GN MEBA

Groupement National de Microscopie Electronique à Balayage et de microAnalyses

Société Française de Physique

En convention de coopération avec la Société Française de Physique

Journées pédagogiques 2026 du GN-MEBA

Intelligence artificielle, deep learning, API, logiciels libres : comment ces outils peuvent-ils nous aider dans nos expérimentations de tous les jours ?

L'intelligence artificielle, le deep learning, les API et les logiciels libres occupent aujourd'hui une place croissante dans les pratiques scientifiques et expérimentales. Au-delà des effets de mode, ces outils offrent des possibilités concrètes pour automatiser certaines tâches, traiter et interpréter des données, améliorer l'analyse de certaines images, piloter des instruments ou encore développer de nouvelles approches pour répondre aux problématiques quotidiennes des laboratoires.

Ces journées de conférences proposent de définir les concepts et d'explorer ces technologies à travers des exemples directement issus de nos activités expérimentales. L'objectif est de mieux comprendre les principes, les possibilités mais aussi les limites de ces outils, tout en découvrant des solutions concrètes et accessibles. Ces différentes interventions permettront ainsi de partager des expériences et de réfléchir à la manière dont l'IA et les outils numériques peuvent s'intégrer efficacement dans nos expérimentations de tous les jours.

Lundi 30 novembre 2026

09h30-10h30 : Bases, concepts, enjeux et limites de l'IA dans la Science

Jean-Luc PAROUTY - CNRS SIMaP

10h30-11h00 : Imagerie chimique et IA : application à la détection de traces de produits CMR dans des céramiques, de la création du code à l'analyse des données

Jean-Louis LONGUET - CEA Le Ripault

11h00-11h30 : L'IA au service de la métrologie dimensionnelle des nanoparticules

Vincent MALESYS - LNE

11h30-12h00 : Segmentation sémantique par intelligence artificielle : du Machine Learning au Deep Learning

Samuel LETT - CEA Le Ripault

12h00-13h45 : Déjeuner libre

13h45-14h15 : Assemblée générale du GN-MEBA

14h15-14h45 : IA pour l'imagerie hyperspectrale de peintures historiques

Emeline POUYET - CRC UAR 3224

14h45-15h15 : Présentation et démonstration du logiciel CASINO pour la modélisation Monte Carlo

Raynald GAUVIN - Département de génie minier et des matériaux, Université McGill, Montréal, Québec, Canada

15h15-15h45 : Pause

15h45-16h15 : Présentation et démonstration du logiciel MCX-Ray 2.0, une révolution pour les simulations de Monte Carlo

Raynald GAUVIN - Département de génie minier et des matériaux, Université McGill, Montréal, Québec, Canada

16h15-17h00 : Débruitage des images, présentation des traitements de base

Christophe CHAMOT - PRIMACEN, INSERM/CNRS/Université de Rouen

17h00-17h30 : XMapTools : un logiciel libre pour quantifier et interpréter les cartographies chimiques

Pierre LANARI - Institute of Earth Sciences, University of Lausanne, Suisse

Mardi 1er décembre 2026

09h-09h30 : Corrélation d'images numériques pour le MEB

Stéphane ROUX - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay/CentraleSupélec/Université Paris-Saclay/CNRS

9h30-10h15 : Utilisation des API (Application Programming Interface) pour le pilotage de MEB et de systèmes analytiques

Jean-Claude MENARD - RAITH GmbH

10h15-14h00 : Exposition Constructeurs au Centre International de Congrès de Sorbonne Université (salle 102, Tour 44, 1er étage) Pause-café et Buffet de midi offerts par l'ensemble des constructeurs et le GN-MEBA

14h00-14h30 : Introduction aux logiciels libres de segmentation 3D d'objets biologiques en microscopie électronique.

Groupe de travail "Traitement et analyse d'images 3D en microscopie électronique" du RIME. Michaël TRICHET - Institut de Biologie Paris Seine, Sorbonne Université/CNRS

14h30-15h00 : Mesurer l'invisible : comment les fréquences de vibration des nanofils dévoilent leurs propriétés physiques

Sébastien PAIRIS - CNRS Institut Néel

Intelligence artificielle, deep learning, API, logiciels libres : comment ces outils peuvent-ils nous aider dans nos expérimentations de tous les jours ?

