniques par AFM et la dissémination des bonnes pratiques de mesure

Denis MARIOLLE¹, David ALBERTINI², Guillaume MIQUELARD-GARNIER³,
Pierre ALCOUFFE⁴, Yuliana PONOMARENKO⁵ & Florent DALMAS⁵

¹ Univ. Grenoble Alpes, CEA, Leti, F-38000 Grenoble, France. ² CNRS INL UMR 5270 69622 Villeurbanne

³ CNAM PIMM UMR 8006 75013 PARIS, ⁴ CNRS IMP UMR 5223 69621 Villeurbanne

⁵ MATEIS UMR 5510 69621 Villeurbanne

Quarante ans après la publication fondatrice de l'AFM [1] les techniques de microscopies en champ proche couvrent un très large spectre d'applications, de la biologie aux mesures en environnement les plus sévères. De nos jours, l'une des utilisations majeures de l'AFM est la mesure des propriétés mécaniques (élasticité, viscoélasticité, etc.) locales (à l'échelle de la pointe), notamment pour la matière « molle », du vivant [2] aux polymères [3].

Malgré tous les efforts liés aux développements instrumentaux [4] méthodologiques [5] et à la modélisation des expériences de champ proche [6], la quantification des propriétés mécaniques reste un sujet complexe, notamment par l'absence d'échantillons de référence adaptés à l'AFM (e.g. faible rugosité, innocuité de la préparation d'échantillon, contrôle du vieillissement) et aux propriétés macroscopiques connues avec précision.

Dans ce travail, initié dans le cadre du groupe de travail « Nano-mécanique » du Réseau des Microscopies à Sondes Locales (RéMiSoL), nous proposons l'utilisation d'un échantillon de polystyrène (PS) et de poly(méthacrylate de méthyle), PMMA, obtenu par coextrusion en multicouches [7] puis préparé par ultramicrotomie et reporté sur un substrat de silicium. Son module élastique à température ambiante est dans la gamme 1-5 GPa.

Les techniques mises en œuvre sont basées sur i) la nano-indentation AFM (en mode Force-Volume ou PeakForce Tapping) ii) la mesure de la résonance du levier au contact (CR-AFM) iii) la modulation de force au contact (nDMA-AFM). Du fait de l'écart entre les températures de transition vitreuse entre le PMMA ($T_g \sim 99^\circ\text{C}$) et le PS ($T_g \sim 104^\circ\text{C}$), cet échantillon est également un bon candidat pour les études en température compatibles avec l'AFM. Enfin, nous montrons que, par sa technique de fabrication exclusive, cet échantillon est également utile pour l'analyse (mesure et modélisation) des propriétés d'interface entre matériaux polymères ou d'autres technique de champ proche [8].

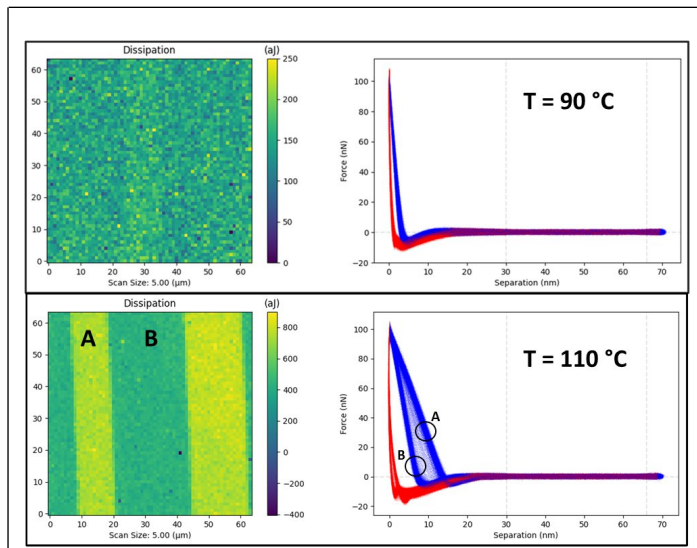


Figure 1 – Expériences de nano-indentation AFM (force-volume) sur un AFM Bruker Dimension ICON (@CEA-LETI) – pointe Nanotools biosphere™ B30-NCH ($k = 26\text{ N/m}$; $R = 32\text{ nm}$). Cartographie de 64 pixels * 64 pixels ($5\ \mu\text{m} * 5\ \mu\text{m}$). Force de consigne, $F = 100\text{ nN}$. Le signal présenté ici est la dissipation d'énergie entre les courbes d'approche (en bleu) et de retrait (en rouge) à deux températures de chauffage de l'échantillon et de la pointe (90°C et 110°C).

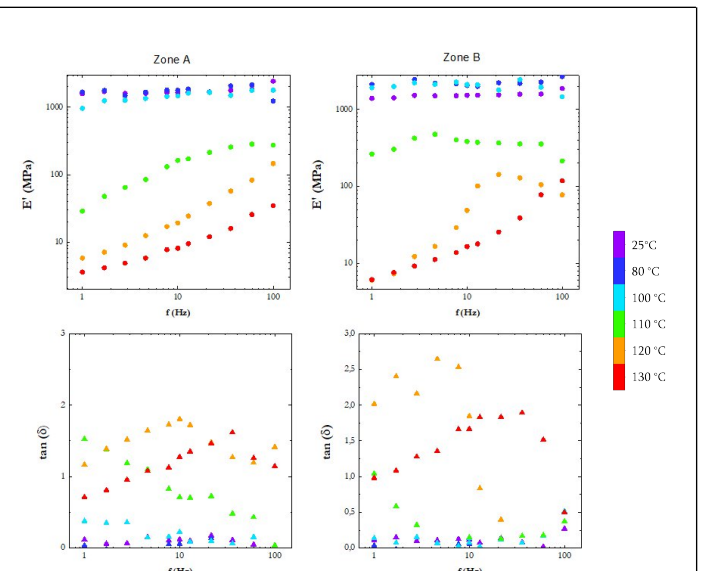


Figure 2 – Expériences de nDMA-AFM sur un AFM Bruker Dimension ICON (@CLyM) pointe Nanotools biosphere™ B30-FM ($k = 2.32\text{ N/m}$; $R = 30\text{ nm}$). Force statique : 15nN et Force dynamique : 2nN

[1] G. Binnig et al., PRL 56(9), 930-933 (1986) ; [2] W. Liang et al., Soft Matter 16, 8962-8984 (2020) ; [3] D. Wang et al., Macromolecules 51(1), 3-24 (2017) ; [4] A. Labuda et al. Patent EP4165418 (2020) ; [5] H. Schillers et al., Scientific Reports 7(1), 5117 (2017) ; [6] S.V. Kontomaris et al., Micron 155, 103228 (2022) ; [7] Bironeau, A. et al. Macromolecules, 50 (10), 2017, 4064-4073 [8] TechNote Bruker 2025 : <https://urls.fr/sPFIuT>

Investigations of magnetic textures in Fe₃GaTe₂ ferromagnetic flakes with large perpendicular magnetic anisotropy

Louis LEREY, Edgar QUERO, Joao SAMPAIO, Alexandra MOUGIN, Stanislas ROHART

Université Paris-Saclay, CNRS, Laboratoire de Physique des Solides, 91405 Orsay, France

A central challenge in spintronics is the realization of large-scale two-dimensional magnets combining strong spin-orbit coupling with robust magnetic order. Ferromagnetic van der Waals (vdW) materials have emerged as highly promising platform: their layered structure, held together by weak interlayer bonding, allows exfoliation down to few atomic layers while retaining flat, clean surfaces ideal for interfacial spintronic effects [1]. Within this family, Fe₃GaTe₂ (FGT) compound stands out for its elevated Curie temperature (~350K), metallic character, large magnetic anisotropy, and reports of chiral magnetic textures in similar compounds from the Fe_xGeTe₂ family [2,3,4], which are all key attributes for hosting domains and skyrmions for functional devices.

We are studying the magnetic and micromagnetic properties of FGT flakes, exfoliated from few atomic planes to several hundred nanometers, with the long-term goal of achieving electrical control of magnetic textures via spin-orbit torques. Specific objectives are to characterize the spontaneous magnetization and magnetic anisotropy as a function of thickness and temperature, to map and understand the domain structure and properties of these thin flakes, and to explore the stabilization of skyrmions through proximity with 5d transition metals or other vdW layers.

FGT flakes are produced by ultra-high vacuum mechanical exfoliation, yielding flakes with lateral dimensions of hundreds of micrometers and thicknesses spanning from one to hundreds of monolayers. Figure 1a shows at its center a 100 micrometers wide FGT flake with a thickness of 4.8 nanometers, surrounded by a 2 nanometers thick FGT area. Figure 1b is an atomic force microscopy (AFM) image showing the height of the step between the flake and the surrounding flake. Both optical and AFM images show that it is possible to obtain clean, thin and flat flakes on large surfaces.

Magneto-optical microscopy reveals a maze-like domain morphology, like shown on figure 1c, and its evolution with temperature and thickness. Domain size is observed to increase upon cooling, indicating an increase of domain-wall energy and magnetic anisotropy. These measurements will be extended and cross-validated with scanning NV-center magnetometry and magnetic force microscopy experiments, which give access to the spontaneous magnetization and probe with a better resolution the properties of the textures observed in the flakes.

This work is supported by projects ANR NEXT (ANR-23-CE09-0034) and PEPR SPIN (ANR-22-EXSP-0007).

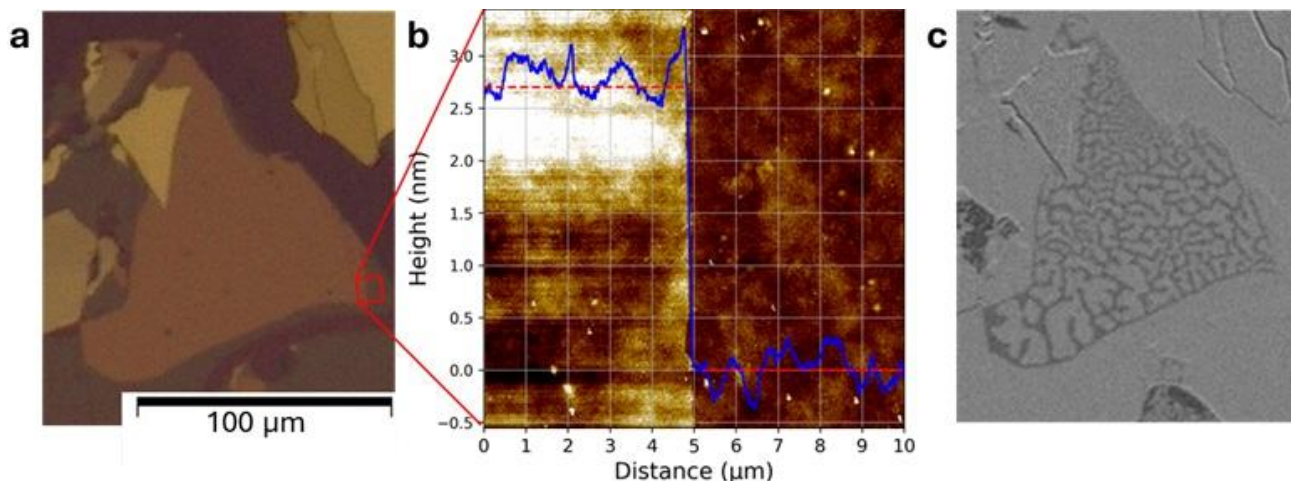


Figure 1 : (a) Optical, (b) AFM and (c) magneto-optical images of FGT flakes at room temperature. The AFM image reveals the height difference between two flakes.

Références

- [1] Gong, C.; Zhang, X. *Science* **2019**, *363*, 706
- [2] Zhu, J.; Janoschek, M.; Chaves, D.; Cezar, J.; Durankiewicz, T.; Ronning, F.; Sassa, Y.; Mansson, M.; Scott, L. *Phys. Rev. B* **2016**, *93*, 144404
- [3] Shinwari, T.; Khan, K.; Lv, H.; Kassa, A.; Munnik, F.; Josephy, S.; Trampert, A.; Ukleev, V.; Luo, C.; Radu, F.; Herfort, J.; Hanke, M.; Lopes, J. *ACD Nano* **2025**, *16*, 37561
- [4] Sampaio, J.; Pascaud, A.; Quero, E.; Thiaville, A.; Polewczyk, V.; Marty, A.; Bonell, F.; & Mougin, A. *Nanoletters* **2025**, *25*, 14341

Etude de couches minces de $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3$ par Switching Spectroscopy Piezoresponse Force Microscopy en mode suivi de résonance

Thomas JALABERT, Hugo VALLOIRE, Nicolas VAXELAIRE, Denis MARIOLLE, Łukasz BOROWIK

Univ. Grenoble Alpes, CEA, Leti, F-38000 Grenoble, France

La technique de Switching Spectroscopy Piezoresponse Force Microscopy (SSPFM) [1] constitue un outil de référence pour l'étude locale du basculement ferroélectrique à l'échelle nanométrique. Elle permet d'extraire des paramètres de commutation à partir de boucles d'hystérésis locales et d'accéder aux propriétés électromécaniques des couches minces ferroélectriques. Afin d'améliorer la sensibilité, des approches résonantes ont été développées, notamment celles reposant sur le balayage fréquentiel [2]. Toutefois, ces approches (SSPFM–Sweep) présentent plusieurs limitations : temps d'acquisition élevés, amplification du bruit pour des durées de segments courtes et manque de robustesse lié aux ajustements répétés du pic de résonance. Ces contraintes restreignent fortement les expériences de cartographie à grande échelle.

Dans ce travail, nous implémentons un mode SSPFM couplé au suivi de résonance bi-fréquence (Dual-Frequency Resonance Tracking, DFRT) [3], appliqué ici à la spectroscopie de commutation (SSPFM–DFRT). Le principe consiste à verrouiller en temps réel la fréquence d'excitation sur la fréquence de résonance de contact pendant la spectroscopie afin de compenser dynamiquement les dérives de résonance.

Les performances du mode SSPFM–DFRT ont été évaluées sur une couche mince ferroélectrique de $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8})\text{O}_3$ (100 nm) par comparaison avec les modes classiques à fréquence fixe SSPFM–Fixed et à balayage SSPFM–Sweep. Des boucles d'hystérésis locales ont été acquises pour des durées d'impulsions comprises entre 1 et 100 ms. Pour des durées inférieures à 5 ms, le mode SSPFM–Sweep présente une forte amplification du bruit de phase, des artefacts d'inversion et une augmentation des instabilités d'ajustement de la résonance [2]. À l'inverse, les modes SSPFM–Fixed et SSPFM–DFRT conservent un faible niveau de bruit, tandis que le suivi DFRT compense efficacement les dérives de fréquence responsables d'une perte de répétabilité en mode fréquence fixe. Le temps de traitement nécessaire à la reconstruction des boucles est par ailleurs réduit d'un facteur 50 par rapport au mode balayage, du fait de l'absence d'ajustements répétés.

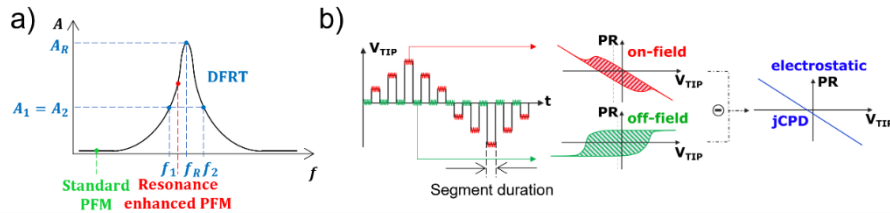


Figure 1 : (a) Principe des différents modes PFM : standard (hors résonance), resonance enhanced (fréquence fixée proche de la fréquence de résonance), SSPFM-sweep (acquisition de la courbe complète puis ajustement) et DFRT (l'amplitude des signaux aux fréquences $f_1 = f_R - f_0$ et $f_2 = f_R + f_0$ est maintenue égale pour suivre les variations temporelles de la fréquence de résonance). (b) Fonctionnement du mode SSPFM : en plus du signal utilisé pour mesurer la réponse piézoélectrique, des pulsations en tension permettent de polariser l'échantillon par incréments et de reconstruire la réponse hystérétique du matériau.

La pertinence du SSPFM–DFRT pour la cartographie a été démontrée sur une matrice de 50×30 points couvrant $3 \times 1,8 \mu\text{m}^2$ [4]. Une stratégie de traitement combinant réduction de dimension, classification non supervisée et ajustement quantitatif des boucles permet l'extraction robuste de plusieurs descripteurs ferroélectriques (fenêtre de piézoréponse rémanente, fenêtre coercitive, imprint, coefficients de commutation), dans l'esprit des approches quantitatives développées pour la SSPFM [5]. Les coefficients de détermination élevés ($r^2 \approx 0,98$ en moyenne) attestent de la stabilité des mesures et de la qualité des ajustements.

En conclusion, le mode SSPFM–DFRT constitue une approche robuste et rapide pour la cartographie spectroscopique ferroélectrique en microscopie à sonde locale. Bien qu'il nécessite une instrumentation plus avancée et une optimisation fine des paramètres de suivi, il offre un gain substantiel en stabilité, en performance bruit et en efficacité de traitement, ouvrant la voie à des études quantitatives et orientées données des propriétés ferroélectriques locales.

Références

- [1] Jesse, S.; Baddorf, A. P.; Kalinin, S. V. *Applied Physics Letters* **2006**, *88*, 062908.
- [2] Jesse, S.; Mirman, B.; Kalinin, S. V. *Applied Physics Letters* **2006**, *89*, 022906.
- [3] Rodriguez, B. J.; Callahan, C.; Kalinin, S. V.; Proksch, R. *Nanotechnology* **2007**, *18*, 475504.
- [4] Valloire, H.; Vaxelaire, N.; Jalabert, T.; Mariolle D.; Borowik, Ł. *Nanotechnology*, en révision
- [5] Valloire, H.; Quéméré, P.; Vaxelaire, N.; Kuentz, H.; Le Rhun, G.; Borowik, Ł. *Journal of Applied Physics* **2024**, *135*, 194101.

