



HAL
open science

Electrodes transparentes à base de réseaux de nanofils de cuivre : propriétés électriques de jonctions uniques

Andela Križan, Laetitia Bardet, Kévin Zimny, Martin Romanus, Maxime Berthe, Christine Labrugère-Sarroste, Daniel Bellet, Mona Tréguer-Delapierre

► To cite this version:

Andela Križan, Laetitia Bardet, Kévin Zimny, Martin Romanus, Maxime Berthe, et al.. Electrodes transparentes à base de réseaux de nanofils de cuivre : propriétés électriques de jonctions uniques. Forum des microscopies à sonde locale 2025, Mar 2025, Spa, Belgique. <hal-05108373>

HAL Id: hal-05108373

<https://hal.science/hal-05108373v1>

Submitted on 11 Jun 2025

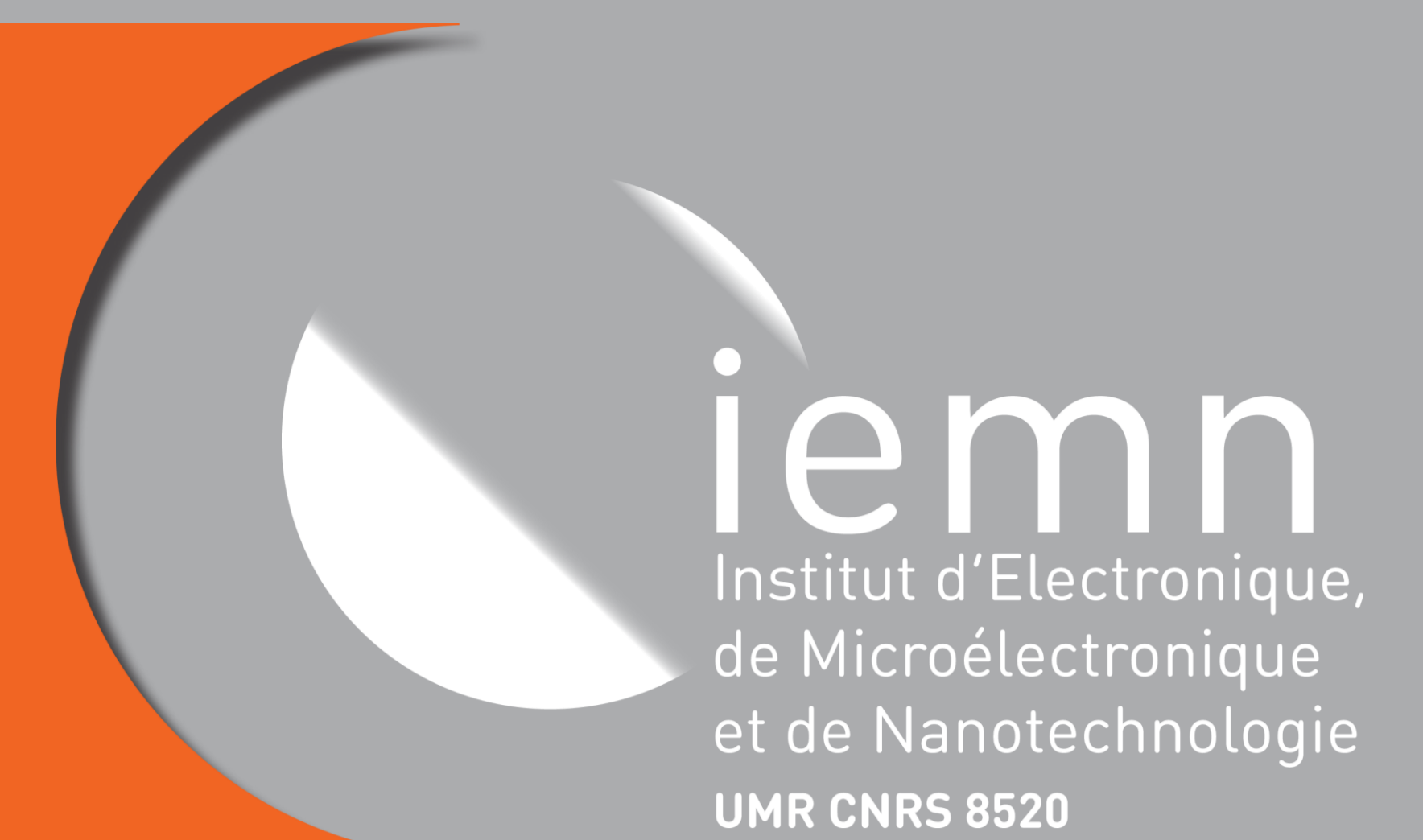
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Electrodes transparentes à base de réseaux de nanofils de cuivre : propriétés électriques de jonctions uniques