Journées pédagogiques 2026 du GN-MEBA

Lundi 30 novembre 2026

9h30 – 10h30 Bases, concepts, enjeux et limites de l'IA dans la Science

Jean-Luc PAROUTY - CNRS SIMaP

En l'espace de quelques années, l'intelligence artificielle – en particulier le Deep Learning – a connu des avancées remarquables, devenant capable de réaliser de nombreuses tâches auparavant réservées aux humains. Entre fascination, scepticisme et inquiétude, ces progrès suscitent autant d'enthousiasme que de questionnements. Cette présentation propose de retracer l'évolution de l'IA et du Deep Learning, d'en exposer les fondements théoriques, et d'offrir des repères concrets pour en faciliter la compréhension, l'exploration et l'appropriation. Des exemples appliqués à la microscopie viendront illustrer ces propos. Un panorama des principaux acteurs de l'IA en France, ainsi que des ressources disponibles, sera également présenté. Enfin, cette intervention mettra en lumière les limites actuelles de ces technologies, ainsi que les enjeux et impacts qu'elles soulèvent, qu'ils soient sociétaux, humains ou liés à la sécurité.

10h30 – 11h00 Imagerie chimique et IA : application à la détection de traces de produits CMR dans des céramiques, de la création du code à l'analyse des données

Jean-Louis LONGUET - CEA Le Ripault

Pour éviter de classer un matériau entier comme CMR (Cancérogène, Mutagène, Reprotoxique), le règlement européen CLP 1272/2008/CE exige que la concentration de substances CMR libres, telles que l'oxyde de nickel (NiO) ou l'oxyde de cobalt (Co_3O_4) par exemple, ne dépasse pas 0,1 % en masse. L'objectif de cette étude est de démontrer comment l'intelligence artificielle (IA) peut faciliter la détection de traces de précurseurs CMR résiduels dans les matériaux grâce aux techniques d'imagerie chimique élémentaire.

Ce travail est mené depuis 2008 dans notre laboratoire, à l'aide de la spectrométrie de rayons X à dispersion de longueur d'onde (WDS) sur une microsonde électronique. La méthodologie initiale consiste, dans un premier temps, à identifier sur des cartographies X de grandes dimensions des zones riches en nickel, susceptibles de correspondre à l'oxyde de nickel résiduel recherché. Cette première cartographie X est réalisée avec un faisceau électronique défocalisé de 20 µm de diamètre et un pas de mesure de 20 µm afin de couvrir la plus grande surface d'analyse possible dans un délai raisonnable (une nuit pour un échantillon de 2,54 cm de diamètre). Dans un second temps, des cartographies X à plus haute résolution spatiale sont réalisées afin de préciser la nature de ces zones. Cette méthode nécessite l'identification manuelle des coordonnées (x, y) des pixels riches en nickel à la fin de la première phase d'analyse, afin de les transposer en positions (X, Y) dans le repère du porte-échantillon et ainsi effectuer la seconde phase d'analyse sur les zones d'intérêt.

Récemment, cette méthodologie a été adaptée à une autre famille de matériaux céramiques et en y alliant l'utilisation d'une intelligence artificielle générative. Cette fois-ci, c'est la présence d'oxyde de cobalt résiduel libre qui est recherchée. L'IA a été utilisée pour analyser les cartographies X de la première phase d'analyse et identifier automatiquement les zones potentiellement riches en cobalt. Nous présenterons la construction du script d'analyse Python, basée sur un dialogue avec l'IA générative.

L'utilisation d'une IA générative pour l'analyse chimique locale par spectrométrie de dispersion de longueur d'onde permet non seulement un gain de temps considérable, mais aussi le traitement simultané de tous les éléments cartographiés, ouvrant par exemple la voie à des études sur la formation ou la disparition de phases en fonction de la température de traitement.

À l'avenir, cette méthode pourrait être intégrée directement à la microsonde pour un traitement des données et un pilotage de l'appareil de manière automatisée.

Intelligence artificielle, deep learning, API, logiciels libres : comment ces outils peuvent-ils nous aider dans nos expérimentations de tous les jours ?

