

Sujet thèse / PhD subject 2026

Titre Thèse	Etude de la Croissance de Matériaux 2D en Conditions Ambiantes pour la Fabrication de Dispositifs Electroniques Performants et Eco-responsables.	
PhD Title	On Studing 2D Material Growths in Ambient Conditions for Performing and Ecoresponsible Electronic Device Manufacturing.	
(Co)-Directeur	Sébastien Pecqueur (CR-HDR)	E-mail : sebastien.pecqueur@iemn.fr
(Co)-Directeur	Nataliya Kalashnyk (Prof)	E-mail : nataliya.kalashnyk@iemn.fr
(Co)-Encadrant (s)		E-mail :
Laboratoire	IEMN	Web : https://www.iemn.fr/
Groupe(s)	NCM	Web : https://www.iemn.fr/la-recherche/les-groupes/groupe-ncm
Projet phare principal	Matériaux	
Financement acquis Oui ☐ Non ☒ Partiel ☐	Si acquis (total ou partiel), préciser : (contrat, organisme, Université étrangère...) :	
Financement demandé	Contrat Doctoral Etablissement	ULille ☒ Centrale Lille ☐ JUNIA ☐
	Région ou Autre ☐ Préciser :	Co financement (Préciser l'origine, demande en cours, et si acquis ou pas) :

Résumé en français (english abstract on the next page)

Les matériaux bidimensionnels (2D) et les réseaux covalents organiques de surface (SCOFs) sont non-seulement exceptionnels pour l'électronique, mais aussi pour des applications avancées dans la purification/désalinisation de l'eau, la détection de gaz, la récupération d'énergie solaire et le stockage d'énergie à forte capacité. Leurs structures uniques et le contrôle de leurs propriétés pourraient jouer un rôle déterminant dans les technologies durables pour l'évaluation de la pollution environnementale et la production d'énergies vertes, entre autres. Cependant, les techniques de fabrication conventionnelles pour de tels objets, précis dans leur échelle atomique, dépendent notamment des méthodes de fabrication telles que l'épitaxie par jet moléculaire (MBE) ou le dépôt chimique en phase vapeurs (CVD), qui requièrent des équipements sophistiqués, des niveaux de pression ultra-vide (UHV) et ont de forts besoins en énergie et matériaux, ce qui augmente significativement leur coût de production et leur mise à l'échelle. La manufacture additive électrochimiquement assistée d'un autre côté peut être un moyen de déposer des semi-conducteurs stratégiques sur des puces en silicium en utilisant l'électrochimie : quelques volts et microcoulombs par dispositif suffisent à co-intégrer des polymères conducteurs avec un rendement approchant les 100% dans des conditions ambiantes, générant presque pas de déchets et utilisant des solvants non-toxiques (Moustiez et al 2025)*.

Ce projet vise d'abord à étudier la faisabilité à électrogénérer des matériaux 2D (ou SCOFs) directement sur des dispositifs en silicium et ensuite identifier une nouvelle classe de polymères semi-conducteurs ne pouvant être synthétisé via des procédés chimiques standards pour le dépôt par voie humide. Pour y arriver, des monomères spécifiques seront synthétisés à l'IEMN, conçus pour leur planarité, leur délocalisation pi-sigma-pi intégrale, et leur réticulabilité sur une surface plane en 2D. D'une part, le dépôt de ces monomères sera effectué sur des surfaces métalliques sous ultra-vide (UHV) avec des cellules de Knudsen, avant un recuit thermique pour activer leur réaction intermoléculaire sur surface et former des matériaux 2D ou SCOFs. Ces monocouches moléculaires seront caractérisées in situ par microscopie à effet tunnel (STM) et à force atomique sans contact (nc-AFM) pour élucider leur morphologie et confirmer leur nature 2D stricte à l'échelle d'une monocouche, alors que la spectroscopie à effet tunnel (STS) permettra d'évaluer localement leur structure électronique. D'autre part, des micro-électrodes seront fabriquées (via lithographie à faisceau d'électrons en salle blanche) pour électropolymériser les monomères dans des conditions douces et à petite échelle sur des puces en silicium, pour en étudier les propriétés électriques et électrochimiques de ces matériaux 2D et électrogénérés. Des performances de matériau seront extraites (telles que la conductivité électrique et la mobilité des trous) comme des performances de dispositif (tension de seuil de transistor, stabilité du courant dans le temps et dans des conditions environnementales diverses) pour démontrer l'applicabilité de ces matériaux pour l'électronique.