Andela Križan,¹ Laetitia Bardet,² Kevin Zimny,¹ Martin Romanus,¹ Maxime Berthe,³ Christine Labrugère-Sarroste,⁴ Daniel Bellet,² Mona Tréguer-Delapierre^{1*}

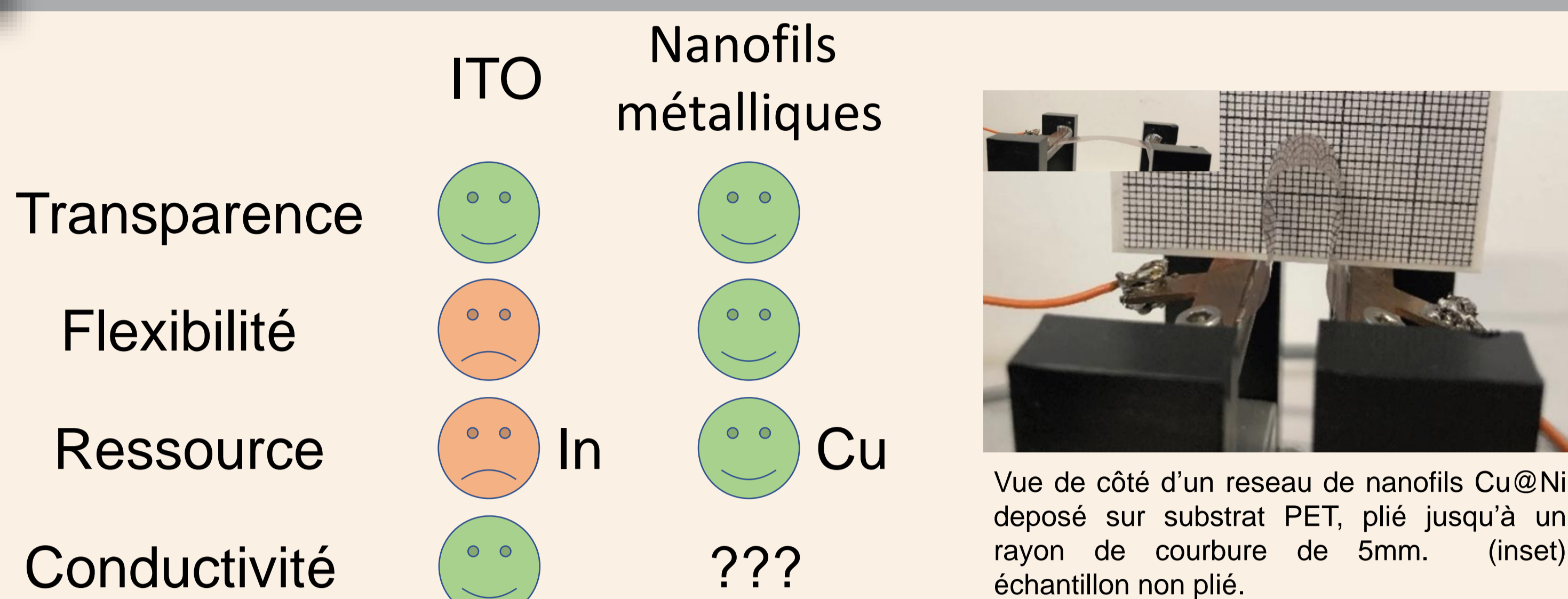
1. Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, ICMCB, UMR 5026, F-33600 Pessac, France

2. Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, LMG, 38000 Grenoble, France

3. Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, Univ. Polytechnique Hauts-de-France, Junia-ISEN, UMR 8520 - IEMN, F-59000 Lille, France