Optical and thermal tracking of the insulator-to-metal transition within vanadium oxide-based memristors in operation

Etienne Puyoo¹, David Albertini², Nicolas Baboux¹, Sanjoy K. Nandi³, Sujan K. Das³, and Robert G. Elliman³

¹INSA Lyon, CNRS, Ecole Centrale de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CPE Lyon, INL, UMR5270, Villeurbanne, 69622 France ²CNRS, INSA de Lyon Ecole Centrale de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CPE Lyon, INL, UMR5270, Villeurbanne, 69622 France ³Department of Electronic Materials Engineering, Research School of Physics, Australian National University, Canberra, Australian Capital Territory, 2601, Australia

Threshold switching devices based on Metal Oxide Metal junctions are good candidates for the development of high-density memory selectors, and are also being considered as a building block for the development of neuromorphic hardware architectures. Among the materials considered for this type of application, vanadium oxide seems particularly interesting, as its various phases feature insulator-to-metal transitions (IMT) favorable to the establishment of stable threshold switching. We will demonstrate through a first case study that the room temperature implementation of Scanning Thermal Microscopy (SThM) experiments coupled to optical micro-reflectivity imaging is well suited to track the IMT within V_3O_5 -based memristive devices [1,2]. The cross-analysis of SThM and micro-reflectivity images taken at different operating points enables us to observe the initiation of threshold switching well below the IMT. This result confirms a theory according to which the threshold switching is essentially attributed to the temperature dependence of the conductivity of the insulating phase of V_3O_5 , and not directly to the IMT [1,2]. Then, we will present recent results of temperature dependent micro-reflectivity measurements performed on VO_2 -based memristive devices whose operating principle also relies on electro-thermal effects. In particular, we will discuss through this second recent case study, how optical micro-reflectivity images can help to understand the threshold voltage variability of VO_2 -based devices.

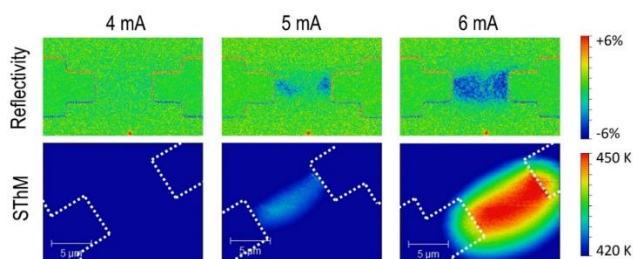


Figure 1: Comparison of optical micro-reflectivity and SThM images performed on a V_3O_5 -based threshold switching device in operation

Références

[1] SK Das, SK Nandi, CV Marquez, A Rúa, M Uenuma, E Puyoo, SK Nath, D Albertini, N Baboux, T Lu, Y Liu, T Haeger, R Heiderhoff, T Riedl, T Ratcliff, R G Elliman, "Physical Origin of Negative Differential Resistance in V_3O_5 and Its Application as a Solid-state Oscillator", *Advanced Materials*, 2208477 (2022). <https://doi.org/10.1002/adma.202208477>

[2] A Bonagiri, SK Das, CV Marquez, A Rúa, E Puyoo, SK Nath, D Albertini, N. Baboux, M. Uenuma, R. G. Elliman and S. K. Nandi, "Biorealistic neuronal temperature-sensitive dynamics within threshold switching memristors: toward neuromorphic thermosensation", *ACS Applied Materials & Interfaces* 16 (24), 31283-31293 (2024). <https://doi.org/10.1021/acsami.4c03803>

Métrieologie corrélative pour l'étude des propriétés physico-chimiques de l'oxyde de graphène au cours de sa réduction

Lydia Chibane^{1,2}, Alexandra Delvallée¹, Sarah Douri¹, Nolwenn Fleurence¹, José Morán-Meza¹, François Piquemal¹, Emmanuel Flahaut², Nicolas Feltin¹

1 Laboratoire National de métrologie et d'Essais (LNE), Trappes, France

2 Centre Inter-universitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux (CIRIMAT) UMR CNRS 5085, 118 Route de Narbonne, 31062 Toulouse

Depuis de nombreuses années maintenant, le matériau 2D le plus étudié est le graphène qui suscite l'intérêt et la curiosité des chercheurs (plus de 250 000 publications depuis 2000) de par ses propriétés exceptionnelles. Ce matériau est obtenu par différents procédés mais le moins coûteux et chronophage est la réduction d'oxyde de graphène (GO). Cependant, par ce moyen de fabrication, l'oxyde de graphène réduit (rGO) se distingue du graphène parfait et des propriétés physico-chimiques dégradées sont souvent observées. Un moyen de quantifier l'évolution des propriétés physico-chimiques au cours de la réduction serait l'observation d'un même objet au cours de sa réduction.

Néanmoins, il n'existe pas de technique unique permettant une caractérisation physico-chimique complète du graphène et des GRM (Graphene Related Materials). Chaque technique possède ses atouts et ses contraintes et ne fournit que des informations quantitatives d'un seul type de grandeur physico-chimique. La seule façon de surmonter ces limites sur un même objet et d'obtenir une fiche d'identité la plus exhaustive possible consiste à combiner différentes techniques. Les techniques de microscopie à sonde locale ont toutes leur place dans cette démarche.

Dans cette étude [1], nous proposons une caractérisation poussée du GO et du rGO à différentes étapes du processus de réduction. Une méthode de corrélation des techniques de microscopie/spectroscopie sur des particules individuelles est développée. Cette méthode consiste à analyser exactement la même particule de GO/rGO avec les différentes techniques afin de comprendre le lien entre les propriétés physico-chimiques de ce matériau, et éventuellement pouvoir les contrôler pour des applications spécifiques. Les techniques utilisées sont : l'AFM et ses techniques dérivées (microscopie thermique à balayage (S_{Th}M), microscopie micro-onde à balayage (S_{MM})), la microscopie électronique à balayage (SEM) et la spectroscopie/microscopie Raman (Figure 1).

Cette approche corrélative signifie que les limites de chaque technique doivent être prises en compte, par exemple lors du choix du substrat – qui doit alors convenir à toutes les méthodes employées. Pour chaque technique, les méthodes doivent être parfaitement adaptées afin de minimiser les dommages causés au matériau pendant l'analyse. Enfin, une stratégie doit être mise en place pour s'assurer que, lors de la microscopie corrélative, la localisation du matériau est aisée et que les techniques les moins invasives sont utilisées avant les plus invasives, afin d'éviter au maximum la dégradation du matériau durant l'étude.

L'objectif de cette communication est de montrer les stratégies utilisées pour obtenir les propriétés physico-chimiques d'une seule particule de GO/rGO avec l'approche de microscopie corrélative développée.

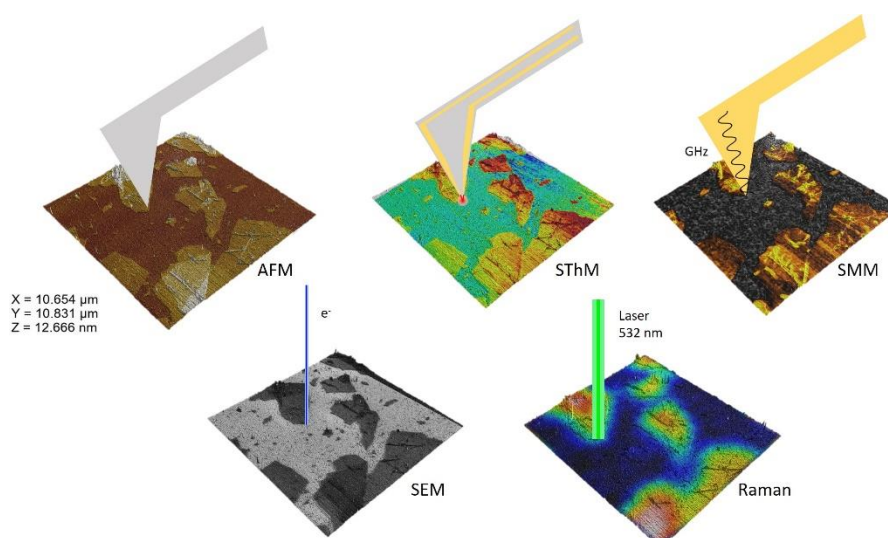


Figure 1 : Principe de la microscopie corrélative avec différents instruments (AFM, S_{Th}M, S_{MM}, SEM, Raman) sur des feuillets d'oxyde de graphène réduits.

Références

- [1] L. Chibane *et al.*, "Toward a Correlative Metrology Approach on the Same 2D Flake: Graphene Oxide Case Study—Sample Preparation and Stability Issues," *Nanomaterials*, vol. 15, no. 24, p. 1861, **Dec. 2025**, doi: 10.3390/nano15241861.

Détermination des lois de comportement en frottement par l'étude de contacts oscillants

Cyril DE SOUSA¹, Pierre Emmanuel MAZERAN¹, Olivier NOEL²

1. Université de Technologie de Compiègne, Roberval (Mécanique, énergie et électricité), Centre de recherche Royallieu - CS 60 319 - 60203, Compiègne Cedex, France
2. Institut des Molécules et Matériaux du Mans, Université du Maine, UMR CNRS 6283, Avenue Olivier Messiaen, Cedex 9, 72085 Le Mans, France

Au sein du laboratoire Roberval, nous cherchons à comprendre les mécanismes élémentaires responsables du frottement et notamment l'influence de l'adhésion et de la vitesse de glissement sur la force de frottement. Notre objectif est de décrire les éléments constitutifs permettant d'établir une loi générale du frottement à l'échelle nanoscopique. Pour ce faire, nous avons développé une plateforme unique de nanotribologie, utilisant un microscope à force atomique, transformé en nanotribomètre. Cette plateforme repose sur trois aspects originaux :

- Les forces latérales sont calibrées par la *wedge method* [1] à l'aide d'un calibre constitué de rainures en V [2].
- Le mode circulaire [3] qui combine un déplacement circulaire à haute fréquence avec un spectre de force normale, permettant la mesure instantanée de la loi de frottement et de la force d'adhésion.
- Le mode de mise en glissement (MEG) [4] repose sur un déplacement latéral oscillant d'amplitude croissante puis décroissante. À faible amplitude, le contact est cisailé, donnant accès au frottement statique et à son évolution avec le temps de repos. À grande amplitude, le contact entre en glissement et on peut observer l'effet de la vitesse sur la force de frottement et ainsi avoir accès aux éléments constitutifs du frottement *rate and state* [5].

Nous montrons que :

- 1- La force de frottement statique augmente de manière linéaire avec le logarithme du temps de repos [6],
- 2- La force de frottement dynamique peut être décomposée en deux composantes, une première indépendante de la vitesse et une seconde qui décroît de manière exponentielle avec la vitesse de glissement, mettant en évidence l'existence de deux coefficients de frottement jumeaux [6].

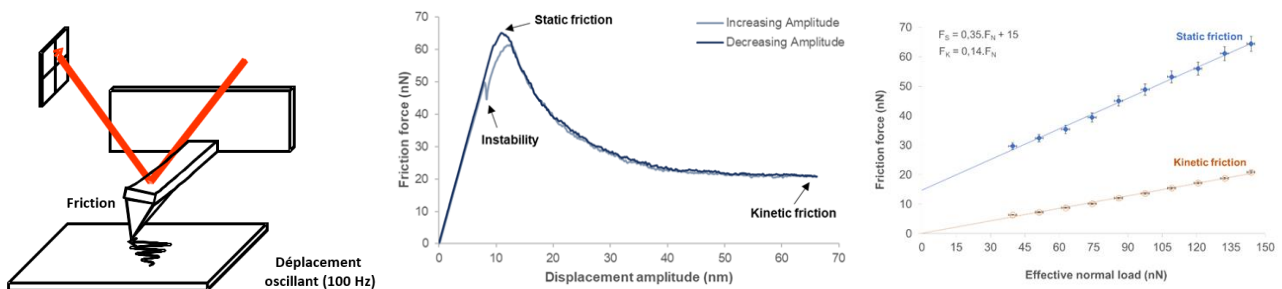


Figure 1: A gauche, schéma de l'expérience MEG ; au milieu : essai MEG, force de frottement en fonction de l'amplitude de déplacement ; à droite, force de frottement statique et dynamique en fonction de la force normale totale appliquée.

Références

- [1] Ogletree et al., Calibration of frictional forces in atomic force microscopy, Rev. Sci. Instrum. 67, 3298–3306 (1996).
- [2] Mazeran et al., Atomic Force Microscopy lateral force calibration using a V-shape scratch made by nanoindenter, accepté dans Review of Scientific Instruments (Janvier 2025).
- [3] Nasrallah et al., Circular mode: A new scanning probe microscopy method for investigating surface properties at constant and continuous scanning velocities. 82 (2011) 113703.
- [4] Mazeran, Beyaoui, Initiation of sliding of an elastic contact at a nanometer scale under a Scanning Force Microscope probe, 30-1 (2008) 1-11.
- [5] Dieterich, J. H. (1979); Ruina, A. (1983). *Rate- and state-dependent friction laws*.
- [6] De Sousa, Mazeran, Faissel, Noël, Rate-and-state friction laws at the nanoscale: Twin friction coefficients as revealed by oscillating contacts. À soumettre.

Champs magnétiques induits optiquement dans des nanoantennes en Or via l'Effet Faraday Inverse

Chantal Hareau, Romeo Zapata, Eric Charron, Maria Sanz-Paz, Mathieu Mivelle

Institut des NanoSciences de Paris, UMR 7588, CNRS, Sorbonne Université 75005, Paris

L'Effet Faraday Inverse est un phénomène magnéto-optique par lequel une lumière polarisée circulairement peut magnétiser la matière. En particulier, dans l'or, les électrons de conduction sont mis en mouvement circulaire par les forces non linéaires que la lumière exerce sur eux [1]. Ces courants induits dans les métaux offrent la possibilité de générer des champs magnétiques stationnaires par simple excitation optique. L'amplitude et la direction de ces champs magnétiques induits optiquement dépendent de l'amplitude du champ électrique optique dans le matériau, des gradients de champ et de la polarisation de la lumière.

C'est pourquoi les nanoantennes plasmoniques constituent un terrain d'expérimentation intéressant pour amplifier et manipuler les champs magnétiques en dessous de la limite de diffraction, ce qui est important pour les applications potentielles dans les technologies de stockage de données.

Des travaux récents de notre groupe ont décrit la théorie sous-jacente à la génération de ces courants de dérive dans les métaux, et plus particulièrement son application aux nanostructures plasmoniques à l'aide de simulations numériques. Ces travaux démontrent numériquement qu'une nano-antenne photonique en or, optimisée par des calculs FDTD, permet, sous forte puissance d'excitation, de maximiser les courants de dérive et de générer des champs magnétiques stationnaires de l'ordre du tesla à l'échelle nanométrique [2].

Cependant, très peu de données expérimentales permettent de comparer cette théorie, et une caractérisation complète des champs magnétiques induits optiquement reste à réaliser. Dans cette étude, nous caractérisons expérimentalement les propriétés spatiales de ces champs magnétiques par microscopie à force magnétique (MFM). Cette technique mesure les forces entre une sonde magnétique nanométrique et le champ magnétique de fuite de l'échantillon étudié, permettant d'imager en espace réel des champs magnétiques statiques. Nous avons caractérisé ces interactions de champ proche pour de nanostructures coaxiales sous excitation optique résonante. Ces expériences révèlent une caractéristique MFM liée à la présence de l'antenne lorsque celle-ci est excitée optiquement (Figure 1). Nos expériences sont un exemple de comment la MFM peut être adaptée à l'étude de systèmes magnétiques non conventionnels avec une résolution nanométrique.

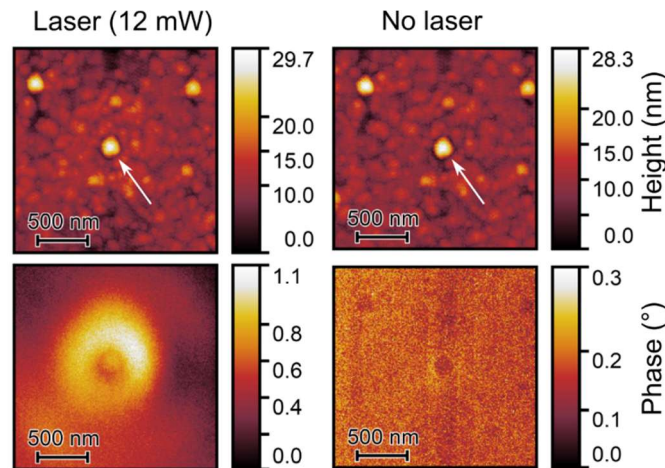


Figure 1 : Mesures MFM sur une nanoantenne coaxiale avec (gauche) et sans (droite) excitation optique par un laser. La flèche indique la position de la nanoantenne sur les images de topographie.

Références

- [1] Hertel, R. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **2006**, 301 (1), 2006, (L1)
- [2] Yang, X.; Mou, Y.; Gallas, B.; Maitre, A.; Coolen, L.; Mivelle M. *ACS Nano*, **2022**, 16 (1), (386)

Spectroscopie d'injection et d'électroluminescence tunnel des couches épitaxiales de AlGaIn émettant dans le proche UV

Christian ROUBERT¹, Natalia Alyabyeva¹, James S. Speck², Michael Wang², Alistair Rowe¹, Jacques Peretti¹

¹ Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, CNRS Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau, France

² Materials Department, University of California, Santa Barbara, California 93106, USA

Les dispositifs électroluminescents (LED) dans l'ultraviolet profond suscitent un intérêt croissant pour de multiples applications, notamment celles en lien avec la stérilisation [1]. En effet, leur taille compacte, leur durée de vie étendue, et leur fonctionnement respectueux de l'environnement font d'eux une alternative prometteuse aux lampes à mercure traditionnelles. Cependant, le rendement des LEDs UV est aujourd'hui faible, avec une efficacité « à la prise » (en anglais, « wall-plug efficiency ») maximum d'environ 8-10 % dans les LEDs à base des alliages AlGaIn [2]. Cette efficacité dépend de plusieurs processus, dont l'efficacité d'injection de charge dans les puits quantiques AlGaIn/GaN de la zone de charge d'espace de la LED, le rendement quantique interne (ou « internal quantum efficiency », IQE, en anglais) dans les puits quantiques, et l'efficacité d'extraction de la lumière (ou « Light extraction efficiency », LEE en anglais) vers l'extérieur de la LED. A l'état de l'art, le rendement quantique externe (dit EQE), le produit de IQE et LEE, n'atteint qu'environ 20 % [3].