Journées pédagogiques 2026 du GN-MEBA

11h00 – 11h30 L'IA au service de la métrologie dimensionnelle des nanoparticules

Vincent MALESYS - LNE

La caractérisation dimensionnelle des nanoparticules répond à des enjeux scientifiques, industriels et réglementaires : la définition européenne d'un nanomatériau repose sur la distribution de tailles en nombre caractéristique des dimensions externes des particules, ce qui exige des règles de comptage rigoureuses et des mesures représentatives. Si l'analyse manuelle des images de microscopie électronique mobilise l'expertise de l'opérateur·rice, elle devient rapidement chronophage. Les méthodes classiques de traitement d'images (seuillage, contours, morphologie) atteignent quant à elles leurs limites face aux contrastes hétérogènes, au bruit, aux particules agrégées ou agglomérées et pouvant présenter des formes diverses. Pour franchir un premier cap, le LNE a développé NanometrologIA (NIA), un outil d'intelligence artificielle dédié à la segmentation des nanoparticules de TiO_2, mais dont la spécialisation limite l'usage à des matériaux et conditions d'acquisition proches de son jeu d'apprentissage. Cette présentation expose l'évolution et l'évaluation des outils de segmentation par IA autour de l'intégration de nouveaux apprentissages et modèles pour disposer d'une segmentation plus universelle, évaluée non seulement sur la qualité des contours mais aussi sur son influence sur les distributions de taille. Une discussion est proposée sur les développements à mener afin de mettre à disposition un outil universel associant traitement automatique et mode interactif, permettant à l'utilisateur·rice de sélectionner, corriger ou valider les particules, afin de réduire les temps de comptage tout en conservant la maîtrise métrologique des résultats.

11h30 – 12h00 Segmentation sémantique par intelligence artificielle : du Machine Learning au Deep Learning

Samuel LETT, Raphaël CRUEYZE – CEA, DAM, Le Ripault, F-37260 Monts, France

L'analyse quantitative des microstructures joue un rôle central dans la compréhension du comportement des matériaux et dans l'établissement de relations microstructure–propriétés. Cependant, l'extraction d'informations pertinentes à partir d'images de microscopie reste souvent limitée par la complexité des morphologies observées et par la disponibilité restreinte de données annotées.

Dans ce contexte, ce travail explore l'utilisation de méthodes d'analyse d'image basées sur l'utilisation du machine learning ou de réseaux de neurones convolutifs pour la détection automatique d'éléments microstructuraux d'intérêt (par exemple de fissures sur la Figure 1). L'approche s'appuie sur des stratégies d'apprentissage adaptées aux jeux de données de taille limitée afin de réaliser des tâches de segmentation sémantique, voire de segmentation d'instances, appliquées à des images de microstructures.

L'objectif est de développer un cadre méthodologique permettant l'identification robuste de caractéristiques microstructurales pertinentes et leur quantification automatisée. Ces informations pourront ensuite être exploitées pour investiguer les relations entre caractéristiques microstructurales et comportement thermique du matériau.

Les premiers développements méthodologiques ainsi que les perspectives d'application à l'analyse couplée microstructure–propriétés seront présentés.

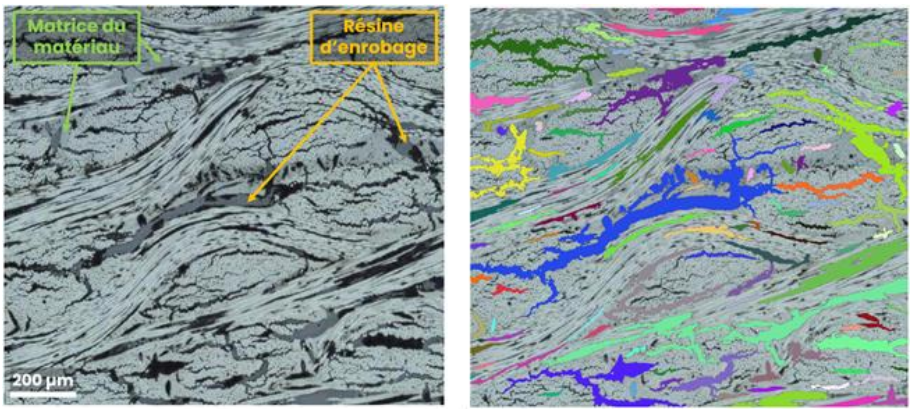


Figure 1 : Détection de fissures par un algorithme de type Random Forest

12h00 – 13h45 Déjeuner libre

Intelligence artificielle, deep learning, API, logiciels libres : comment ces outils peuvent-ils nous aider dans nos expérimentations de tous les jours ?