4. Univ. Bordeaux, CNRS, PLACAMAT, UAR 3626, 87 avenue du Dr Albert Schweitzer, 33608 Pessac Cedex, France

Electrodes transparentes souples

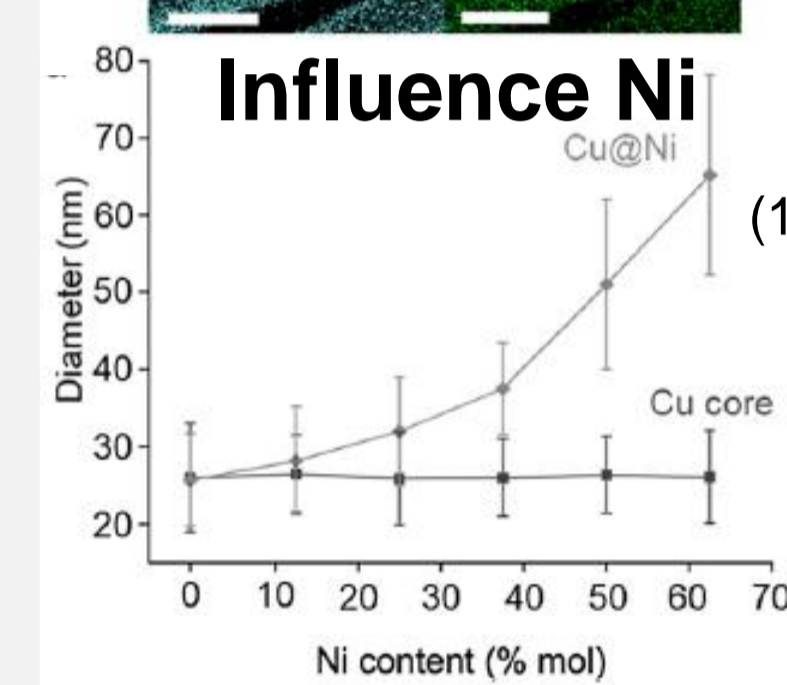
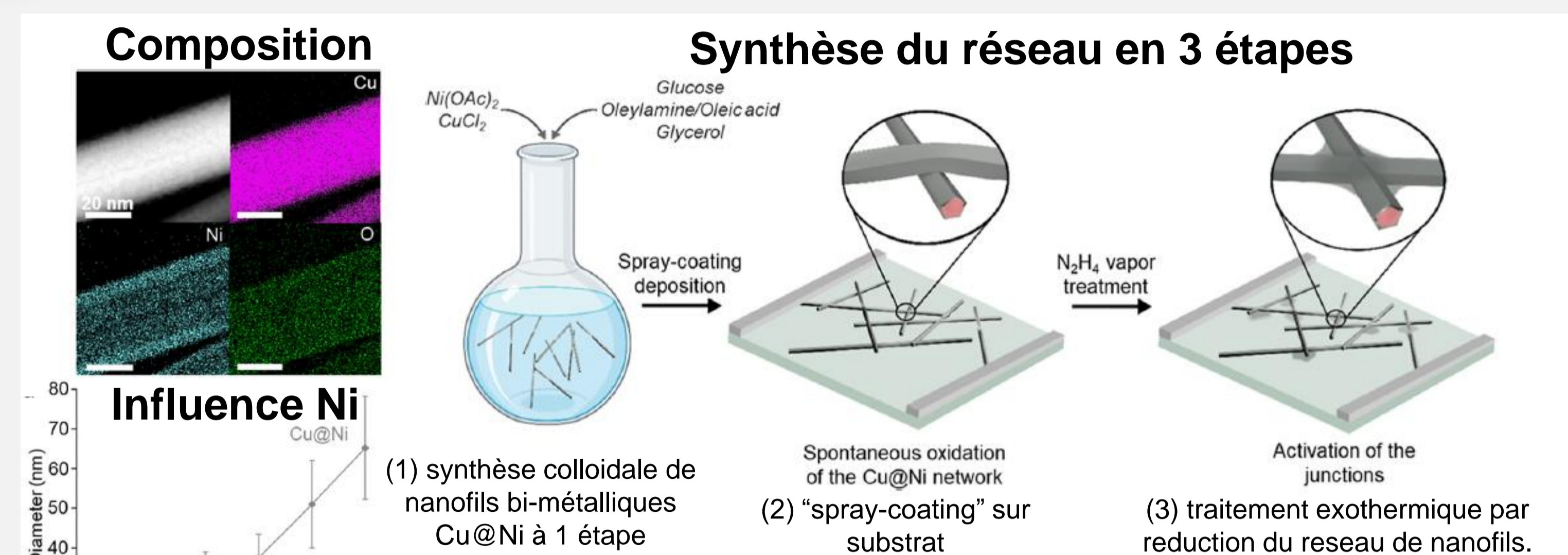