Une étude très récente de photoluminescence résolue en temps [4] sur des couches épitaxiales de AlGaIn montre une émission de photons à environ 294 nm avec une IQE proche de 100 %. La clé de cette IQE inédite n'est pas encore claire mais semble être liée au désordre compositionnel. Plus spécifiquement, l'imagerie par microscopie électronique en transmission en champ sombre annulaire à grand angle (HAADF-TEM) montre la présence d'îlots bidimensionnels de AlGaIn légèrement moins riche en aluminium que l'alliage hôte. Ces îlots, orientés parallèlement aux plans cristallins (0001), sont épais de quelques couches atomiques avec des dimensions latérales de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres. De plus, ces îlots sont présents jusqu'à la surface de l'échantillon, ce qui ouvre la voie aux études de leur propriétés optoélectroniques par microscopie d'électroluminescence à effet tunnel (STLM en anglais), une approche par « sonde locale » récemment développée à l'Ecole Polytechnique [5,6].

Nous présenterons les premiers résultats de spectroscopie à effet tunnel et d'imagerie d'électroluminescence tunnel obtenus sur ces alliages AlGaIn et nous discuterons du rôle éventuel des îlots bidimensionnels à faible concentration en Al sur l'IQE associée à l'émission dans le proche UV.

Références

- [1] Muramoto, Y, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **2021**, 60, 090601.
- [2] Zhang, J., et al *Semicond. Sci. Technol.* **2022**, 37, 07LT01
- [3] Takano, T, et al., *Appl. Phys. Express* **2017**, 10, 031002
- [4] Marcinkevičius, S., et al., *unpublished* **2026**
- [5] Sauty, M., et al., *Phys. Status Solidi B* **2023**, 260, 2200365
- [6] Fornos, C., et al., *accepté Phys. Rev. Appl.* **2026** (arXiv:2508.18025v4[physics.app-ph])

Ordered plasmonic nanoparticles in interaction with molecules

Xingtong Li¹, Keke YUAN¹, Natalia ALYABYEVA^{1,†}, Serge Carrez¹, Céline DABLEMONT¹, Aude BAILLY², Rémi LAZZARI³, Alina VLAD⁴, Fabrice CHARRA⁵, Aimeric OUVRARD¹

¹ Université Paris-Saclay, CNRS, Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay, 91405, Orsay, France

² Institut Néel, CNRS, Université Grenoble Alpes et Grenoble INP, 25 Avenue des Martyrs, Grenoble, France

³ Institut des NanoSciences de Paris (INSP), CNRS / Sorbonne Université, 75252 Paris, France

⁴ Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers, 91190 Saint-Aubin, France

⁵ Service de Physique de l'État Condensé, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay, 91191 Gif sur Yvette, France

[†] Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, Ecole polytechnique, CNRS, IPP, 91120 Palaiseau, France

* Corresponding author: aimerico.ouvrard@cnrs.fr

Understanding the interaction of molecules with nanoparticles (NPs) is the key to control charge transfers for molecular electronics or energy production. The main difficulty lies in the need to probe at the scale of the individual molecule, otherwise having a system that is poorly dispersed in size to reduce the inhomogeneous broadening of the observables. In this context, we carry out ordered hybrid nano-assemblies where organic molecules functionalize metallic or plasmonic nanoparticles epitaxied on an alumina bilayer on Ni₃Al(111). Long-range ordered nano-assemblies reduce inhomogeneous broadening of observables allowing to directly comparing results from macroscopic tools with local probes. Here, we combine non-linear (SFG: sum frequency generation)/linear (SDRS: surface differential reflectance spectroscopy) spectroscopy and scanning tunneling microscopy (STM), to reveal structural, chemical and plasmonic properties as well as the impact of charge transfer in those hybrid assemblies [1-5].

The mechanical stress in the bilayer induced by the substrate periodically modulates the surface reactivity, which ensures the ordered growth of Pd metal clusters [1]. The correlation of geometry to the reactivity of long-range, narrow size distributed Pd NPs containing from few atoms to several hundred are revealed using CO molecule as a probe of the surface structure and compared to STM [2]. This nanostructured surface allows producing ordered assemblies of NP weakly coupled with organic molecules (perylene) [4]. By evaporating gold or silver on the Pd core, plasmonic properties arise above two atomic layer thick shell, giving an additional control of photophysical properties. Pd/Ag core/shell NPs show a better long-range ordering and a reduced atomic interdiffusion at the core-shell interface compared to Pd/Au NPs [3] leading to a stronger plasmonic response [5]. When fullerene is evaporated on NPs, we follow in real-time the strong change of optical, vibrational and plasmonic properties. These observations indicates a strong interaction between the NP and C₆₀, presumably a charge transfer from the NP to unoccupied C₆₀ molecular orbitals, leading to optical inactivity.

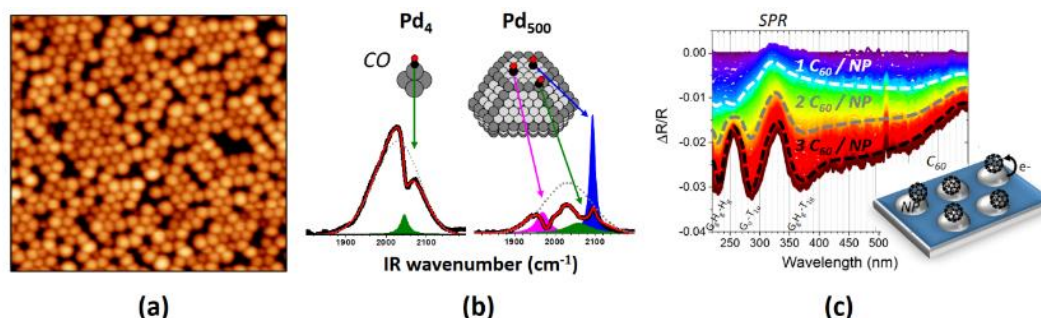


Figure 1: (a) STM image (120x120 nm²) of ordered Pd/Ag NP. (b) SFG spectra of fullerene binding to plasmonic NP. (c) UV/Vis reflectivity followed during C₆₀ growth on the NP, evidencing the mutual modification of plasmonic response and vibrational states.

However, ultrafast charge transfer dynamics cannot be investigated if molecule is inactive. Thus, we propose to decouple C₆₀ from NPs and modify the charge transfer by intercalating perylene in between. With a prior deposition of perylene on NP before C₆₀, we find that C₆₀ can indeed be decoupled from NPs with only 1 monolayer of perylene. Single C₆₀ molecule binding on perylene/NP becomes optically active. The decoupling is also confirmed by the insensitivity to photoinduced hot electrons in the NP in comparison to C₆₀ on Au(111) single crystal. This work paves the way for future assemblies, where charge transfer can be induced and followed in real-time at sub-ps timescale using ultrafast laser.

Références

- [1] N. Alyabyeva, A. Ouvrard, A.-M. Zakaria, F. Charra, B. Bourguignon, *Appl. Surf. Sci.*, 444, 423 (2018)
- [2] N. Alyabyeva, A. Ouvrard, A.-M. Zakaria, B. Bourguignon, *J. Phys. Chem. Lett.*, 10, 624 (2019)
- [3] A. Ouvrard, K. Yuan, X. Li, N. Alyabyeva, A.-M. Zakaria, R. Lazzari, B. Bourguignon, *J. Chem. Phys.* 161, 124713 (2024)
- [4] N. Alyabyeva, A. Ouvrard, R. Lazzari, B. Bourguignon, *J. Phys. Chem. C*, 123, 19175 (2019)
- [5] A. Bailly, N. Alyabyeva, X. Li, A. Vlad, R. Lazzari, A. Ouvrard (under preparation)

Paramètres influents la mesure de conductivité thermique par SThM sur un échantillon nanostructuré

Sarah DOURI*, Nolwenn FLEURENCE¹, Alexandra DELVALLEE¹, José MORAN-MEZA¹, Jacques HAMEURY¹, Nicolas FELTIN¹ and Bruno HAY¹

¹ Laboratoire National de métrologie et d'essais (LNE), 29 avenue Roger Hennequin, 78197 Trappes, France

La caractérisation des transports de chaleur à l'échelle nanométrique est essentielle pour le développement et la fiabilité des dispositifs électroniques récents [1], dont les dimensions caractéristiques deviennent comparables au libre parcours moyen des porteurs d'énergie. À ces échelles, les variations locales des propriétés thermiques ainsi que les effets d'interface influencent fortement les transferts de chaleur, mettant en défaut les modèles diffusifs classiques.

La microscopie thermique à balayage (Scanning Thermal Microscopy, SThM) permet d'étudier les propriétés thermiques locales aux échelles micro- et nanométriques [2]. Les mesures peuvent être réalisées dans différents environnements, tels que l'air et le vide, ce qui permet de distinguer les transferts thermiques au sein du matériau de ceux liés à l'environnement. À ce jour, la traçabilité des mesures de conductivité thermique réalisées à l'air par SThM a été établie pour des matériaux dont les dimensions caractéristiques sont supérieures au libre parcours moyen des porteurs d'énergie [2,3].

Dans ce travail, nous présentons une étude thermique expérimentale d'un échantillon nanostructuré à base de silicium à l'aide du SThM. L'échantillon étudié est constitué d'un substrat de silicium (Si) recouvert de couches de dioxyde de silicium (SiO₂) d'épaisseurs variables, sur lesquelles sont déposés des plots d'or (Au) de différents diamètres [4]. Les réponses thermiques de ces nanostructures ont été étudiées à l'aide d'une sonde thermo-résistive en palladium. Les mesures ont été réalisées à la fois à l'air ambiant et sous vide afin d'analyser l'influence des transferts thermiques environnementaux.

Comme illustré en Figure 1, des mesures SThM ont été effectuées afin de cartographier les contrastes locaux de conductivité thermique et d'évaluer la résolution thermo-spatiale latérale expérimentale.

Les résultats montrent que l'augmentation de l'épaisseur de SiO₂ conduit à des signaux thermiques se rapprochant de la réponse thermique du SiO₂ massif, traduisant une transition d'une dissipation thermique dominée par le substrat vers un comportement caractéristique de la couche d'oxyde. Par ailleurs, la résolution thermo-spatiale des cartographies thermiques dépend de la taille des plots d'or. L'analyse comparative des mesures réalisées à l'air ambiant et sous vide met en évidence une contribution significative des transferts thermiques avec l'environnement dans l'interaction thermique sonde-échantillon. Ceux-ci influencent à la fois le contraste quantitatif, la résolution thermo-spatiale latérale et, par conséquent, l'interprétation des résultats.

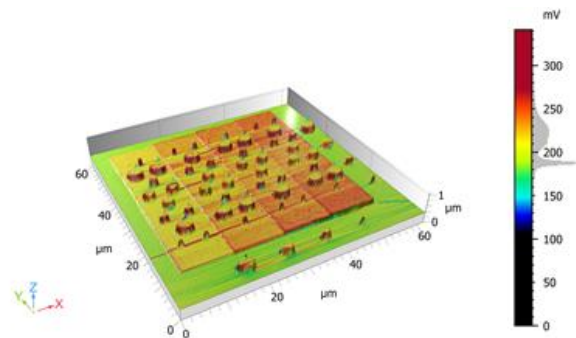


Figure 1 : Image de contraste thermique d'un échantillon nanostructuré composé de plots d'or déposés sur des marches de SiO₂ sur un substrat de silicium.

Références

- [1] Bhandari, P., Singh, J., Kumar, K., & Ranakoti, L. (2022). *Acta Innovations*.
- [2] N. Fleurence, S. Demeyer, A. Allard, S. Douri, and B. Hay, (2023) *Nanomaterials*, 13, 2424
- [3] A. Charvátová Campbell, P. Klapetek, R. Šlesinger, J. Martinek, V. Hortvík, V. Witkovský and G. (2025) *International Journal of Thermal Sciences*, 218, 110080.
- [4] Piquemal, F.; Morán-Meza, J.; Delvallée, A.; Richert, D.; Kaja, K. (2021) *Nanomaterials*, 11, 820.

Full control of the electric and magnetic light-matter interactions through a nanomirror on a near-field tip

Benoît REYNIER¹, Eric CHARRON¹, Obren MARKOVIC¹, Bruno GALLAS¹, Alban FERRIER², Sébastien BIDAULT³, Mathieu MIVELLE¹

¹Sorbonne Université, CNRS, Institut des NanoSciences de Paris, INSP, Paris, France

²Chimie ParisTech, PSL University, CNRS, Institut de Recherche de Chimie Paris, France

³Institut Langevin, ESPCI Paris, PSL University, 75005 Paris, France

Light-matter interactions are often considered to be mediated by the optical electric field only, discarding the optical magnetic field. Although interactions between light and magnetic dipole (MD) transitions are very weak, they can be studied in a certain class of materials. For instance, it was demonstrated that MD-emission in Eu^{3+} could be manipulated by tuning the local magnetic quantum environment using dielectric or plasmonic nano-structures [1,2]. As well, it is possible to manipulate the excitation of the ED and MD by controlling the electric and magnetic fields' spatial distribution [3,4].

Here, by manipulating the spatial distributions of the electric and magnetic optical fields and their local density of states, we report the selective excitation and emission control of ED and MD transitions in $\text{Y}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$ doped nanoparticle by generating a standing wave with a nanomirror.

Using a scanning near-field optical microscope (SNOM), a plasmonic nanomirror at the end of an optical fiber tip is placed on top of a Eu^{3+} doped Y_2O_3 nanoparticle (Figure 1). The 3D scanning properties of the SNOM allow to couple, in space, the electric and magnetic nodes and anti-nodes of the standing wave generated to the electric or magnetic transitions of the Eu^{3+} ions. By collecting luminescence, we imaged both electric and magnetic nodes and anti-nodes of a standing wave (Figure 2) with their associated local density of states and demonstrated an increase in the collected luminescence by magnetic excitation with respect to a far-field excitation. Finally, we demonstrated that we could also control the luminescence emission by manipulating the quantum environment solely through magnetic or electric excitation.

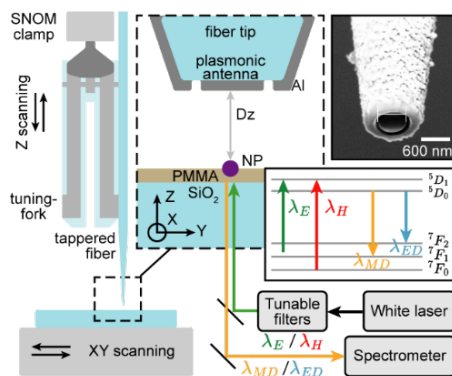


Figure 1: Schematic of the experimental set-up.

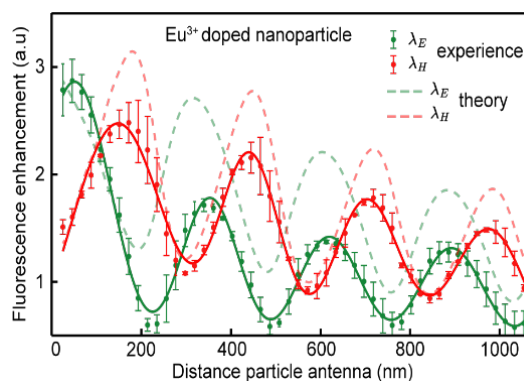


Figure 2: Luminescence enhancement of a nanoparticle excited at either λ_E or λ_H .

Références

- [1] M. Sanz-Paz et al. "Enhancing magnetic light emission with all-dielectric optical nanoantennas." *Nano Letters* 18, 3481-3487 (2018).
- [2] C. Ernandes et al. "Exploring the magnetic and electric side of light through plasmonic nanocavities." *Nano Letters* 18, 5098-5103 (2018).

Caractérisation par STM de nanoparticules plasmoniques chirales

Pavel VARLAMOV¹, Éric LE MOAL¹, Enrique GARCIA-CAUREL²,
Elizabeth BOER-DUCHEMIN¹

¹Université Paris-Saclay, CNRS, Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay, Orsay, France.

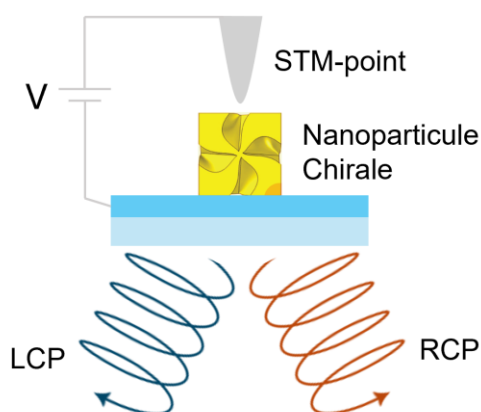
²École Polytechnique, LPICM, Route de Saclay, 91120 Palaiseau, France.

La chiralité est une propriété géométrique d'un objet qui ne peut pas être superposé à son image miroir. En optique, la chiralité d'un objet se manifeste par une interaction différente avec la lumière selon que celle-ci est polarisée circulairement droite ou gauche (RCP et LCP). Ces dernières années, un intérêt grandissant s'est porté sur l'étude de nanostructures plasmoniques de forme chirale. Grâce à des effets de confinement du champ électromagnétique à l'échelle nano, ce type de structure permet d'exalter de plusieurs ordres de grandeur la dépendance en polarisation circulaire droite/gauche des interactions lumière-matière [1, 2].

Une grande variété de méthodes de fabrication a été développée pour ces structures, notamment la lithographie, la synthèse chimique et l'écriture laser directe, conduisant à des morphologies diverses telles que des nanocubes, des nanofleurs et des nanofils en spirale. Cependant, l'étude de leur réponse chirale repose encore principalement sur des mesures optiques en champ lointain [1], dont la résolution spatiale est fondamentalement limitée par la diffraction de la lumière. La microscopie à effet tunnel (STM), en revanche, permet de dépasser cette limite grâce à une excitation électrique locale en champ proche [3].

L'excitation de nanostructures plasmoniques par STM repose sur le courant tunnel inélastique d'électrons de basse énergie entre la pointe du STM et l'échantillon, capable d'exciter les modes optiques de l'échantillon. La relaxation des modes optiques excités produit une émission de lumière détectée en champ lointain. Grâce à l'extrême localisation spatiale de l'excitation sous la pointe STM, il devient possible de sonder sélectivement différentes régions d'une nanostructure et ainsi d'accéder à différents modes plasmoniques [4, 5].