Ce sujet se situe à l'interface entre les sciences des matériaux, l'électrochimie et la micro-nanofabrication dans une équipe de recherche multi-disciplinaire. Le(la) candidat(e) au doctorat (niveau master ou diplômé ingénieur(e)) sera intégré(e) au groupe NCM de l'Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (iemn.fr). Le(la) candidat(e) devra avoir un intérêt particulier pour les sciences interdisciplinaires et une curiosité à comprendre le contexte actuel et les enjeux sociétaux guidant la recherche de nouveaux matériaux pour la micro-électronique. Idéalement, un(e) scientifique de la matière condensée avec une formation en électrochimie et de l'expérience en salle-blanche, et/ou aux techniques de caractérisations en champs proche sera requise pour mener à bien ces recherches.

Two-dimensional (2D) materials and surface covalent organic frameworks (SCOFs) are exceptional not only for electronics, but also for advanced applications in water purification/desalination, gas sensing, solar energy harvesting, and high-capacity energy storage. Their unique structures and tunable properties could play a pivotal role in sustainable technologies, supporting green energy policies, mitigating environmental pollution, etc. However, conventional fabrication techniques for such atomically precise structures typically relies on deposition methods such as molecular beam epitaxy (MBE) or chemical vapor deposition (CVD) demanding sophisticated instrumentation, ultra-high vacuum (UHV) conditions, and significant energy and material resources, which limit scalability and increase cost. Electrochemically-assisted additive manufacturing on the other hand can be a mean to deposit strategic organic semiconductors on silicon microchips using electrochemistry: few volts and microcoulombs per devices suffice to cointegrate conducting polymers in a near 100% yield in ambient conditions, generating almost no waste and using non-toxic solvents (Moustiez et al 2025)*.

This project first aims to study the feasibility of electrogenerating 2D materials (or SCOFs) directly on silicon devices and subsequently to identify a new class of semiconducting polymers that cannot be synthesized by standard chemical method for wet deposition. To achieve this, specific monomers will be synthesized at IEMN, designed to promote planarity, full pi-sigma-pi orbital delocalization, and 2D crosslinkability on a flat surface. On the one hand, the deposition of monomers will be carried out under ultra-high vacuum (UHV) conditions using a Knudsen cell onto a metallic surface, followed by thermal annealing to induce on-surface intermolecular reactions leading to the formation of extended 2D materials or SCOFs. The resulting monolayer structures will be characterized in situ by scanning tunneling microscopy (STM) and non-contact atomic force microscopy (nc-AFM) to elucidate their morphology and confirm their strictly 2D nature at the monolayer level, while scanning tunneling spectroscopy (STS) will be employed to probe their local electronic structure. On the other hand, microelectrodes will be fabricated (eBeam lithography in cleanroom) to electropolymerize the monomers in soft conditions and at small scale on a silicon chip, to study the electrical and electrochemical properties of electrogenerated 2D materials in their bulk. Key material performances shall be extracted (such as electrical conductivity, hole mobility) as well as device-level performances (transistor threshold voltage, current stability over time and under various environment conditions) will be assessed to demonstrate the applicability of the identified new class of materials in electronics.

This topic lies at the interface between material sciences, electrochemistry and micro-nanofabrication in a multidisciplinary research team. A doctoral candidate (master level or graduated engineer) will integrate the NCM group at the Institute of Electronics, Microelectronics and Nanotechnology (iemn.fr). The candidate shall have a genuine interest for interdisciplinary sciences and curiosity to understand the current societal context driving material science researches for microelectronics manufacturing. Ideally, a material scientist with a good training on electrochemistry with experience in a cleanroom environment and/or near-field characterization techniques is required to carry out this research.

* Moustiez et al. [ECS Sens. Plus](#) 4(4) 044401 (2025)