Que ce soit pour l'interactivité d'un écran tactile, la transparence et le rendement d'une cellule solaire ou l'intensité d'une diode électroluminescente, les matériaux transparents et conducteurs ont révolutionné les usages récents de l'électronique. Le matériau roi de la catégorie, l'ITO (Indium-Tin Oxide), [1] souffre cependant d'une grande fragilité et dépend de ressources trop limitées en Indium pour le rendre attractif dans la future génération d'électronique flexible.

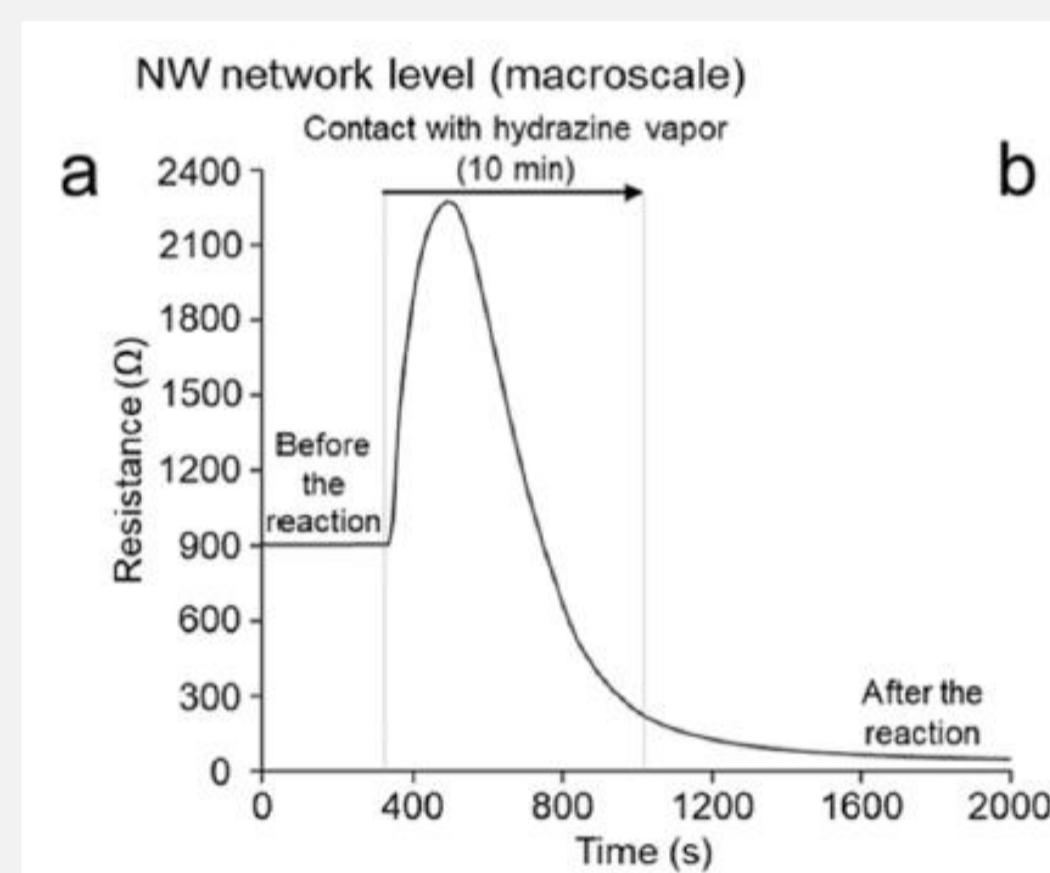
Les métaux nanostructurés sont au contraire une opportunité pour la production d'électrodes souples, et même extensibles, possédant une conductivité électrique élevée combinée à une grande transparence. Des réseaux de nanofils d'argent ont déjà atteint une transparence optique de 90% combinée à une résistance aussi faible que 10 Ω/sq [2] mais le matériau reste rare et non viable pour une utilisation à grande échelle [3] [4]. Le Cuivre est un matériau 1000 fois plus abondant que l'argent tout en étant très conducteur [5] mais les nanofils de cuivre sont très instables à l'air [6].