Nous proposons ici d'utiliser l'excitation par STM pour la caractérisation de nanoparticules plasmoniques chirales. Plus particulièrement, nous exciterons les nanoparticules chirales avec le courant tunnel inélastique et nous mesurons la polarisation de la lumière émise en champ lointain. Nous présentons le schéma de détection correspondant ainsi que la calibration du système à l'aide de la méthode de calibration par valeurs propres [6]. Les questions auxquelles nous souhaitons répondre sont les suivantes : l'excitation d'une nanoparticule chirale par STM conduit-elle à l'émission d'une lumière polarisée circulairement ? L'hélicité de la nanoparticule peut-elle modifier le sens (droite ou gauche) de polarisation circulaire de la lumière émise ? Comment l'émission varie-t-elle en fonction de la position d'excitation par rapport à la nanostructure ?



- L'excitation STM d'une nanoparticule chirale induit-elle une émission circulairement polarisée ?
- L'hélicité de la nanoparticule détermine-t-elle le sens de cette polarisation ?
- La position d'excitation influence-t-elle le résultat ?

Figure 1 : Schéma de principe : excitation d'une nanoparticule chirale à l'aide d'une pointe de STM. Cette excitation conduit-elle à une émission de lumière polarisée circulairement gauche et droite ? Cette réponse dépend-elle de l'hélicité de la particule ? Quels sont les effets de la position de la pointe sur les propriétés de l'excitation et de l'émission ?

Références

- [1] Karst, J.; Cho, N. H.; Kim, H.; Lee, H. E.; Nam, K. T.; Giessen, H.; Hentschel, M. *ACS Nano* **2019**, 13, 8659.
- [2] Hentschel, M. et al. *Science Advances* **2017**, 3, e1602735.
- [3] Wang, T.; Boer-Duchemin, E.; Zhang, Y.; Comtet, G.; Dujardin, G. *Nanotechnology* **2011**, 22, 175201.
- [4] Le Moal, E.; Marguet, S.; Rogez, B.; Mukherjee, S.; Dos Santos, P.; Boer-Duchemin, E.; Comtet, G.; Dujardin, G. *Nano Letters* **2013**, 13, 4198.
- [5] Cao, S.; Zapata-Herrera, M.; Campos, A.; Le Moal, E.; Marguet, S.; Dujardin, G.; Kociak, M.; Aizpurua, J.; Borisov, A. G.; Boer-Duchemin, E. *ACS Photonics* **2020**, 7, 1280.
- [6] Garcia-Caurel, E.; Ossikovski, R.; Foldyna, M.; Pierangelo, A.; Dréville, B.; De Martino, A. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg **2013**, 31.

Nano-Caractérisation avancée par microscopies à sonde locale

Louis THOMAS¹, Sébastien GERMAIN¹, Hugo DJEHA¹, Sylvie GODEY¹, Maxime BERTHE¹

¹Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, CNRS, Univ. Lille, Junia, Univ. Valenciennes, UMR 8520 – IEMN, Lille, France

Les moyens de nano-caractérisation par microscopies à sonde locale mis à disposition des chercheurs de l'Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN) par le Pôle Champ Proche (PCP) permettent de sonder un vaste panel de propriétés physiques (mécaniques, électriques, magnétiques, thermiques ...). Le pôle est intégré à la Plateforme de Caractérisation Multi-Physique (PCMP) de l'Université de Lille et ses équipements sont ouverts aux collaborations dans le cadre du réseau Renatech. Cinq ingénieurs / techniciens mettent à disposition une dizaine de microscopes à une quarantaine d'utilisateurs [1-5].

Nous présenterons les techniques disponibles au PCP, en conditions ambiantes, sous atmosphère contrôlée, et sous ultravide à travers des résultats récemment obtenus. L'accent sera mis sur les modes avancés de l'AFM appliqué à la caractérisation de matériaux et de composants pour des applications en nanotechnologie et en microélectronique (figure 1).

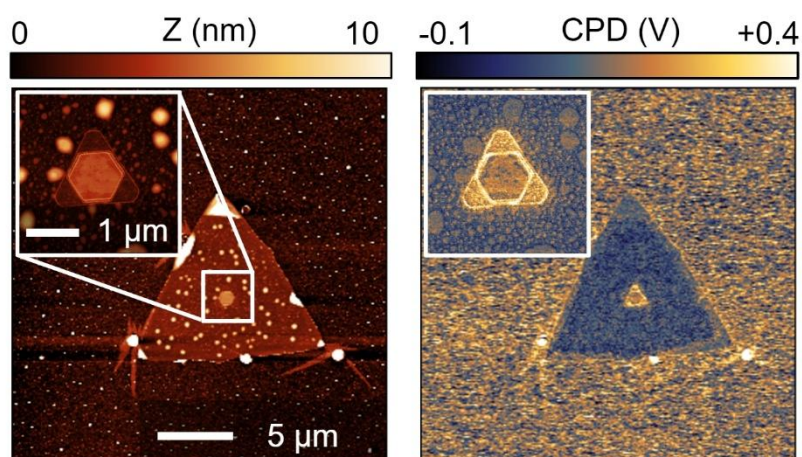


Figure 1 : Caractérisation d'un domaine de WSe2 sur SiO₂. Gauche : Topographie AFM 25 × 25 µm², inset : 3 × 3 µm². Droite : Cartographie simultanée de différence de potentiel de contact (CPD) par microscopie à sonde Kelvin en modulation de fréquence hétérodyne (FM-heterodyne KPFM). Collaboration IEMN / CINTRA, Dr. Xingli Wang, Prof. Beng Kang Tay.

Références

- [1] Bousbaa, Y.; Wang X.; Lim, S.; *et al.* *ACS Applied Electronic Materials*, **2026**, *8*, 1292
- [2] Chernukha Y.; Bardet, L.; Berthe, M.; *et al.* *ACS Omega*, **2025**, *10*, 55716
- [3] Tran, M.; Skorynina, A.; Addad, A.; *et al.* *Applied Catalysis B: Environmental*, **2025**, *363*, 124834
- [4] Sthioul, C.; Chernukha, Y.; Koussir, H.; *et al.* *ACS Applied Materials & Interfaces*, **2025**, *17*, 10027
- [5] Khelifi, W.; Capiod, P.; Barbot, C.; *et al.* *Nanotechnology*, **2025**, *36*, 125301

Extraction de la Résistance de Contact Pointe-Cristal 2D en C-AFM

Michael TZVETKOV, Oriane DE LEUZE, Sofiane ARIB, Benoît HACKENS

IMCN (pôle NAPS), UCLouvain, Belgique

Malgré les excellentes études de conductivité électrique faites sur les matériaux graphitiques [1] ou bidimensionnels [2] à l'aide de la technique C-AFM, elle demeure à ce jour relativement inadaptée pour une caractérisation systématique et quantitative, avec pour cause le manque de répétabilité dans les mesures. Au cours d'une étude présentée au FMSL 2025, nous avons reporté que la conductance hors du plan d'échantillons de graphite augmentait avec l'épaisseur, à l'inverse du comportement ohmique attendu. Cela nous a mené à investiguer plus en profondeur les mécanismes d'injection de courant, par le biais de la résistance de contact pointe-graphite. Au moyen de systèmes combinant simultanément des mesures électriques par pointe (C-AFM) et par électrodes déposées, cette étude s'attardera à extraire la résistance due au contact pointe-cristal 2D. Les informations collectées par C-AFM seront recoupées avec des mesures KPFM pour observer les changements d'état à la surface de l'échantillon, et avec des simulations aux éléments finis qui permettront de discriminer entre les variables physiques influant sur la résistance de contact.

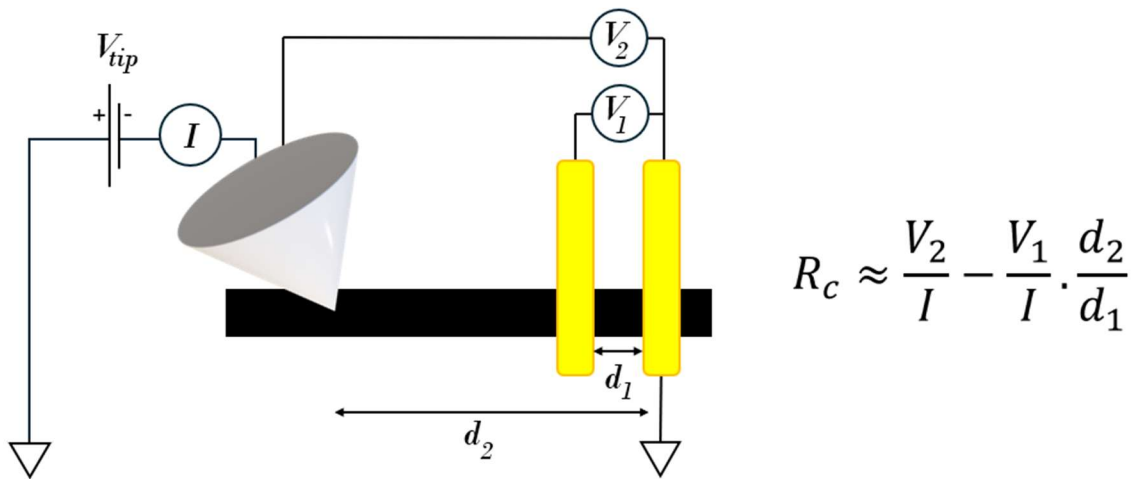


Figure 1 : Schéma du système pointe-échantillon, présentant une pointe conductrice en mode C-AFM en contact avec un cristal 2D long et régulier, contacté latéralement par deux électrodes métalliques. En mesurant simultanément les tensions électriques V_1 et V_2 , le système se ramène à une mesure électrique à 3 contacts, permettant d'extraire la résistance de contact entre la pointe et le cristal 2D.

Références

- [1] Peter N. Nirmalraj, Tarek Lutz, Shishir Kumar, Georg S. Duesberg, and John J. Boland *Nano Letters* **2011** 11 (1), 16, DOI: 10.1021/nl101469d
- [2] de Leuze, O., Fernandes, F.M., Arib, S. *et al.* Anisotropic charge transport in 2D single crystals of $Ti_3C_2T_x$ MXenes. *Commun Mater* **6**, 186 (2025). <https://doi.org/10.1038/s43246-025-00902-3>

Tip-Enhanced ultrafast vibrational spectroscopy at the nanoscale

Keke YUAN, Céline DABLEMONT, Serge CARREZ, Aimeric OUVRARD

Université Paris-Saclay, CNRS, Institut des Sciences Moléculaires d'Orsay, 91405, Orsay, France

Understanding ultrafast optical and vibrational processes in molecules on surfaces is a key for the design and performance of organic optoelectronic devices [1]. Optical processes can be probed at the single-molecule level using scanning probe microscopy and plasmon enhanced optical spectroscopies; however, their temporal resolution is intrinsically limited [2]. In this context, we aim to go beyond the diffraction limit of optical spectroscopy and beyond the temporal response of scanning probe microscopy. We propose to combine ultrafast sum-frequency generation (SFG) spectroscopy an ideal tool to probe molecules at surfaces [3], with scanning tunneling microscopy (STM), in order to probe the vibrational dynamics of single molecules. In a similar way to tip-enhanced Raman spectroscopy, the STM metallic tip will amplify both linear and non-linear local electric fields in the tip-surface junction thanks to the localized surface plasmon resonance (LSPR).

First, we have conducted a feasibility study by numerical calculations using COMSOL, based on solving Maxwell's equations using the finite element method. We have simulated the linear optical response of a plasmonic tip close to a surface. The electric field distribution was computed. A parametric study was conducted to estimate the impact of tip geometry, laser wavelength and polarization. Simulations demonstrate the high sensitive of the field enhancement to the tip apex radius or laser wavelength. The strongest enhancement is reached when the laser field polarization is TM, parallel to the tip long axis. A strong enhancement factor of the electric field at the sum frequency is obtained, that is large enough to overcome the small surface of emission under the tip. Experimentally, an optical system was integrated into the STM microscope (ScientaOmicron) under ambient conditions. A short focal lens is used to focus the laser onto the tip apex to minimize the focal spot size, while another high numerical aperture lens is employed to efficiently collect the SFG signal emitted from the junction. We found that thermal heating induced by the fs lasers is limited and the STM regulation loop remains stable under illumination. We succeed to combine STM and SFG using homemade Ag coated W tips, and find the SFG signal at the nanoscale. Future work include the improvement of light collection, the estimation of the lateral resolution and the mapping of vibrational response of the organic layer prior to demonstrate ultrafast SFG spectroscopy.

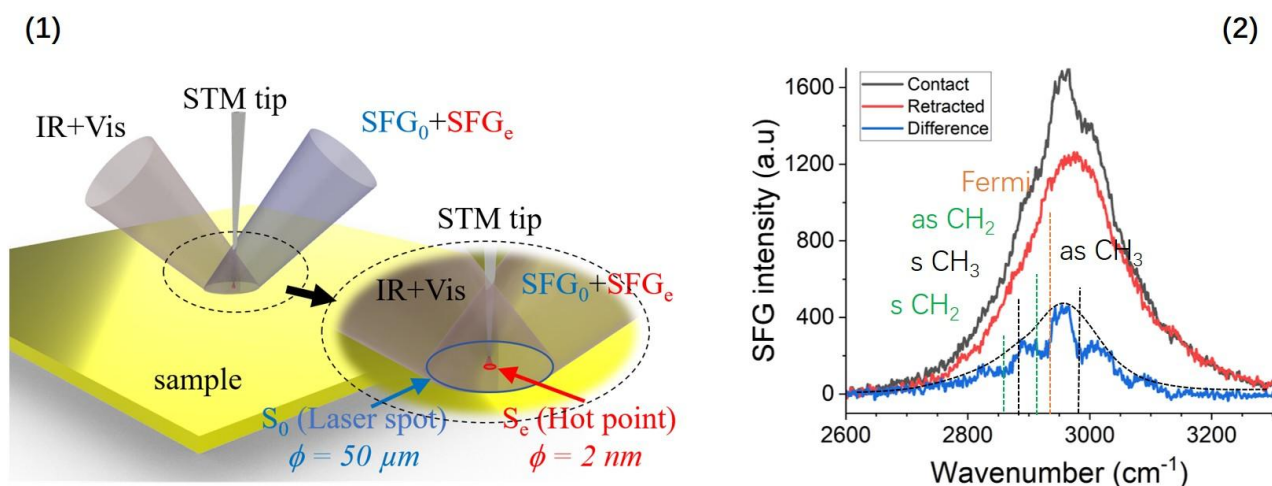


Figure 1 : (1) Principle of tip-enhanced SFG and (2) Preliminary results of Tip enhanced SFG signal from a self-assembled monolayer of octadecanethiol molecules.

Références

- [1] Margherita Maiuri; Marco Garavelli; Giulio Cerullo. *J. Am. Chem. Soc.* **2020**, *142*, 3
- [2] Rico Gutzler; Manish Garg; Christian R. Ast. *Nature reviews physics* **2021**, *4*, 441
- [3] N. Alyabyeva; A. Ouvrard; A.-M. Zakaria. *J. Phys. Chem. Lett.* **2019**, *10*, 624-629

Nanoscale mechanical characterization of plasma polymer thin films by AFM: relationship between crosslinking and elastic modulus

Aissam AIROUDJ¹, Florence BALLY-LE GALL¹, Vincent ROUCOULES¹

¹*Institut de Sciences des Matériaux de Mulhouse (IS2M), UHA, CNRS, Université de Strasbourg, UMR 7361, 15 rue Jean Starcky, 68057 Mulhouse Cedex, France*

Polymer coatings deposited by plasma polymerization using PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) are widely used in many application fields such as electronics, automotive engineering, and medical devices [1,2]. Plasma polymers differ significantly from conventional polymers and represent a new class of materials. They are characterized by a high degree of crosslinking and a random chemical organization, which confer unique functional and nano/microstructural properties, good thermal stability, and strong adhesion to substrates. However, the mechanical properties of these coatings, particularly the elastic modulus and mechanical strength, may represent critical parameters limiting their large-scale applications.

Most studies reported in the literature mainly focus on the influence of deposition parameters (discharge power, reactor pressure, treatment time, gas flow rate, reactor geometry, etc.) on the chemical properties of plasma polymers, especially on the retention of functional groups.

The objective of this work is therefore to synthesize plasma polymers under different operating conditions and to investigate the relationship between their mechanical properties, particularly the elastic modulus, and their physicochemical characteristics, with special emphasis on the crosslinking degree of the films.

In this study, thin films of plasma polymerized maleic anhydride (pp-MA) were investigated because of their strong potential for surface functionalization. Their reactive anhydride groups enable subsequent surface chemistry post-modification steps. However, cracks have been observed in poly(maleic anhydride) coatings deposited on elastomeric substrates due to the large difference in elastic modulus between the thin film and the substrate [3,4]. Controlling the mechanical properties of the coating is therefore essential to ensure the durability of the treatment.

The chemical composition and the retention degree of anhydride functional groups were characterized by infrared spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) as a function of the deposition parameters. Atomic force microscopy (AFM) was used as a key tool to investigate both the structural and mechanical properties of the films. The elastic modulus was determined using Peak-Force QNM mode.

These characterizations highlight correlations between the retention of chemical functional groups, the crosslinking degree of the polymer, and the elastic modulus of the coating. This approach demonstrates that AFM-based analysis provides valuable insights for understanding and controlling the overall properties of functional plasma polymer thin films through the adjustment of deposition parameters.

References

- [1] Biederman, H.; Osada, Y. Plasma Polymerization Processes, Vol. 3, *Academic Press, Inc.*, Amsterdam **1992**.
- [2] d'Agostino, R. Plasma Deposition, Treatment, and Etching of Polymers, *Academic Press*, San Diego, USA **1990**.
- [3] Siffer, F.; Ponche, A.; Fioux, P.; Schultz, J.; Roucoules, V. *Analytica Chimica Acta*, **2005**, 539, 289.
- [4] Roucoules, V.; Siffer, F.; Ponche, A.; Egurrola, U.; Vallat, M. F. *J. Adhesion*, **2007**, 83, 875.

Échantillon de référence optimisé pour l'étalonnage de mesures de résistance électrique à l'échelle nanométrique

Pascal Chrétien^{1,2}, François Piquemal³, Frédéric Houzé^{1,2}, José Morán-Meza³,
Christian Ulysse⁴, Abdelmounaim Harouri⁴

¹Laboratoire de génie électrique et électronique de Paris (GeePs), Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Gif-sur-Yvette (France)

²Laboratoire de génie électrique et électronique de Paris (GeePs), Sorbonne Université, CentraleSupélec, CNRS, Gif-sur-Yvette (France)

³Laboratoire national de métrologie et d'essais - LNE, Trappes (France)

⁴Centre de nanosciences et de nanotechnologies - C2N, Université Paris-Saclay, CNRS, Palaiseau.