Journées pédagogiques 2026 du GN-MEBA

13h45 – 14h15 Assemblée générale du GN-MEBA

14h15 – 14h45 IA pour l'imagerie hyperspectrale de peintures historiques

Emeline POUYET - CRC UAR 3224

L'imagerie hyperspectrale dans les domaines du visible et du proche infrarouge à ondes courtes (SWIR), ainsi que l'imagerie par fluorescence X (MA-XRF), sont aujourd'hui largement utilisées pour l'étude non invasive des matériaux picturaux. Ces techniques fournissent des informations complémentaires sur la composition et la répartition des matériaux, mais génèrent des jeux de données volumineux et complexes dont l'interprétation reste un défi.

Dans ce contexte, les méthodes d'intelligence artificielle, et notamment d'apprentissage profond, ouvrent de nouvelles perspectives pour l'exploitation de ces données. Cette présentation proposera un aperçu de différentes approches, supervisées et non supervisées, développées pour faciliter l'identification et la cartographie des pigments, en s'intéressant plus particulièrement à l'intérêt de combiner plusieurs modalités d'imagerie.

À travers quelques exemples issus de l'étude d'échantillons modèles et de peintures historiques, nous illustrerons les possibilités offertes par ces méthodes, mais aussi leurs limites actuelles, notamment en matière de généralisation des modèles et de prise en compte de la diversité des matériaux et des conditions d'acquisition.

14h45 – 15h15 Présentation et démonstration du logiciel CASINO pour la modélisation Monte Carlo

Raynald GAUVIN - Département de génie minier et des matériaux, Université McGill, Montréal, Québec, Canada

Cette présentation débute par un bref rappel des principes de la méthode Monte Carlo appliquée à la simulation des interactions électron-matière en microscopie électronique à balayage et en microanalyse X. Nous présenterons ensuite les logiciels CASINO et CASINO 3D. CASINO permet de calculer les intensités nettes des rayons X ainsi que le signal des électrons rétrodiffusés (BSE) pour des échantillons homogènes ou stratifiés. CASINO 3D étend la modélisation à des structures tridimensionnelles arbitraires, mais se limite aux électrons rétrodiffusés et aux électrons secondaires. De nombreuses démonstrations en direct seront présentées.

15h15 – 15h45 Pause

15h45 – 16h15 Présentation et démonstration du logiciel MCX-Ray 2.0, une révolution pour les simulations de Monte Carlo

Raynald GAUVIN - Département de génie minier et des matériaux, Université McGill, Montréal, Québec, Canada

Cette présentation porte sur MCX-Ray 2.0, un nouveau logiciel de simulation Monte Carlo doté d'une interface moderne qui permet le calcul en parallèle sur plusieurs processeurs. Les temps de calcul sont réduits d'un facteur de 100 à 1000. Par exemple, la simulation d'un million d'électrons incidents à 5 keV dans un alliage massif Al-Li prend 20 secondes sur 62 cœurs. MCX-Ray 2.0 prend en charge les géométries 3D. Il simule les électrons rétrodiffusés, ainsi que les électrons transmis lorsque la géométrie est en mode TEM. Il calcule aussi les spectres EDS complets, fluorescence X incluse, ainsi que les patrons de canalisation des électrons (ECP). Il permet d'appliquer la méthode des f-ratios pour la microanalyse quantitative. Il offre enfin un mode de traitement par lots (batch processing) pour générer des bases de données de spectres simulés destinées à l'entraînement de réseaux de neurones profonds. De nombreuses démonstrations en direct seront présentées.

Intelligence artificielle, deep learning, API, logiciels libres : comment ces outils peuvent-ils nous aider dans nos expérimentations de tous les jours ?