La solution proposée dans cette étude est l'utilisation de nanofils bimétalliques au cœur de cuivre protégé par une coquille anticorrosive de nickel [7].

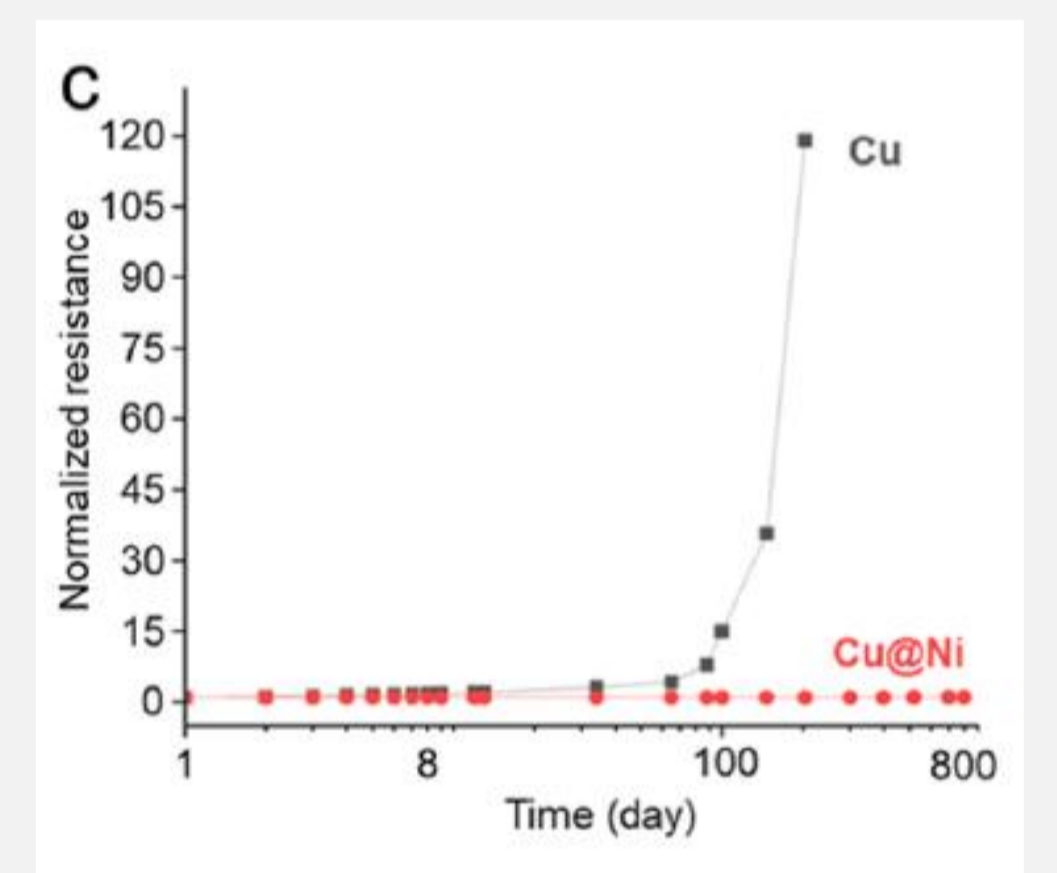
Synthèse et propriétés du réseau



(haut) Image TEM "Dark field" et mapping élémental EDX (Cu, Ni, O) d'un NW (xNi = 50% mol), démontrant la morphologie cœur-coquille.
(bas) Evolution du diamètre du cœur Cu et de l'épaisseur de la coquille Ni en fonction de la concentration en nickel.