Les mesures de résistance et de courant électrique à l'échelle nanométrique sont de plus en plus largement utilisées pour la caractérisation de matériaux et de composants dans de nombreux domaines technologiques. Opérées le plus souvent par microscopie à force atomique à pointe conductrice (C-AFM), elles ne bénéficiaient, jusqu'à il y a peu, d'aucun moyen d'étalonnage et restaient limitées à des comparaisons qualitatives. Pour répondre à ce besoin, nous avons récemment proposé des échantillons de référence spécifiquement conçus pour étalonner l'ensemble du circuit de mesure C-AFM sur une large gamme de résistance et de courant, respectivement de 1 k Ω à 1 T Ω et de 10 fA à 10 μ A [1,2]. Lors du Forum 2025, nous avons décrit les conditions opératoires et les méthodes d'analyse des données qui ont été élaborées pour tirer le meilleur parti de tels échantillons, tant en mode imagerie qu'en mode spectroscopie *I-V* [3].

En nous appuyant sur l'expérience acquise durant ces études, nous présentons cette année une toute dernière version optimisée d'échantillon de référence, couvrant 11 décades de résistance (de 1 k Ω à 10 T Ω), et toujours doté d'électrodes dites de court-circuit (CC) permettant de mesurer la contribution additionnelle du circuit de mesure (dont la résistance de la pointe). Le nouveau design de l'échantillon se distingue des précédents en ce que les électrodes sont toutes parallèles les unes aux autres, ce qui assure des conditions de balayage identiques – de manière préférentielle perpendiculairement à leur axe ; ces électrodes sont par ailleurs distribuées en deux groupes placés côte à côte, l'un de « basses » résistances (de CC à 1 M Ω) et l'autre de « hautes » résistances (de 1 M Ω à 10 T Ω), comme illustré sur la figure 1. Les mesures électriques ont été réalisées à l'aide d'une configuration C-AFM fondée sur un module maison dénommé WiCMD (Wide range Current Measuring Device), qui fournit en temps réel des cartographies de résistance ou de courant, ainsi que des courbes *I-V*, sur une plage de 11 décades.

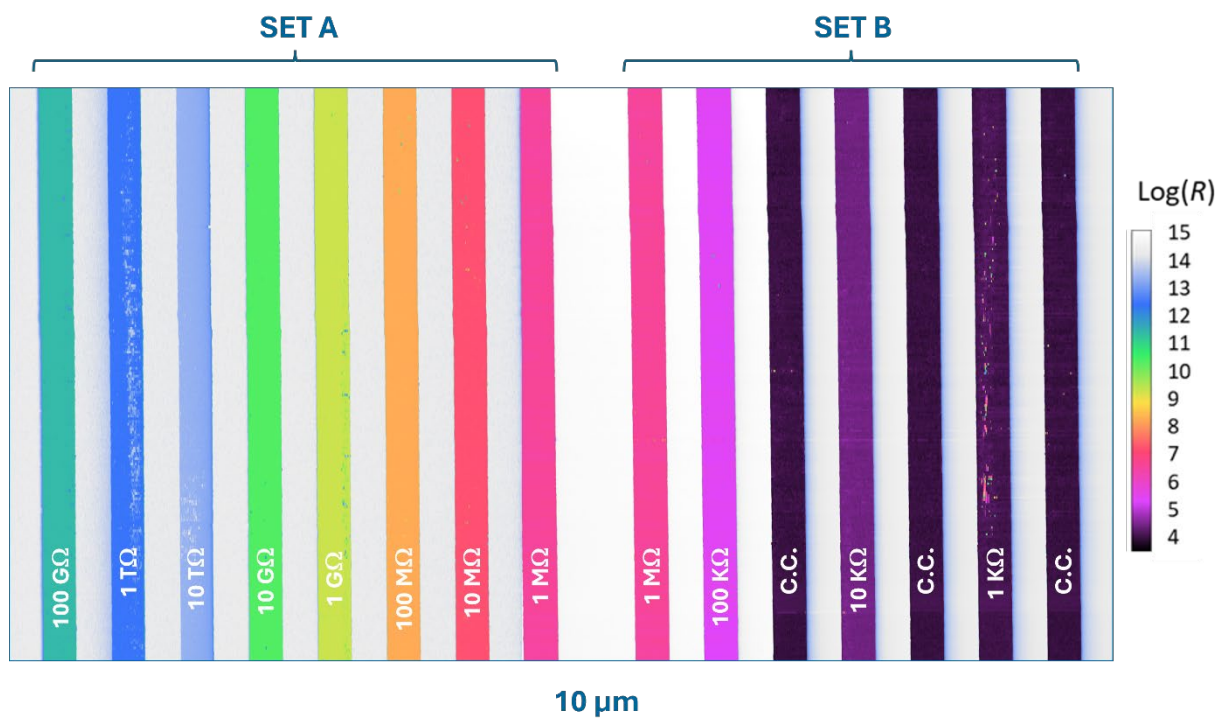


Figure 1 : Assemblage de deux cartographies de résistance adjacentes obtenues sur le nouvel échantillon de référence en associant le module « WiCMD » avec un AFM Dimension Icon Bruker.

Le poster montrera et discutera les premiers résultats obtenus, dont un exemple est présenté sur la figure 2 : on voit que les écarts entre les valeurs mesurées par C-AFM et des mesures conventionnelles via une station sous pointes étalonnée, peuvent être extrêmement faibles sur une large plage.

Afin de répondre à l'intérêt potentiel de telles mesures pour tout utilisateur de C-AFM, il est d'ores et déjà possible d'acquérir l'échantillon de référence de nouvelle génération. Une version commerciale du module WiCMD sera également disponible prochainement.

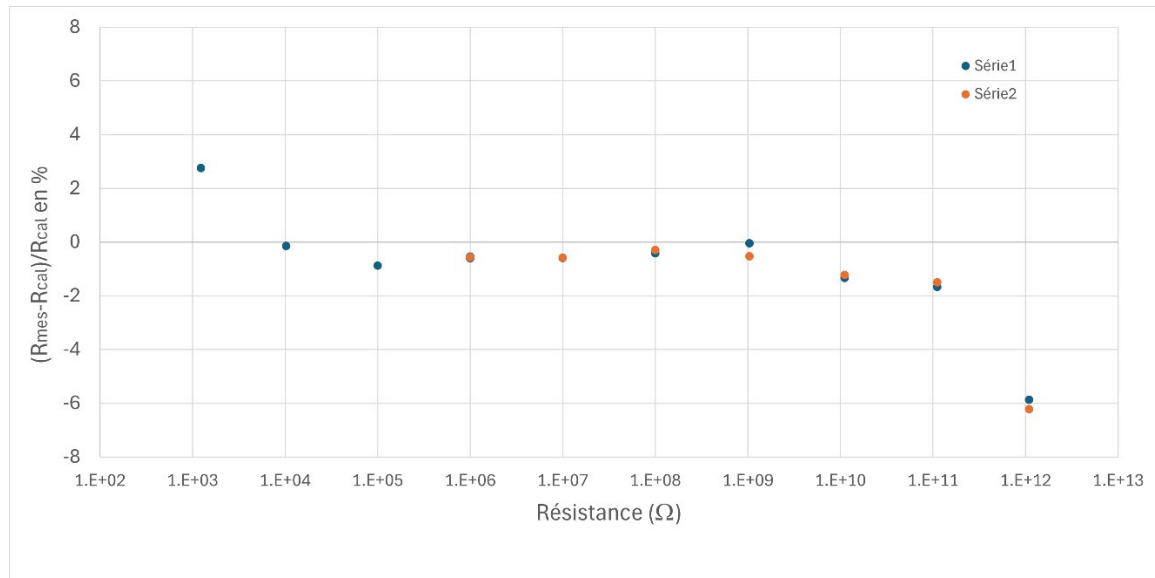


Figure 2 : Écarts entre les valeurs obtenues à partir d'images C-AFM (avec pointe revêtue PtSi) et les valeurs étalonnées à l'aide d'une station sous pointe.

Remerciements

Ces travaux ont été menés dans le cadre du projet ELENA (EMPIR 20IND12), soutenu par le programme européen de métrologie pour l'innovation et la recherche (EMPIR). Une part de ces travaux a été réalisée au sein des plateformes de micro nanotechnologies du C2N et a été en partie soutenue par le réseau RENATECH et le Conseil Général de l'Essonne.

Références

- [1] Piquemal, F. ; Kaja, K. ; Chrétien, P. ; Morán-Meza, J. ; Houzé, F. ; Ulysse, C. ; Harouri, A., *Beilstein J. Nanotechnol.* **2023**, *14*, 1141.
- [2] Piquemal, F. ; Chrétien, P. ; Morán-Meza, J. ; Houzé, F. ; Delvallée, A. ; Ulysse, C. ; Harouri, A., *Physica Status Solidi A* **2024**, 2400711.
- [3] Chrétien, P. ; Piquemal, F. ; Houzé, F. ; Morán-Meza, J. ; Ulysse, C. ; Harouri, A., *Actes du 26^{ème} Forum des Microscopies à sonde locale* **2025**, 111.

Establishing a force spectroscopy protocol with oil droplets as indentors

Tomaso ZAMBELLI¹, Giacomo PACCAGNAN¹, Massimo VASSALLI²

¹Laboratory of Biosensors and Bioelectronics, ETH Zürich, Zürich, Switzerland

²James Watt School of Engineering, University of Glasgow, Glasgow, UK)

ztomaso@ethz.ch

Atomic force microscopy (AFM) indentation techniques have significantly advanced the mechanical characterization of living cells [1]. However, classical AFM indentation presents limitations, such as difficulty in changing indentors rapidly and limited flexibility in adjusting indenter geometry. FluidFM [2,3], an AFM based on hollow cantilevers, has addressed some of these challenges by enabling the capture of spherical beads for indentation in a reversible fashion [4]. In this study, we take advantage of FluidFM's ability to generate oil droplets [5] to introduce an innovative approach that employs these droplets as dynamic mechanical probes.

The use of oil droplets as indentors offers unique advantages, including rapid and efficient droplet size adjustment and replacement, as well as the capability to modify the droplet size during indentation. This flexibility opens new possibilities for dynamic mechanical testing, such as expanding droplet size while in contact with the cell, thus enabling previously unattainable measurements of mechanical properties.

For indentation-based mechanical assessments, precise knowledge of the indenter's geometry is essential, alongside a thorough understanding of the interactions between the indenter and the cell during the contact phase. Therefore, to accurately control and characterize the oil droplet geometry and size in real time, we implement a self-excited cantilever strategy. In this method, cantilevers are maintained in resonance through a feedback loop that feeds the cantilever's deflection signal back to its piezo actuator, thus dynamically tracking resonance frequency changes caused by droplet size variations. To measure the resonance frequency changes and to enhance the stability and precision of this self-excitation process, we are integrating an Arduino-based control system within the feedback loop. This system applies a time shift, amplitude correction, and saturation to the signal from the cantilever deflection to the piezo actuator, ensuring the maintenance of consistent resonance conditions.

By integrating this self-excitation cantilever system, frequency-to-droplet size calibration, oil droplet indentation, and comparisons with established contact mechanics models, we aim to develop a robust, versatile platform for advanced cellular mechanics studies.

Références

- [1] M. Krieg et al., *Nat. Rev. Phys.* **2019**, 1, 41
- [2] A. Meister et al., *Nano Lett.* **2009**, 9, 2501
- [3] T. Zambelli et al., *Nat. Rev. Methods Primers* **2026**, 6, 15
- [4] P. Dörig et al., *Biophys. J.* **2013**, 105, 463
- [5] D. Ossola et al., *Nanotechnology* **2016**, 27, 415502

Reversible Patterning of Azobenzene Thin-Films by Focused Laser Scanning

Dylan AMELOT¹, Léa DUMAX¹, Nicolas FABRE¹, Simon VASSANT¹, Fabrice CHARRA¹, Céline FIORINI-DEBUISSCHERT¹.

¹Service de Physique de l'Etat Condensé, CEA-CNRS, Université Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France

Photochromic compounds undergo reversible isomerization upon light irradiation, enabling control of their properties through optical stimulation. These fast processes provide a unique potential for the realization of reconfigurable devices capable of modulating the properties of a light beam and therefore lie at the core of the development of new photonic technologies. Among these applications, such compounds offer promising prospects for the implementation of optical synapses by enabling dynamic and tunable coupling between optical neurons, paving the way for neuromorphic photonic computing devices that are faster and more energy-efficient than current electronic technologies.

Among photochromic systems, azobenzene family are widely employed. They isomerize between a *trans* to *cis* isomer and are capable of doing multiple *trans*→*cis*→*trans* cycles without degradation under a single wavelength light beam. In thin films, these materials have been extensively studied for their ability to generate surface relief structures under illumination [1,2]. Previous studies have revealed the dependence of the resulting topographic patterns on both the polarization and the electric field gradient of the writing beam [3,4]. However, the techniques employed so far mainly rely on wide-field writing beams, which limits the range of accessible patterns [1,5,6]. A few studies have nevertheless highlighted the possibility of using a focused laser beam to locally modulate the surface topography [5,7].

To fully exploit the potential of these materials, we implemented a writing platform in which a 532 nm focused laser beam, with controlled power and polarization, is combined with a piezoelectric stage to fabricate patterns on the surface of an azobenzene copolymer film. We demonstrate the fabrication of simple structures as well as diffraction gratings (Fig. 1). All these structures were characterized atomic force microscopy (AFM), optical and diffraction efficiency measurements. Furthermore, we demonstrate the feasibility of using this system to fabricate complex patterns, thereby opening the way toward the direct fabrication of reconfigurable photonic structures.

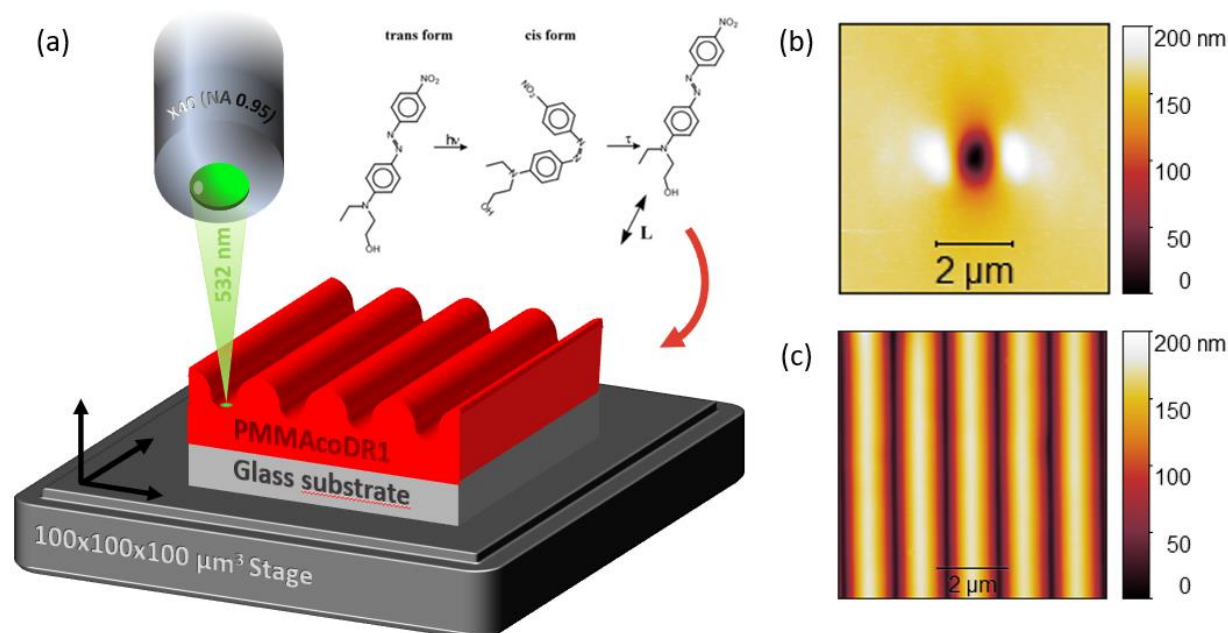


Figure 1: (a) Principle of laser patterning PMMAcoDR1 thin film (insert: DR1 photoisomerization and induced movement reproduced from [8]). AFM topography images of the thin-film surface obtained after writing (a) a single laser spot and (b) a 1,4μm step grating.

Références

- [1] Mahimwalla, Z. ; Yager, K. G. ; Mamiya J. ; Shishido, A. ; Priimagi, A. ; Barrett, C. J. *Polym. Bull.* **2012**, 69 :967-1006 (and references therein).
- [2] Cojocariu, C. ; Rochon, P. *Pure Appli. Chem.* **2004**, 76, 7-8, 1479-1497 (and references therein).
- [3] Saphiannikova, M. ; Toshchevikov, V. ; Tverdokhle, N. *Soft Matter* **2024**, 20, 2688.
- [4] Bin, J. ; Oates, W. *Sci. Rep.* **2015**, 5, 14654.

- [5] Fiorini, C. ; Prudhomme, N. ; De Veyrac, G. ; Maurin, I. ; Raimond, P. ; Nunzi, J.-M. *Synth. Metals* **2000**, 115, 121-125.
- [6] Yager, K. G. ; Barret, C. J. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* **2001**, 5, 487-494.
- [7] Tuma, J. ; Lyutakov, O. ; Huttel, I. ; Slepicka, P. ; Svorcik, V. *J. Appl. Phys.* **2013**, 114, 093104.
- [8] Lefin, P. ; Fiorini, C. ; Nunzi, J.-M. *Pure Appl. Opt.* **1998**, 7, 71-82

De la lubrification particulaire macroscopique à son investigation nanotribologique par AFM

P-M Zubieta-Laborde¹, G Cross², G Duesberg³, **F Dubreuil**^{1*}, M.I De Barros-Bouchet¹

*frederic.dubreuil@ec-lyon.fr

¹ Ecole Centrale de Lyon, CNRS, ENTPE, LTDS, UMR5513, 69130 Ecully, France

² CRANN&Amber, Trinity College Dublin, Ireland

³ Institute of Physics, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Universität der Bundeswehr

L'obtention de la **superlubricité**, définie par un coefficient de friction inférieur à 1 %, dans des conditions de frottement sévères (faibles vitesses ou fortes pressions de contact), constitue un enjeu majeur pour le développement de systèmes tribologiques à haute efficacité énergétique [1]. Pour atteindre cet objectif, différentes approches technologiques sont actuellement explorées.

