

## Matériaux 2D sous irradiation pour des fonctionnalités de demain

2D materials under irradiation for tomorrow's functionalities

DRF/IRAMIS/CIMAP/MADIR

Directrice de thèse : Clara GRYGIEL

Co-directeur de thèse : Henning LEBIUS

Encadrant CEA : Stéphane GUILLOUS

Laboratoire : CIMAP, UMR 6252, site GANIL, Bd Henri Becquerel, Caen

Devant les enjeux liés au réchauffement climatique, certaines voies sont au cœur d'études en recherche fondamentale pour optimiser notamment les propriétés de matériaux à grande surface spécifique pour la captation de gaz ( $\text{CO}_2$  par ex.), la filtration, le dessalement ou la conversion de l'eau en  $\text{H}_2$  par photocatalyse. Des matériaux bidimensionnels nanostructurés (graphène,  $\text{MoS}_2$ , hBN, etc) ont récemment montré des propriétés uniques et originales permettant d'améliorer l'efficacité de ces processus, dont un des procédés d'élaboration de structuration est obtenu par irradiation aux ions. [1] L'élaboration et les analyses de matériaux fonctionnels nanostructurés par faisceaux d'ions sont des techniques très largement répandues dans la plupart des domaines liés aux nanosciences et nanotechnologies.

L'irradiation par les ions lourds rapides comme ceux produits sur l'accélérateur GANIL ou par les ions de basse énergie produits sur le dispositif PELIICAEN du CIMAP, induit des modifications de surface à l'échelle nanométrique. [2, 3] En jouant avec la nature et l'énergie de l'ion, l'angle d'incidence d'irradiation, en utilisant soit des impacts individuels d'ions soit un effet collectif par recouvrement d'ions mais également en utilisant des microfaisceaux, il est possible d'élaborer de manière reproductible et contrôlée des structures de surfaces pouvant présenter des propriétés originales. [4] L'introduction de modifications à la surface des matériaux peut être utilisée pour adapter leurs propriétés à des exigences spécifiques. Par exemple, l'irradiation de matériaux lamellaires ou 2D comme le graphène, permet de créer de façon rapide, efficace et contrôlée une porosité et une perméabilité façonnant ainsi des membranes sélectives pouvant être utilisées pour la filtration et le dessalement de l'eau. [5] En créant des défauts par irradiation aux ions sur des "flocons" de disulfure de molybdène ( $\text{MoS}_2$ ) de tailles micrométriques, il est possible de contrôler précisément l'effet d'adsorption du  $\text{CO}_2$  en optimisant la taille et la répartition des pores dans le matériau bidimensionnel [6]. Ces 2 derniers matériaux (graphène et  $\text{MoS}_2$ ) contribuent aussi aux études pour la production d'hydrogène par photocatalyse de l'eau [7, 8]. En jouant sur les angles d'incidences des ions et la nature des substrats, il est possible d'obtenir des nanostructures différentes comme des chaînes de nanobosses, des découpes localisées du matériau 2D comme de l'origami ou bien encore des ondulations. [4, 9]

Fort de notre expérience sur le contrôle des propriétés de surface de matériaux [10, 11, 12] et du parc instrumental unique du laboratoire, nous proposons au travers de ce sujet de thèse d'accéder à une meilleure compréhension des processus impliqués dans la structuration par faisceaux d'ions et la modification des propriétés de matériaux 2D en fonction de l'influence des différents paramètres d'irradiation sur les modifications radio-induites locales dans du graphène et du disulfure de molybdène notamment. Nous étudierons ces matériaux déposés sur différents substrats ainsi qu'auto-

supportés, dont les évolutions de propriétés induites par irradiation seront caractérisées par des techniques de pointes de mesures de surface. Ces mesures devraient confronter les effets induits par des ions hautement chargés de basse énergie avec des ions lourds rapides. Les expériences d'irradiation ainsi que la majorité des caractérisations des matériaux et de leurs surfaces ainsi modifiées seront effectuées sur le site de Caen : accélérateur GANIL, implanteur ionique PELIICAEN et ses techniques de caractérisations in-situ, microscope en champ proche pour matériaux irradiés, microscopes électroniques à balayage ou en transmission, diffractomètre de rayons X,  $\mu$ Raman,  $\mu$ Photoluminescence et cathodoluminescence. Des études complémentaires impliquant par exemple la préparation de matériaux 2D pourra être réalisée grâce à nos collaborations internationales, notamment Prof. Schleberger de l'Université de Duisburg-Essen.

- [1] Y. Wang et al., *Mater. Adv.*, 2022, 3, 3389; Y. Wang et al, *Mater. Adv.*, 2022, 3, 7384; M. Schleberger and J. Kotakoski. "2D Material Science: Defect Engineering by Particle Irradiation". en. *Materials* 11, (2018), 1885. doi: 10.3390/ma11101885.
- [2] J. Rangama et al., *Nuclear Physics News*,2022,32(1),pp.29-33
- [3] M. Lalande et al., *Rev. Sci. Instrum.* 93 (4) (2022) 043703
- [4] Aumayr et al, *J. Phys.: Condens. Matter* 23 (2011) 393001; Akcoltekin et al, *Nature Nanotech.* 2 290 (2007)
- [5] Liu, Gongping. et al., *Angewandte Chemie* 2016, 43, 13384–133397; Gogoi, A. et al., *Journal of Membrane Science* 2018, 563, 785–793 ; Madauß, L. et al., *2D materials* 2017, 4, 15034
- [6] Aguilar et al, *J. Phys. Chem. C* (2019), 123, 26338–26350
- [7] Xie et al, *Adv. Mater.* (2013), 25, 3820–3839
- [8] Gupta et al, *Nano Energy* 41 (2017) 49–65
- [9] Ochedowski et al, *NIM B* 314, 18 (2013)
- [10] E. Gruber et al., *J Phys Condens Matter* 30, 285001 (2018) ; M. Ghosh et al., *Langmuir* 36, 7400 (2020) ; T ; Foller et al., *Nano Lett* 22, 4941 (2022) ;
- [11] L. Madauß et al., *Nanoscale* 9 (2017) 10487
- [12] R. Rahali et al., *Materialia* 27 (2023) 101696