Evolution de la résistance électrique d'un réseau de nanofils Cu@Ni avec une épaisseur de coquille de nickel de 10 nm (xNi = 50% mol) pendant le traitement de réduction exothermique (10 min).



Résistance électrique normalisée en fonction du temps pour des réseaux de nanofils Cu pur et Cu@Ni exposés à conditions atmosphériques ambiantes.

Les réseaux résultants présentent une transmittance optique de 80 % et une résistance de feuille de 10 Ω/sq avec une stabilité record de plus de 2 ans.

Propriétés électriques de jonctions uniques de nanofils

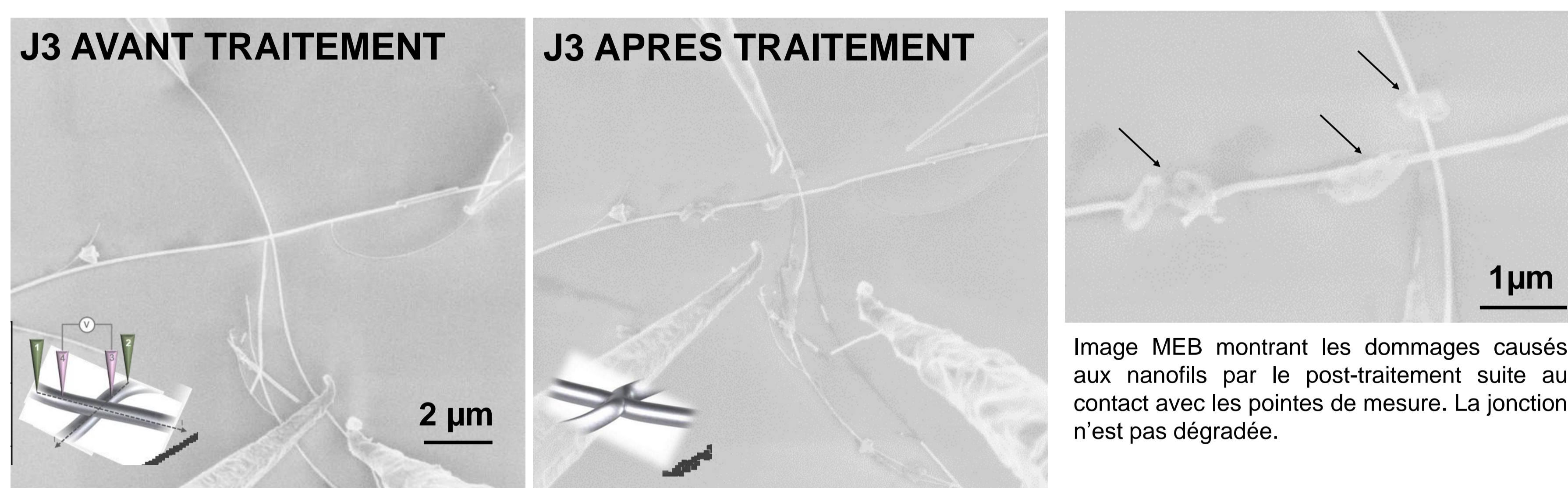


Image MEB de la configuration de la mesure 4 pointes sur la même jonction de nanofils, avant (gauche) et après (droite) le post-traitement.

	1	2	3	4	5	6	7	8
R _i before hydrazine treatment (Ω)	361	1245	77011	358	45558	358		
R _i after hydrazine treatment (Ω)	113		27	97			142	264

Evolution de la résistance avant/après post-traitement pour 8 jonctions d'un réseau de nanofils Cu@Ni avec une épaisseur de coquille de nickel de 10nm (xNi=50% mol). Les jonctions 2, 5 et 6 n'ont pas pu être mesurées après post-traitement à cause de leur endommagement suite au contact avec les pointes de mesure.

La réaction exothermique induit une réduction de la résistance à l'échelle de la jonction.