Parmi celles-ci, la combinaison d'une contribution **statique**, telle que la texturation des surfaces, et d'une contribution **dynamique**, reposant sur l'utilisation de lubrifiants, d'additifs ou de micro-particules, apparaît particulièrement prometteuse pour réduire simultanément le frottement et l'usure [1]. Toutefois, une compréhension fondamentale des mécanismes impliqués demeure nécessaire afin de décorrélérer et quantifier l'influence de chacune de ces contributions.

Dans le cadre de l'étude de la lubrification par **micro-particules de silice**, des essais de frottement à l'aide d'un **microscopie à force atomique (AFM)** sont réalisés afin d'évaluer l'impact de la contribution dynamique dans le mécanisme de lubrification.

Afin de mener ces investigations, plusieurs objectifs expérimentaux sont poursuivis :

- Reproduire la méthode dite du **wedge** décrite dans la littérature [2] à l'aide de notre dispositif expérimental.
- Développer des **sondes colloïdales réalisées en interne**, obtenues par fixation de particules sur les leviers AFM.
- Évaluer la faisabilité de ces expérimentations **en milieu immergé**.
- Étudier les interactions tribologiques **avec différents substrats revêtus** utilisés dans le cadre du projet [1].

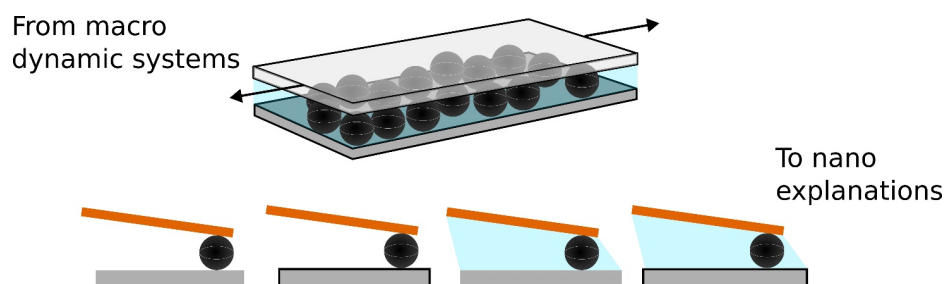


Figure 1 : Du système tribologique macroscopique lubrifié par particules à l'étude du mécanisme par essais de frottement en AFM sur différents substrats.

Références

- [1] HORIZON-EIC-2021-PATHFINDEROPEN-01, Project number: 101046693, SSLiP: Scaling-up Superlubricity into Persistence <https://www.sslip.eu/>
- [2] Wang H, Gee ML. AFM lateral force calibration for an integrated probe using a calibration grating. Ultramicroscopy. 2014 Jan;136:193–200. doi:[10.1016/j.ultramic.2013.10.012](https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2013.10.012)

Caractérisation de la limite de résolution des modes électriques du KPFM

Matisse Brevet¹, Claire Abadie¹, **Hervé Cruguel**¹, Yoann Prado¹, **Olivier PLUCHERY**¹

¹ Institut des NanoSciences de Paris – Sorbonne Université CNRS UMR 7588 - 4 place Jussieu 75005 Paris

Email: olivier.pluchery@insp.jussieu.fr

web page: <https://w3.insp.upmc.fr/en/insp-page-perso/pluchery-olivier-2/>

Le KPFM (Kelvin Probe Force Microscopy) est l'un des modes électriques de l'AFM. Il permet de mesurer le potentiel de surface à des échelles de quelques nanomètres quand il est utilisé sous atmosphère ambiante. Ce potentiel de surface dépend globalement de trois facteurs : du travail de sortie de la surface, de la présence de charges électriques locales et de la présence de dipôles moléculaires. Le KPFM produit une image en CPD (Contact Potential Difference) dont les contrastes superposent ces contributions. Il est souvent très délicat de les détricoter et identifier la contribution provenant d'une charge locale ou celle provenant d'une nanostructure de matériau différent.

La plateforme AFM de l'INSP comporte deux instruments fonctionnant à l'air et avec divers modes d'acquisitions : simple passage, double passage, modulation d'amplitude, modulation de fréquence ou détection hétérodyne (Park systems).

Dans cette présentation, nous comparerons diverses techniques de KPFM et nous examinerons leurs limites de résolution spatiale. Nous distinguerons en particulier la capacité du KPFM à détecter un contraste sur les images de CPD et de sa capacité à mesurer la valeur réelle du potentiel de surface. Pour ce faire nous avons élaboré des échantillons spécifiques présentant des plots de tailles décroissantes de 10 µm à 200 nm.

Nous montrerons aussi l'effet de l'humidité sur les valeurs de CPD, sur des plots d'or et des plots d'aluminium.

Références

- [1] Lechaptois, L., Prado, Y., & Pluchery, O. **2023**. KPFM visualisation of the Schottky barrier at the interface between gold nanoparticles and silicon. *Nanoscale*, 15(16), 7510-7516.
- [2] Bossard-Giannesini, L., Cardenas, L., Cruguel, H., Demessence, A., Loffreda, D., & Pluchery, O. **2023**. How far the chemistry of self-assembled monolayers on gold surfaces affects their work function?. *Nanoscale*, 15(42), 17113-17123.
- [3] Lechaptois, L., Miche, A., Boujday, S., Lim, S. & Pluchery, O. **2026** Unveiling the Immobilization Mechanism of Negatively Charged Protein Particles on Silica through Direct Measurement of the Electric Dipole. *Nature Comm.* (accepted).

Bichromophores auto-assemblés en monocouches pour le contrôle des propriétés optoélectroniques aux interfaces

Lionel PATRONE, Virginie GADENNE, Elmira KHUSNUTDINOVA, Jean-Manuel RAIMUNDO

¹Aix Marseille Univ, Université de Toulon, CNRS, IM2NP UMR 7334, ISEN Méditerranée, Maison du Numérique et de l'Innovation, Place G. Pompidou, 83000 Toulon, France

²CINaM UMR CNRS 7325, Aix-Marseille Université, 13288 Marseille cedex 09, France

Comprendre le rôle des propriétés d'interface reste encore un aspect crucial dans la recherche de stratégies de conception alternatives pour optimiser l'efficacité et les performances des dispositifs semi-conducteurs organiques. En effet, dans ce but, la modulation et le contrôle des propriétés électroniques de surface et d'interface revêtent une importance fondamentale. L'utilisation de monocouches auto-assemblées (SAM) [1] constitue une stratégie très efficace pour y parvenir [2,3]. En effet, de nombreuses études ont montré la possibilité d'ajuster le niveau d'énergie de l'interface, et donc de contrôler le processus de transfert de charge, par une sélection appropriée de SAMs incorporant des molécules dipolaires. Cependant, ces propriétés électroniques d'interface sont fortement affectées par les caractéristiques structurales de la SAM, telles que l'orientation moléculaire, la nature des interactions molécule-surface, l'empilement moléculaire dans le film, etc. Tous ces paramètres dépendent directement des conditions de dépôt et de la structure moléculaire. Ainsi, maîtriser la formation de SAMs de molécules greffées perpendiculairement à la surface, permettant alors d'orienter les dipôles de molécules dipolaires, représente un défi clé pour optimiser les propriétés de l'interface. Nous proposons donc de concevoir une nouvelle interface basée sur des monocouches auto-assemblées de molécules de multichromophores [4] et d'optimiser leur organisation dans la couche active pour améliorer les propriétés électroniques.

Dans ce travail, la structure moléculaire des chromophores à greffer sur la surface constitue un aspect hautement innovant. Au cours des dernières années, les chimistes ont porté une attention particulière aux chromophores « push-pull » constitués de groupements donneurs (D) et accepteurs (A) d'électrons liés par des ponts π -conjugués [5] en raison de leur dipôle généré par transfert de charge de D vers A, et de leur réponse optique non linéaire attractive. Les propriétés optiques non linéaires de tels composés D- π -A peuvent être finement ajustées en sélectionnant les unités D, A, et les ponts π -conjugués appropriés. Cependant, très peu d'études ont porté sur leur adsorption sur la surface [6], peut-être en raison de leur orientation incontrôlée. Sur cette base, de nouvelles molécules de bichromophores composées de deux chromophores « push-pull » complémentaires portés par la même tête de greffage (cf. Figure 1) ont été synthétisées, puis déposées par auto-assemblage sur la surface en assurant ainsi l'organisation et l'équipartition de chaque chromophore, ce qui n'a pas encore été étudié dans la littérature. Ce travail est donc axé sur l'étude de la relation entre la structure et les propriétés électroniques de ces nouvelles SAMs. Ce système unique conduira à de nouvelles interfaces électriques aux propriétés exclusives les rendant intéressantes pour améliorer la récupération de la lumière, la séparation des charges, et faciliter les injections de charges. En particulier, les nouvelles SAMs basées sur des composés bichromophores π -conjugués liés à une tête d'ancrage unique pourraient être utilisées comme couches interfaciales de transport d'électrons (ETL) et de trous (HTL) ultra-fines à faible résistivité pour les cellules solaires organiques. Ces bichromophores apporteront une valeur ajoutée par rapport aux structures simples en termes de dipôle, de transport de charges, de transfert de charges photoinduites, et de limitation de la recombinaison des charges.

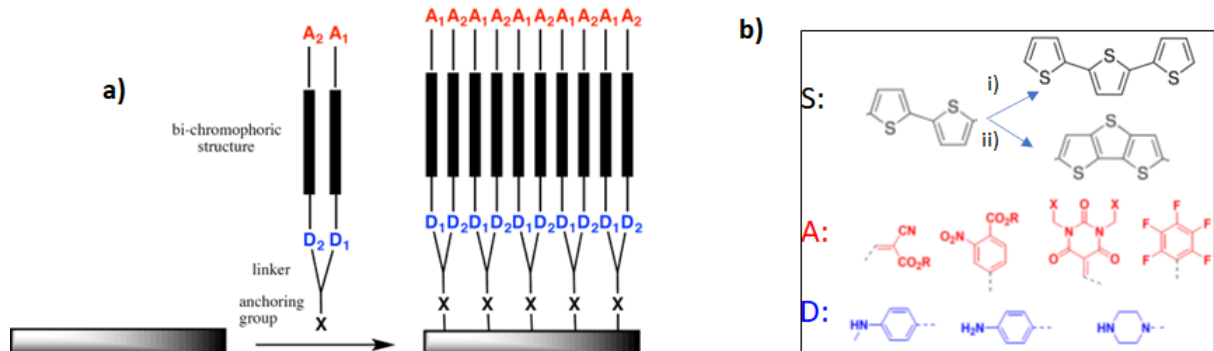


Figure 1: a) Structure des bichromophores push-pull sur une même tête greffante présentant des gammes d'absorption complémentaires, et leur SAM; b) Exemple de composés pour les différentes parties (espaceur S, accepteur A, et donneur D).

Les SAMs des différents bichromophores, obtenues par transfert des molécules d'une solution vers la surface, sont étudiées et comparées. Pour chacun des bichromophores, il s'agit aussi de mener la comparaison avec les SAMs obtenues par le mélange des monochromophores correspondants. Dans un premier temps, le choix des paramètres de dépôt (nature du solvant, concentration, température, durée,...)

est optimisé. La qualité des monocouches préparées est évaluée par différentes techniques d'analyse de surface (ellipsométrie, angles de contact, microbalance à quartz, spectroscopies), et notamment au niveau local par analyses de microscopie à force atomique (AFM), et de microscopie à effet tunnel (STM). Ensuite, les propriétés électriques sont étudiées via des caractérisations courant-tension (I-V), localement par microscopie STM en relation avec la topographie pour sonder l'homogénéité de la couche, et, plus macroscopiquement, au moyen de gouttelettes InGa à l'eutectique.

Références

- [1] Ulman, A., *An Introduction to Ultrathin Organic Films*, Academic Press Ed., Boston **1991**; Vijayaraghavan, R.K. et al., *J. Phys. Chem. C* **2013**, 117, 16820
- [2] Cartus, J.J. et al., *ACS Omega* **2021**, 6, 32270
- [3] Asyuda A. et al., *J. Phys. Chem. C* **2020**, 124, 8775
- [4] Aster A. et al, *Chem. Sci.* **2019**, 10, 10629; Weber et al. J.L., *Chem. Sci.* **2021**, 12, 1068
- [5] Malytskyi V. et al., *RSC Adv.* **2015**, 5, 354
- [6] Malytskyi V. et al., *RSC Adv.* **2015**, 5, 26308 ; Malytskyi V. et al., *Tetrahedron* **2017**, 73, 57381

Exploring the quantum properties of spin defects in 2D semiconductors

Alexis Fagundes¹, Fabian Cadiz¹, Fausto Sirotti¹, Natalia Alyabyeva¹, Antoine Borel¹, Michele Perlangeli¹ and Gyeongjun Lee¹

¹Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (PMC), CNRS-Ecole Polytechnique, UMR 7643, Route de Saclay 91120 Palaiseau, France

The OneSPIN project aims to unlock the coherent control of single electronic spins in two-dimensional (2D) semiconductors such as MoS₂ and WSe₂, leveraging their unique spin-valley coupling and optical addressability. These monolayer materials host point defects—particularly chalcogen vacancies—that act as quantum-dot-like centers capable of emitting single photons with spin-selective characteristics inherited from the host monolayer. Unlike excitons, which suffer from ultrafast (~ps) spin-valley relaxation, these localized states are predicted to exhibit microsecond-scale spin coherence, making them promising candidates for quantum information applications [1, 2, 3].

We propose a novel methodology that combines scanning tunneling microscopy (STM) with optical detection of magnetic resonance (ODMR) to probe and manipulate individual spins with atomic precision. This technique enables measurement of key quantum parameters and allows direct correlation of spin coherence with atomic-scale structure. A central element of the project is the optical readout of spin resonance from a localized state under RF and static magnetic fields (**Figure 1, left**) [4, 5]. This optical approach circumvents limitations of magnetized-tip ESR, operating under low magnetic fields and broad temperature ranges, and offers a transformative route for quantum material exploration and device engineering. Currently our team is working on the implementation of the STM head inside an optical cryostat (**Figure 1, right**), being the basis of promising future experiments.

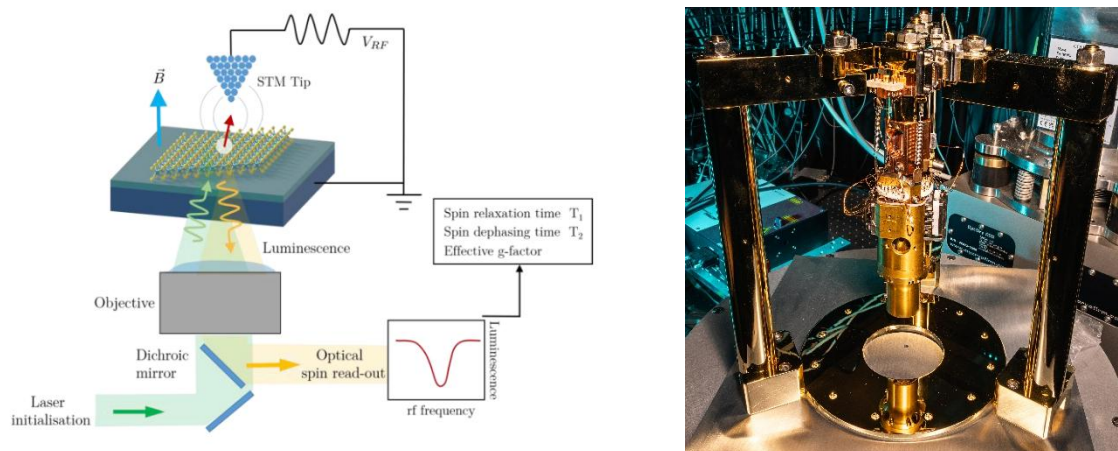


Figure 1: (Left) Principle of the experimental approach proposed in OneSPIN. A localized electron spin (red arrow) is excited by a laser (green arrow) and undergoes coherent precession under the influence of both an external, static out-of-plane magnetic field B and a radiofrequency electric field generated in the tip-sample junction just above the spin. The optical detection of this single spin resonance is achieved by analyzing the photoluminescence (yellow arrow) as a function of the frequency of the driving field. The exact shape of the obtained curve allows for a determination of the longitudinal spin relaxation time T_1 and the spin coherence time T_2 (in addition to the spin g -factor), which are expected to be highly dependent on the spin's atomic and electric environment. **(Right) STM head held by three gold-coated copper pillars on the optical cryostat basis.**

Références

- [1] Xiao et al., *Phys. Rev. Lett.* **2012**, 108, 1–5
- [2] Cadiz et al., *Phys. Rev. X* **7** **2017**, 021026
- [3] Moody et al., *Phys. Rev. Lett.* **2018**, 121, 57403
- [4] Klein et al., *Nat. Commun.* **2019**, 10, 1–8
- [5] Nguyen et al., *Phys. Rev. Lett.* **2019**, 121, 86101

Mesure d'adhésion entre fibres de verre par spectroscopie de force

A. Piednoir, S. Bouvier, M. Leocmach, A.-L. Biance, C. Cottin-Bizonne

Institut Lumière Matière, CNRS - UCBL1, 69622 Villeurbanne

Les fibres de verre sont omniprésentes dans de nombreux matériaux de notre environnement et elles interagissent soit entre elles, soit avec d'autres matériaux. Tous les contacts entre fibres à l'échelle micrométrique peuvent influencer le produit final. Aussi, pour prédire les performances mécaniques d'un matériau fibreux à une échelle plus grande, il est impératif de comprendre les interactions (probablement affectées par la présence d'eau et de divers additifs) entre les fibres. Nous avons développé un premier dispositif pour sonder la friction inter-fibres, et utilisé l'AFM pour évaluer leur adhésion en fonction du revêtement et de l'humidité.

L'AFM est un outil de choix pour mesurer des forces d'adhésion entre deux objets de taille micrométrique. Nous présentons notre mode opératoire pour coller un morceau de fibre de 10 à 20 μm de diamètre et $\sim 100 \mu\text{m}$ de longueur à l'extrémité d'un cantilever (figure 1), puis les mesures d'adhésion entre deux fibres grâce à la spectroscopie de force. Pour obtenir des données statistiques de mesures de forces, nous avons réalisé des cartographies de force d'adhésion ("Force Maps") à différents taux d'humidité. Nous avons ainsi accumulé un grand nombre de mesures de forces d'adhésion le long de chaque fibre pour différents revêtements et taux d'humidité (figure 2).

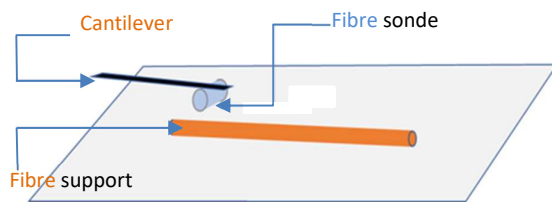


Figure 1 : dispositif pour la spectroscopie de force entre 2 fibres

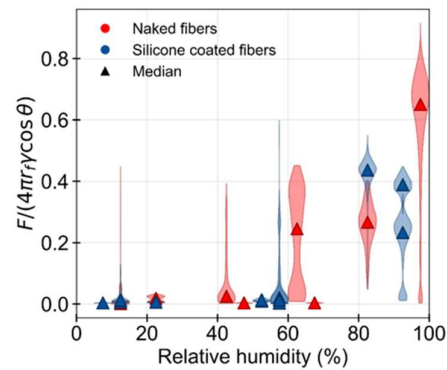


Figure 2 : force d'adhésion normalisée entre 2 types de fibres en fonction du taux d'humidité relative

La géométrie de cylindres croisés permet la modélisation des courbes de force en fonction de la force d'appui. Nous avons adapté le logiciel PyMembrane [1] pour modéliser une goutte d'eau qui aurait nucléé entre deux substrats cylindriques. Nous avons calculé la force d'adhésion en prenant la dérivée de l'énergie du système en fonction de l'espacement entre les cylindres et nous avons comparé nos valeurs expérimentales aux valeurs obtenues numériquement. Nous avons montré que la formation d'un ménisque d'eau au point de contact entre deux fibres, ne modifiait pas les forces de frottement entre deux fibres mais provoquait l'augmentation des forces d'adhésion (figure 2). Cette augmentation de l'adhésion est due au ménisque d'eau qui se forme malgré la présence de silicone entre les deux fibres (figure 3).

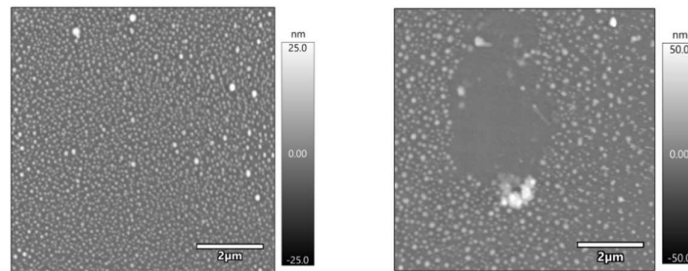


Figure 3 : image AFM de la fibre recouverte de silicone, avant et après Force Map

[1] D. A. Matoz-Fernandez, S. Li, M. O. Cruz, and R. Sknepnek, "PyMembrane: A flexible framework for efficient simulations of elastic and liquid membranes," Aug.2023. arXiv :2308.12754 [cond-mat]

Near-Field Optical Chirality on Achiral Gold Nanoparticles under Linear Polarization

Minyu Chen^{1,2}, Sylvie Marguet³, Davy Gerard¹, Lucas Vázquez Besteiro⁴, Safi Jradi¹, Alexander Govorov⁵, Tao Xu², **Renaud Bachelot**^{1,2}

¹Light, Nanomaterials & Nanotechnologies (L2n) Laboratory, CNRS UMR 7076. University of Technology of Troyes, France

²School of Mechatronic Engineering and Automation & School of Microelectronics, Shanghai University, China

³Université Paris Saclay, CEA, CNRS, NIMBE, Gif sur Yvette, France

⁴CINBIO, Universidade de Vigo, 36310 Vigo, Spain

⁵Department of Physics and Astronomy, Ohio University, Athens, OH, 45701 USA

It is shown that linearly polarized light can generate and control chiral near fields in geometrically achiral gold nanotriangles. Using plasmon-assisted 2-photon polymerization, near fields are recorded as permanent polymer structures. Polarization and wavelength tuning reveal transitions between achiral and chiral configurations linked to different plasmonic modes and symmetry breaking.

In nanoplasmonics, chirality plays a crucial role in the interactions between light and matter [1]. While the majority of research has focused on the interaction of chiral nanostructures with chiral light, recent studies reveals that achiral plasmonic nanostructures can exhibit chiral near fields under linearly polarized excitation [2].

To study this counterintuitive effect, we employed plasmon-assisted 2-photon polymerization as a tip-free near-field recorder that converts near fields into permanent 3D polymer nanostructures, [3] enabling direct readout (by SEM and AFM) of the near-field and its evolution with incident polarization angle and wavelength (see Fig. 1)

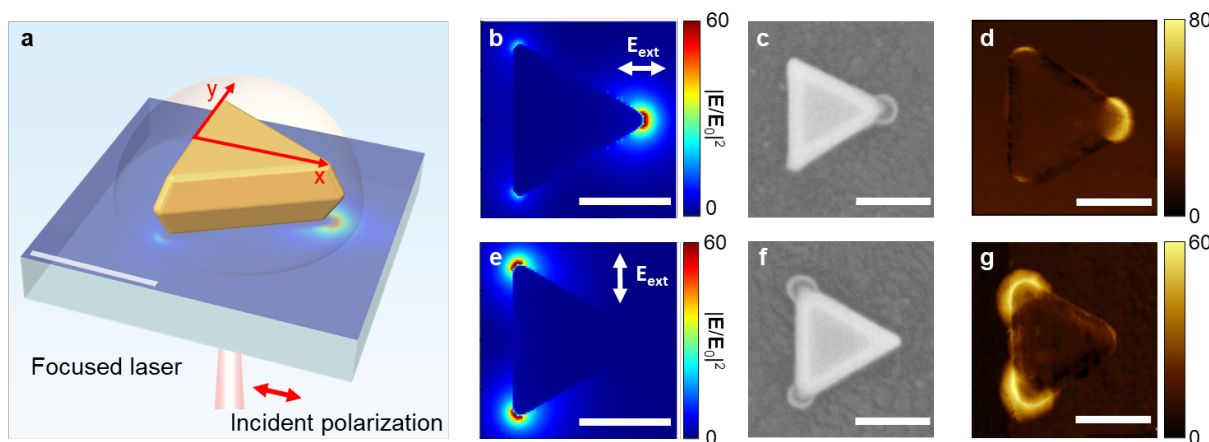


Figure 1 a) Schematic diagram of plasmon-triggered two-photon polymerization method. b) and e) FDTD-simulated intensity maps $|E/E_0|^2$ at $\lambda=780$ nm under different incident polarizations along the x and y directions (indicated by white arrows). c) and f) SEM images of individual gold nanoprisms after irradiation with different incident polarizations along the x and y directions at $\lambda=780$ nm. d) and g) are subtracted topographic AFM images obtained by subtracting the patterns before and after polymerization, reflecting the distribution of the polymer.

On C_{3v} -symmetry gold nanotriangles (NT), 2D symmetry breaking was quantified through the in-plane chirality factor V_{min} , defined from the loss of mirror symmetry of the polymer with respect to the three mirror planes of the NT and evaluated from both SEM images and FDTD simulations. Near-field dissymmetry maps (V_{NF} maps) derived from simulations and AFM images further resolved the redistribution of chiral hot spots (see Fig. 2). By jointly tuning polarization and wavelength, we revealed a controllable transition between achiral and chiral polymer configurations correlated with the modal composition of the plasmonic response (dipolar versus edge-dominated higher-order modes).

These results establish a practical route to engineer and permanently record polarization-tunable planar dissymmetry in achiral nanoantennas, with implications for chiral sensing, enantioselective photochemistry, and nanophotonic devices.

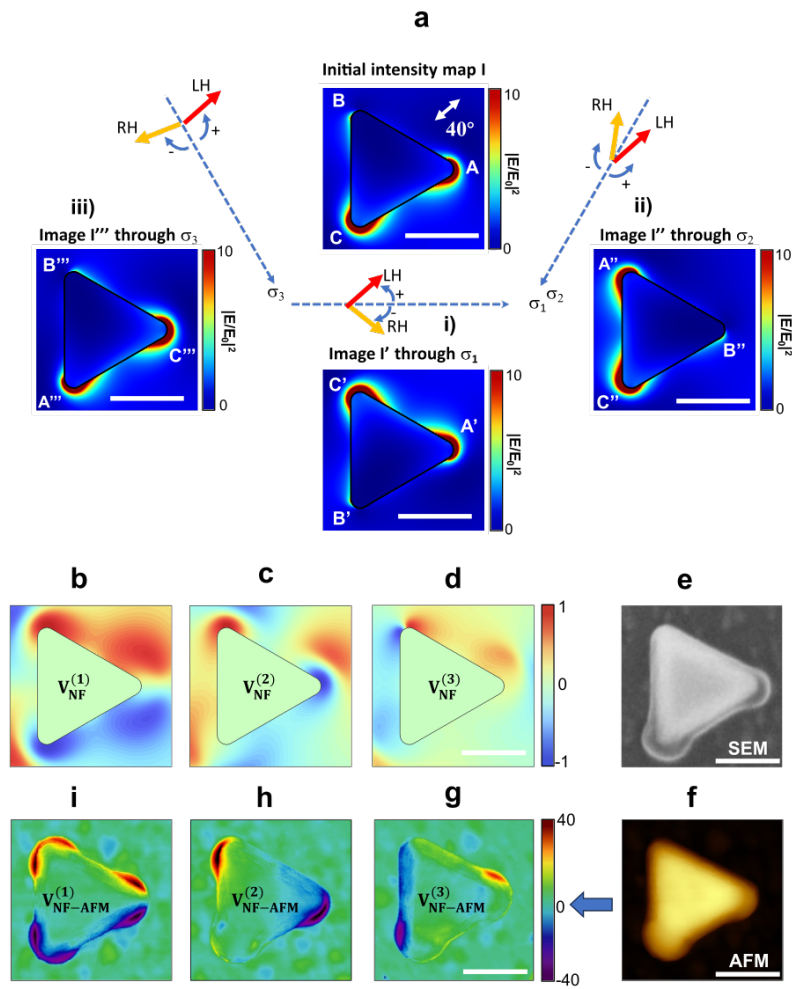


Figure 2- Concept of V_{NF} map under 40° linearly polarized excitation at 680 nm wavelength a) Calculated near-field intensity I its image I' , I'' , I''' through three mirror symmetry planes (σ_1 , σ_2 , σ_3 respectively), illustrated as cases (i), (ii), and (iii), respectively. The original triangle is labelled ABC, mirror-reflected structures with respect to σ_1 , σ_2 , and σ_3 are denoted as $A'B'C'$, $A''B''C''$, and $A'''B'''C'''$, respectively. The red arrow represents the actual incident polarization angle (left-handed linear polarization). The orange arrows represent the image of the incident polarization through the mirrors (right-handed linear polarization). The white scale bar represents 100 nm. b), c), d) $V_{NF}^{(1)}$, $V_{NF}^{(2)}$, and $V_{NF}^{(3)}$ maps calculated from Figure S9. e) SEM image measured after plasmon-assisted photopolymerization. f) AFM image measured after plasmon-assisted photopolymerization, see Figure S10. g), h), i) $V_{NF-AFM}^{(1)}$, $V_{NF-AFM}^{(2)}$, and $V_{NF-AFM}^{(3)}$ maps from AFM imaging map under 40° linearly polarized excitation at 680 nm wavelength a) Calculated near-field intensity I its image I' , I'' , I''' through three mirror symmetry planes (σ_1 , σ_2 , σ_3 respectively), illustrated as cases (i), (ii), and (iii), respectively. The original triangle is labelled ABC, mirror-reflected structures with respect to σ_1 , σ_2 , and σ_3 are denoted as $A'B'C'$, $A''B''C''$, and $A'''B'''C'''$, respectively. The red arrow represents the actual incident polarization angle (left-handed linear polarization). The orange arrows represent the image of the incident polarization through the mirrors (right-handed linear polarization). The white scale bar represents 100 nm. b), c), d) calculated $V_{NF-AFM}^{(1)}$, $V_{NF-AFM}^{(2)}$, and $V_{NF-AFM}^{(3)}$ maps. e) SEM image measured after plasmon-assisted photopolymerization. f) AFM image measured after plasmon-assisted photopolymerization, see Figure S10. g), h), i) $V_{NF-AFM}^{(1)}$, $V_{NF-AFM}^{(2)}$, and $V_{NF-AFM}^{(3)}$ maps from AFM imaging.

This work was supported by the French National Research Agency, the Région Grand Est and the European Union.

REFERENCES

- [1] M. Schäferling, "Chiral nanophotonics". Springer Series in Optical Sciences 2017, 205, 159.
- [2] S. Hashiyada et al. "Imaging Chirality of Optical Fields near Achiral Metal Nanostructures Excited with Linearly Polarized Light". ACS Photonics, Vol. 5, pp. 1486-1492, 2018.
- [3] X. Zhou et al. "plasmon-based photopolymerization: near-field probing, advanced photonic nanostructures and nanophotochemistry". J. Optics Vol. 16, pp 114002 (17 pages).

La mise en évidence du rôle des défauts en V dans l'amélioration du rendement des diodes électroluminescentes vertes

Camille Fornos¹, Tanay Tak², Wan Ying Ho², James S. Speck², Claude Weisbuch^{1,2}, Natalia Alyabyeva¹, Jacques Peretti¹, et Alistair Rowe¹

¹Laboratoire de physique de la matière condensée, CNRS, Ecole Polytechnique, IP Paris, 91128 Palaiseau, France

²Materials Department, University of California, Santa Barbara, California 93106, USA

Le rendement « à la prise » des diodes électroluminescentes (LED) à base des semi-conducteurs III-nitrides atteint presque 90 % dans les dispositifs émettant dans le violet [1]. En augmentant le taux d'indium dans les puits quantiques présents dans la zone de charge d'espace de ces LEDs, l'émission se décale vers des longueurs d'onde plus importantes, mais le rendement chute drastiquement et est inférieure à 10 % dans le rouge. Cette chute est aujourd'hui le verrouille principale à la production de sources de lumière blanche à haut rendement et le frein principal pour des applications tel que les afficheurs « micro-LEDs » ou l'éclairage public efficace [2].

Récemment [3], à l'université de Nanjing en Chine, des LEDs III-nitrides affichant des rendements records d'environ 40 % à 60 % dans le vert et le jaune ont été fabriqués. L'ingrédient clé de ce découvert semble être la présence d'une densité élevée, de quelques 10^8 cm^{-2} , de défauts dites « V-defects » typiquement de taille 100 nm à 300 nm. La production de lumière dans les LEDs se fait en trois étapes : (1) l'injection d'électrons et de trous dans la zone de charge d'espace, (2) la recombinaison de ces paires électrons-trous, partiellement par voie radiative, et (3) l'extraction des photons à l'extérieur du milieu haute indice de la LED. Chacun de ces étapes se passe avec une efficacité (en générale) inférieure à 100 %. Le gain de rendement « à la prise » des dispositifs fabriqués en Chine est dû à une augmentation de l'efficacité du premier étape, l'injection d'électrons et de trous dans la zone de charge d'espace dans la LED. En effet, la tension en direct (V_F) nécessaire pour la production de photons d'énergie $h\nu$, est d'environ 1 V plus petit que dans les LEDs dépourvues de « V-defects ». L'efficacité d'injection d'électrons et de trous se décrit $h\nu/qV_F$. Une baisse de V_F augmente cette efficacité jusqu'à la limite de 100 % où les électrons et les trous sont injectés au ras du gap.

En utilisant une technique originale de sonde locale – la microscopie d'électroluminescence par effet tunnel (STLM) – nous démontrons l'origine physique de cette hausse d'efficacité d'injection électrique [4]. La pointe du STLM est utilisée comme un injecteur local de trous. En effet, elle remplace un des deux contacts macroscopiques de la LED étudiée. La mesure des caractéristiques électriques locales montre une baisse de l'ordre de 1 V en V_F aux bords des « V-defects » par rapport aux plans c de la LED (voir figure), alors que le spectre d'électroluminescence local reste essentiellement inchangé. L'injection de charge est donc favorisée sur les facettes de « V-defects » comme le prévoyait des simulations numériques [5]. Nous présenterons les détails de nos mesures ainsi que la physique de l'injection de charge aux facettes des « V-defects ».

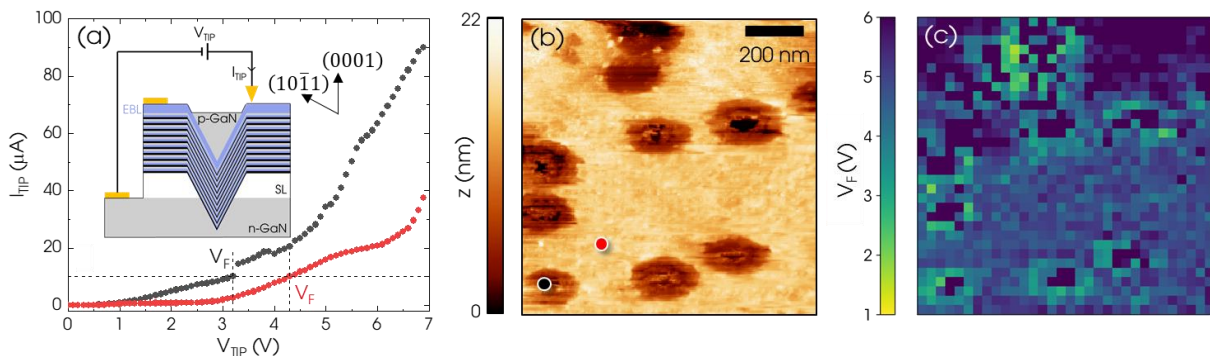


Figure 1 : (a) L'encadré montre l'hétérostructure LED étudiée dont les bords de « V-defects » exposés à la surface. En utilisant la pointe STLM comme injecteur local de trous, on obtient des caractéristiques courant-tension locales avec la pointe positionnée soit sur les bords des « V-defects » (courbe noire obtenue à l'emplacement du point noir sur la topographie illustrée en (b)), soit sur le plan c (courbe rouge avec la pointe STLM positionnée au point rouge en (b)). (c) Carte de la tension en direct (V_F) nécessaire pour injecter 10 μA dans la LED, montrant des valeurs systématiquement plus faibles au niveau des bords exposés des « V-defects » visibles en (b).