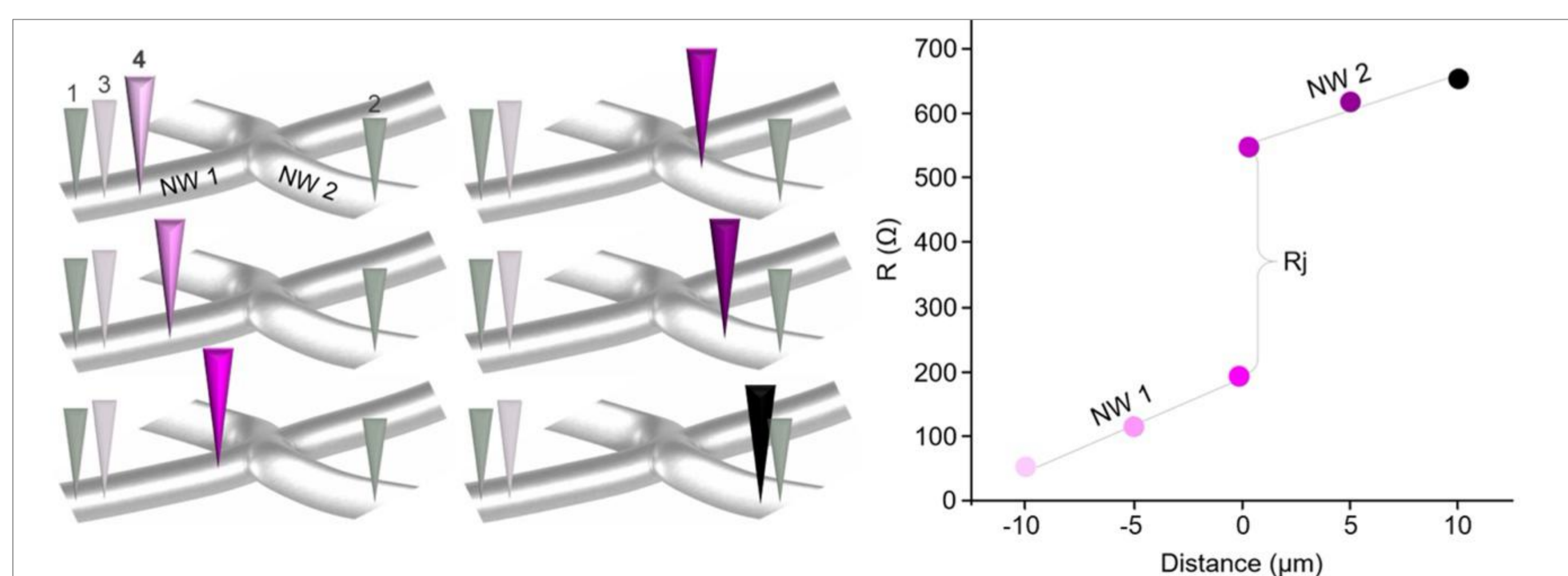
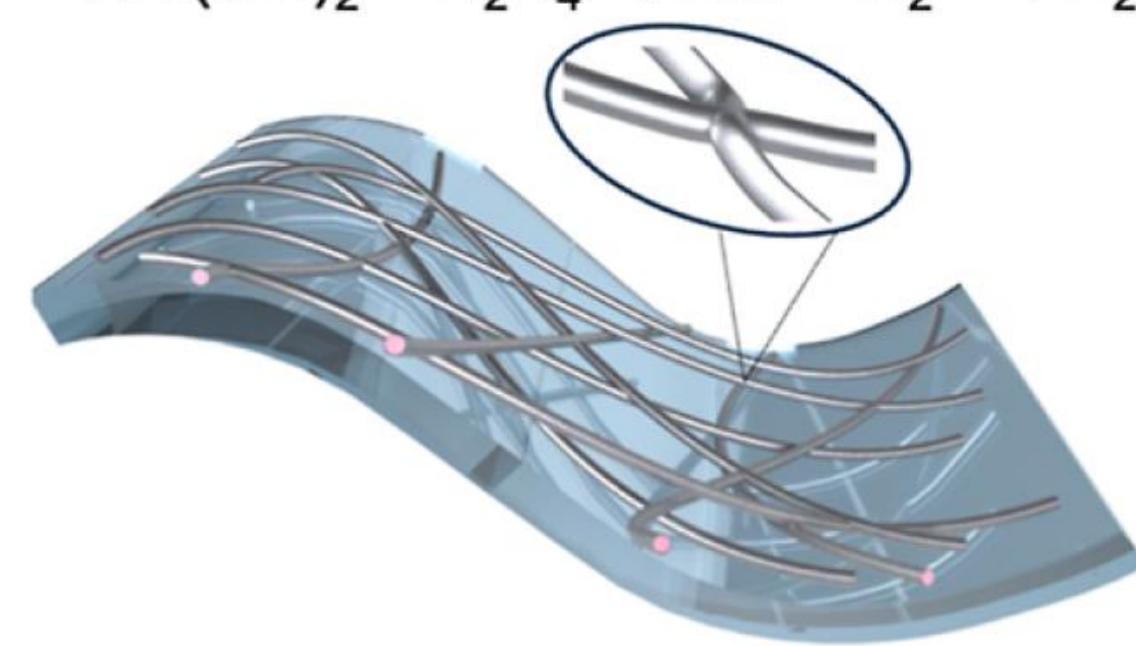
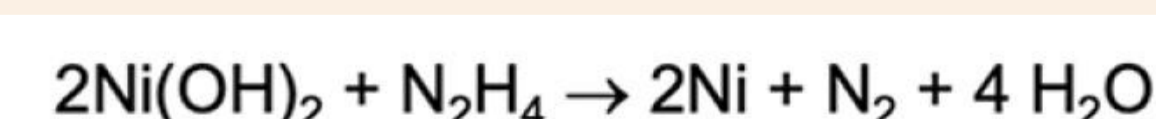