Références

- [1] Hurni, C. A. et al., *Applied Physics Letters* **2015**, *106*, 031101
- [2] Lin, C.-C. et al., *Journal of Physics: Photonics* **2023**, *5* 042502
- [3] Zhang, S. et al., *Photonics Research* **2020**, *8*, 1671
- [4] Fornos, C. et al., accepté *Physical Review Applied* **2026** (voir arXiv:2508.18025v4[physics.app-ph])
- [5] Li, C.-K. et al., *AIP Advances* **2016**, *6*, 055208

Contrôle des phénomènes optiques non linéaires sur des métamatériaux à base de nanorésonateurs

Sarah MUZARD, Lola GUENGUARD-MORINEAU, Sébastien BIDAULT, **Samuel GRESILLON**

*Institut Langevin, CNRS, ESPCI PSL et Sorbonne Université
1 rue Jussieu, 75005 Paris, France.*

La conversion non linéaire des fréquences optiques joue un rôle central dans de nombreux domaines, allant de la spectroscopie ultra-rapide[1] à la microscopie non linéaire [29] et à l'optique quantique [3], mais son efficacité reste généralement limitée par la faible réponse non linéaire des matériaux usuels. Pour pallier cette limitation, des approches classiques reposent sur l'adaptation de phase à des échelles bien supérieures à la longueur d'onde de la lumière. Ces stratégies permettent d'améliorer les rendements de conversion, mais au prix de dispositifs optiques volumineux ou de procédés de microfabrication complexes. Des avancées importantes ont été obtenues récemment grâce à des résonateurs optiques de taille submicronique, capables de confiner fortement le champ électromagnétique[4 - 7]. Cette forte localisation du champ permet d'augmenter significativement l'efficacité des processus non linéaires. Toutefois, ces structures sont en général conçues pour fonctionner à une longueur d'onde spécifique et nécessitent des techniques de nanofabrication sophistiquées..

Une approche alternative consiste à exploiter le désordre dans des milieux non linéaires[Baudrier04, Savo20]. Dans les systèmes non résonants, l'introduction d'un désordre structurel permet de relâcher les contraintes d'adaptation de phase, ouvrant ainsi la voie à une conversion de fréquence à large bande. Dans les systèmes résonants, le désordre peut également jouer un rôle bénéfique : le couplage aléatoire entre résonateurs peut conduire à des propriétés optiques sur une large gamme spectrale, tout en simplifiant les contraintes de fabrication. Par ailleurs, les milieux désordonnés diffusants offrent des degrés de liberté supplémentaires pour contrôler la propagation de la lumière, grâce à des techniques de mise en forme du front d'onde. Celles-ci permettent d'agir sur la distribution spatiale et temporelle du champ lumineux après propagation dans un milieu complexe[Vellekoop2007, Mounaix2016]. Dans ce cadre, nous avons montré que la mise en forme du front d'onde permet d'optimiser la luminescence non linéaire dans des systèmes plasmoniques désordonnés à base de métaux, en compensant le caractère apparemment aléatoire des nanostructures [Roubaud20, Roubaud21]. Afin de dépasser les limitations liées aux pertes optiques des métaux dans le visible et le proche infrarouge, nous proposons d'explorer des assemblages désordonnés de nanosphères colloïdales de phosphure de gallium (GaP). Ce matériau présente des résonances optiques de haute qualité, une absorption négligeable dans ces gammes spectrales (au-delà de 450 nm), ainsi que des non-linéarités quadratiques et une luminescence mesurable. L'objectif est d'exploiter la mise en forme du front d'onde dans ces milieux désordonnés afin de maximiser différents processus non linéaires, en particulier la génération de seconde harmonique (SHG) et les phénomènes de mélange à trois ondes, tels que la génération de somme de fréquences (SFG) ou la conversion paramétrique spontanée (SPDC).

Références

- [1] Y. R. Shen, *Proc. Nat. Acad. Sci.* 93 **1996**, 12104.
- [2] A. Zumbusch, G. R. Holtom, and X. S. Xie, *Phys. Rev. Lett.* 82 **1999**, 4142.
- [3] J. L. O'Brien, A. Furusawa, and J. Vučković, *Nat. Photonics.* **2009** (3) 687.
- [4] M. R. Shcherbakov, D. N. Neshev, B. Hopkins, A. S. Shorokhov, I. Staude, E. V. Melik-Gaykazyan, M. Decker, A. A. Ezhov, A. E. Miroshnichenko, I. Brener, A. A. Fedyanin, and Y. S. Kivshar, *Nano Lett.* 2014, (14) 6488.
- [5] D. Smirnova and Y. S. Kivshar, *Optica* **2016** (3) 1241.
- [6] S. Liu, M. B. Sinclair, S. Saravi, G. A. Keeler, Y. Yang, J. Reno, G. M. Peake, F. Setzpfandt, I. Staude, T. Pertsch, and I. Brener, *Nano Lett.* **2016** (16) 5426
- [7] R. Colom, L. Xu, L. Marini, F. Bedu, I. Ozerov, T. Begou, J. Lumeau, A. E. Miroshnichenko, D. Neshev, B. T. Kuhlmey, S. Palomba, and N. Bonod, *ACS Photonics* **2019** (6) 1295.
- [8] I. M. Vellekoop and A. P. Mosk, *Opt. Lett.* **2007** (32) 2309.
- [9] M. Mounaix, D. Andreoli, H. Defienne, G. Volpe, O. Katz, S. Gresillon, and S. Gigan, *Phys. Rev. Lett.* **2016** (116) 253901.
- [10] G. Roubaud, P. Bondareff, G. Volpe, S. Gigan, S. Bidault, and S. Grésillon, *Nano Lett.* **2020** (20) 3291.
- [11] G. Roubaud, S. Gigan, S. Bidault, and S. Grésillon, *ACS Photonics* **2021** (8) 1937.

A TIR-Based Multimodal Nanoscopy Platform for Correlative Imaging of Single Nano-Objects

David Talaga¹, Yuhan Huang¹, Gary S. Cooney¹, Thierry Buffeteau¹, R.A.L Vallée², Frédéric Adamietz¹, and Sébastien Bonhommeau¹

[1] Institut des Science Moléculaires, Université de Bordeaux, CNRS UMR 5255, 33400 Talence, France

[2] Centre de Recherche Paul Pascal, Université de Bordeaux, CNRS UMR 5031, 33600 Pessac, France

Email contact : david.talaga@u-bordeaux.fr

Keywords : Total Internal Reflection (TIR), Multimodal nanoscopy, Tip-Enhanced Raman Spectroscopy (TERS), Surface-Enhanced Raman Spectroscopy (SERS), Metal nanoparticles

We present a versatile multimodal nanoscopy platform enabling correlative imaging of individual nano-objects under total internal reflection (TIR) illumination, in both air and liquid environments. The system integrates TIR-based dark-field microscopy (DFM), atomic force microscopy (AFM), and Raman nanoscopy, providing complementary morphological, optical, and chemical information at the single-particle level. This approach allows quantitative characterization of the anisotropy of individual noble metal nanoparticles by probing their polarization-dependence of dark field rayleigh spectra (DFRS) and its correlation with particle morphology, orientation by AFM, and the intensity of surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) signals from molecules grafted onto their surface [1].

The instrument further enables nanoscale morphological, chemical, and structural imaging through tip-enhanced Raman spectroscopy in TIR (TIR-TERS), as well as molecular detection by SERS in TIR (TIR-SERS), achieving nanometric lateral resolution with TERS. Compared to the usual direct illumination, the TIR configuration enhances detected TERS and SERS signal intensities by approximately one order of magnitude [2]. TIR-TERS has demonstrated its capability for nanoscale chemical characterization of complex biological systems, including nucleic acids, proteins, and lipid assemblies, highlighting the suitability of enhanced Raman modalities for studies in liquid and biologically relevant environments [3,4].

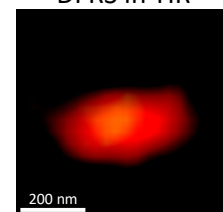
Overall, this TIR-based multimodal platform offers a powerful and flexible tool for high-resolution nanoscience and nanotechnology, enabling detailed correlative analysis across a wide range of nano-objects, including those in physiologically relevant aqueous conditions.

Imaging of individual nanoparticles

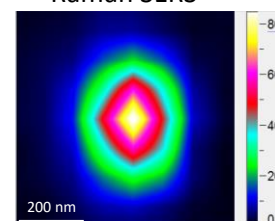
AFM



DFRS in TIR

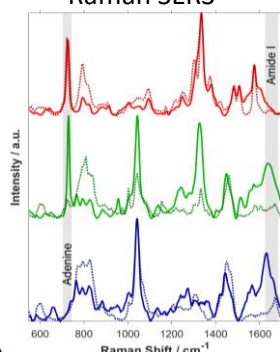


Raman SERS

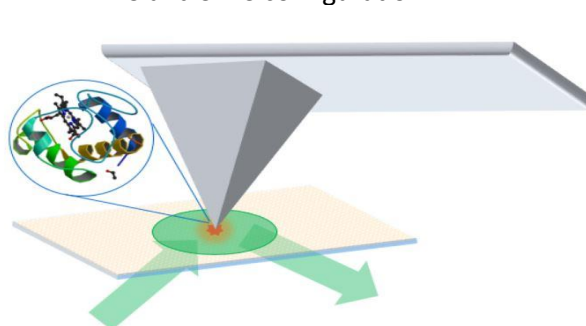


TERS and SERS in TIR of Tau protein and RNA cofactors

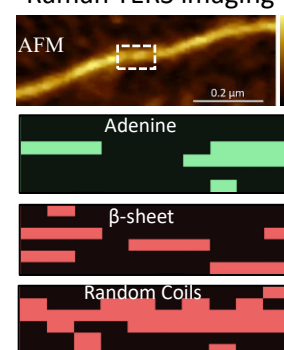
Raman SERS



TERS and SERS configuration in TIR



Raman TERS imaging



References :

[1] D. Talaga et al., *J. Opt.* 17, 114006 (2015), [2] D. Talaga et al., *J. Phys. Chem. B* 126, 27, 5024-5032 (2022), [3] G.Cooney et al, *Angew. Chem. Int. Ed.* 62, e202314369 (2023), [4] Y.Huang et al, *J. Phys. Chem. Lett.* 15, 10190-10197 (2024).

Electron confinement in ultrathin films of Pb on Ag(111) and electron interferometry. Model and experiments.

Pablo Garcia Cristobal¹, Calvin Tagne Kaegom¹, **Bertrand Kierren**¹, Oleg Kurnosikov¹, Luc Moreau, Yannick Fagot Revurat¹, Geoffroy Kremer¹ and Daniel. Malterre¹

¹ Institut Jean Lamour, Université de Lorraine, Nancy, France

Many studies report on electron confinement in thin metallic films, experimentally and theoretically as well [1-4]. In most of the cases, the energy of the quantum resonances that develop in the film can be predicted from the simple model known as “Phase Accumulation Model” (PAM). In this model the confined electrons accumulate phase shift not only due to the propagation in the film (leading to the thickness dependence of the phase) but also due to their reflections both at the surface of the film and at the interface between the film and the substrate. The latter phase shifts are both energy dependent, making the energy of the quantum resonances sensitive to the surface and interface properties. If a graphical solution of the PAM permit to predict the resonance energies, the full spectrum of resonances obtained from STS measurement can be simulated by using a Fabry Perot Model (FP) adapted to electrons [1]. In this communication we will compare the measured density of states obtained by low-T STS [5] and simulated spectra from the FP model for various thickness of Pb films on Ag(111). We will show how the model is sensitive to physical properties of the film like work function or lattice parameter relaxation. We will also show that the QWS can be modified by growing thin PbO islands on the top of the Pb films. Thank's to the spatial variation of reflection coefficient, the maps of the surface LDOS obtained by STS can reveal the structural arrangement of the Pb/PbO and Pb/Ag(111) buried interfaces.

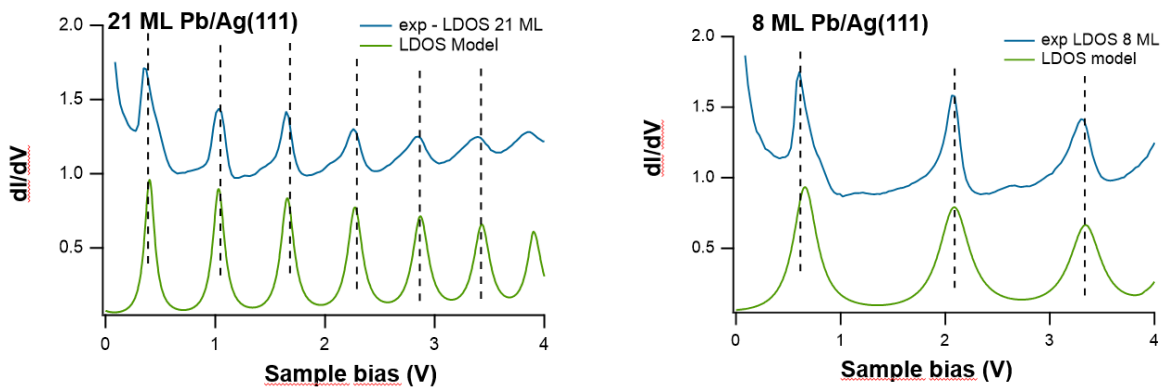


Figure.1. Comparison between the simulated (green) and the measured from STS (blue) local density of states in ultrathin films of Pb epitaxially grown on Ag(111). The simulated spectra are obtained from a Fabry Perot like model adapted to electrons.

- [1] T.-C. Chiang, Surf. Sci. Rep. **39**, 181 (2000).
- [2] N J Speer et al. - Science, 314, 804 (2006).
- [3] M. Becker and R. Berndt - Phys. Rev. B **81** (2010)
- [4] M.C. Yang et al. – Phys.Rev. Lett **102** (2009) 196102
- [5] C. Tagne Kaegom – PhD thesis (2024) – Université de Lorraine

Moiré-trapped polarons in the type-II multiferroic NiBr₂ monolayers

Valeria SHEINA¹, Emmanuel CALDERON², Arindam MUKHERJEE¹, Hugo LE DU¹, Robin SALVATORE¹, François DEBONDRIDDER¹, Marie D'ANGELO¹, Tristan CREN¹, Marie HERVE¹

¹Sorbonne Université – CNRS - Institut des Nanosciences de Paris UMR7588, 4 place Jussieu, Paris 75005, France

²Université Paris-Saclay, Laboratoire de Physique des Solides, 510 Rue André Rivière, 91400 Orsay, France

Transition metal dihalides (TMDHs) constitute a class of van der Waals materials exhibiting rich magnetic phase diagrams, making them promising candidates for next-generation spintronic and magnetoelectric applications [1-5]. In the bulk NiBr₂ displays in-plane ferromagnetic ordering with antiferromagnetic interlayer coupling [1]. At low temperatures, competing exchange interactions and magnetic frustration stabilize a non-collinear helimagnetic ground state, accompanied by Type-II multiferroicity [1,2,4]. In the monolayer limit, these magnetic and electronic properties could be strongly modified by substrate-induced effects, including strain, chemical alternation, and charge transfer [3,4].

In addition, a monolayer TMDHs can host intrinsic polarons—composite quasiparticles formed when an excess charge carrier is localized by self-induced lattice distortions. Unlike historically studied polarons pinned to extrinsic defects, these intrinsic states emerge in defect-less lattices through a cooperative interplay between electron-phonon coupling and electron-electron interactions [5].

In this work, we employ low-temperature spin-polarized scanning tunneling microscopy (STM) and spectroscopy (STS) to investigate the properties of monolayer NiBr₂ grown epitaxially on Au(111) and HOPG. Our findings highlight three key observations: we resolve a Moiré pattern arising from non-commensurate lattice interference between the NiBr₂ and the underlying substrates. We identify in-gap states characterized as polarons (Figure 1). By applying high-bias voltage pulses, we demonstrate the local manipulation of individual polarons, showing that their site-to-site hopping and lateral movement are strictly governed by the Moiré sites.

These results establish the NiBr₂ interface as a robust platform for the chemically engineered control of localized charge density and magnetoelectric phases at the atomic scale.

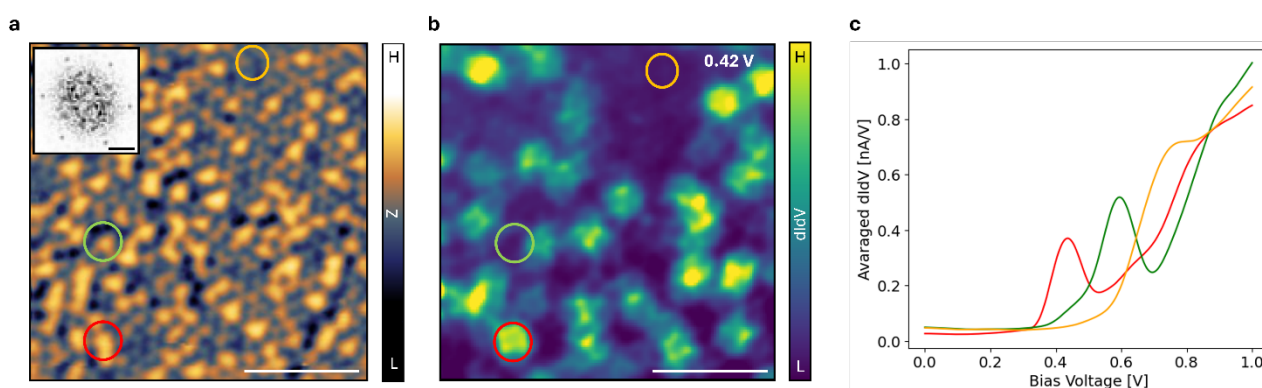


Figure 1: a. STM topography of 1ML NiBr₂/Au(111) ($V_{bias} = 1$ V, $I_{set} = 100$ pA, $T = 4.2$ K). Scale bar : 10nm. Inset : 2D FFT with scale bare of 0.5 nm⁻¹. b. Conductance map measured at 0.42 mV of the same region as in (a). Scale bar: 10 nm. c. Averaged conductance spectra measured in the three circled regions marked in (a) and (b), shown in matching colors.

Références

- [1] Botana, A. S. *et al. Phys rev materials* **2019**, 3, 044001
- [2] Cahlik, A. *et al. arXiv* **2026**, 2601.20713v1
- [3] Miao, M.-P.; *et al. PNAS* **2025**, 122, 29
- [4] Bikaljević, D. *et al. ACS Nano* **2021**, 15/9, 14985
- [5] Cai, M. *et al. Nat Commun* **2023**, 14, 3691