Illustration de la mesure électrique de jonctions uniques. A gauche, schéma de positionnement des pointes sources de courant (1 et 2) et sondes de tension (3 et 4) lors d'une série de mesures représentée à droite. La mesure représente la résistance de la section comprise entre les pointes 3 et 4. La pointe 4 se déplace le long des fils en passant sur la jonction dont la résistance peut être mesurée directement sur le graphe à la distance 0. La conductivité de chaque fil peut également être déterminée par la différence entre deux mesures à distances différentes sur le même fil.

Conclusion

Réaction exothermique de réduction de la couche d'oxyde et soudage de la jonction métal-métal



Réseaux de nanofils Cu@Ni

Conductivité 😊

Très bonne conductivité obtenue par soudage des jonctions entre nanofils sans traitement invasif [8].

Références

- [1] Lu, X.; Zhang, Y.; Zheng, Z. *Adv. Electron. Mater.* **2021**, *7*, 2001121.
- [2] Nguyen, V.H.; Papanastasiou, D.T.; Resende, J.; Bardet, L.; Sannicola, T.; Jiménez, C.; Muñoz-Rojas, D.; Nguyen, N.D.; Bellet, D. *Small* **2022**, *18*, 2106006.
- [3] Zhang, Y.; Kim, M.; Wang, L.; Verlinden, P.; Hallam, B. *Energy Environ. Sci.* **2021**, *14*, 5587.
- [4] Hallam, B.; Kim, M.; Zhang, Y.; Wang, L.; Lennon, A.; Verlinden, P.; Altermatt, P.P.; Dias, P.R. *Prog. Photovolt.: Res.* **2022**, *31*, 598.
- [5] Li, Z.; Chang, S.; Khuje, S.; Ren, S. *ACS Nano* **2021**, *15*, 6211.
- [6] Patil, J.J.; Woo Ri Chae; Trebach, A.; Carter, K.-J.B.; Wai, E.; Sannicola, T.; Grossman, J.C. *Adv. Mater.* **2021**, *33*, 2004356.
- [7] Križan, A.; Zimny, K.; Guyonnet, A.; Opeyemi Idowu, E.; Duguet, E.; Plissonneau, M.; d'Alençon, L.; Le Mercier, T.; Tréguer-Delapierre, M. *Nano Ex.* **2023**, *4*, 042001.
- [8] Križan, A.; Bardet, L.; Zimny, K.; Romanus, M.; Berthe, M.; Labrugère-Sarroste, C.; Bellet, D.; Tréguer-Delapierre, M. *ACS Nano* **2024**, *18* (51), 34902.