Journées pédagogiques 2026 du GN-MEBA

16h15 – 17h00 Débruitage des images, présentation des traitements de base

Christophe CHAMOT - PRIMACEN, INSERM/CNRS/Université de Rouen

Face au « dilemme universel de la dose » en microscopie — où une forte illumination ou un faisceau de photons ou d'électrons intense détruit les échantillons vivants ou sensibles —, les traitements classiques (filtres locaux, déconvolution de Richardson-Lucy, etc.) atteignent leurs limites en provoquant floutage et artéfacts.

Et si l'intelligence artificielle offrait une alternative intéressante ?

Cette présentation explore la transformation apportée par le Deep Learning dans la restauration d'images à très faible dose (gains de 10x à 100x). De l'architecture incontournable U-Net aux régimes d'apprentissage avancés (Noise2Clean, Noise2Noise, Noise2Void), découvrez comment restaurer des images nettes sans altérer les structures.

Au programme :

- *La physique du bruit : Comprendre l'origine du bruit photonique (Shot noise) et électronique en MEB ;*
- *La rupture technologique : Comment les réseaux convolutifs (CNN) et les outils spécialisés (CARE, CSBDeep) préservent les contours aigus et la super-résolution ;*
- *Applications transversales : Du suivi du vivant en photonique à la cryo-microscopie, l'imagerie FIB-SEM 3D, et la microscopie corrélative (CLEM) ;*
- *Rigueur et bonnes pratiques : Comment identifier et éviter le piège majeur des hallucinations générées par les modèles, en s'appuyant sur des métriques robustes (PSNR, SSIM) et des outils Open-Source (ZeroCostDL4Mic) ?*

17h00 – 17h30 XMapTools : un logiciel libre pour quantifier et interpréter les cartographies chimiques

Pierre LANARI - Institute of Earth Sciences, University of Lausanne, Suisse

XMapTools est développé depuis plus de quinze ans pour le traitement, l'analyse et l'interprétation de cartographies chimiques acquises à la microsonde électronique (WDS), au MEB (EDS), mais aussi par micro-fluorescence X ou LA-ICP-MS. Dans un environnement guidé, il permet de passer de cartes d'intensités brutes à des cartes quantitatives de composition, puis à des cartes de phases et de propriétés. La présentation détaillera la méthode de calibration par standards internes, basée sur des analyses ponctuelles acquises sur la zone cartographiée, ainsi que les étapes de classification, de segmentation et de visualisation (cartes multicanales, diagrammes binaires, ternaires et « spider diagrams »). Des exemples d'applications en sciences de la Terre illustreront l'apport de ces cartes et ce qui reste transposable à d'autres types de matériaux.

Deux questions plus générales seront ensuite abordées. La première porte sur les logiciels libres : qui les développe, qui en assume le coût réel (temps de recherche, maintenance, formation des utilisateurs) et comment la communauté peut contribuer à leur pérennité. La seconde porte sur l'intelligence artificielle, à la fois comme outil d'analyse des données (classification supervisée, segmentation) et comme aide au développement logiciel, avec ses apports concrets et ses limites.

Intelligence artificielle, deep learning, API, logiciels libres : comment ces outils peuvent-ils nous aider dans nos expérimentations de tous les jours ?

Journées pédagogiques 2026 du GN-MEBA

Mardi 1er décembre 2026

9h00 - 9h30 Corrélation d'images numériques pour le MEB

Stéphane ROUX - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay/CentraleSupélec/Université Paris-Saclay/CNRS

Après avoir rappelé les principes de la Corrélation d'Images Numériques (CIN ou DIC), nous insisterons sur la question critique du choix de la base cinématique. Les CIN locale, globale ou intégrée seront ainsi présentées. La nature statistique du bruit des images conditionne la formulation variationnelle exploitée, et mérite donc une caractérisation fine.

Puis, nous aborderons différentes applications de cette technique en lien avec les spécificités du MEB :

- *La correction des artefacts de balayage*
- *L'exploitation de l'EBSD où la CIN est déployée sur la figure de diffraction (Kikuchi), ce qui ouvre sur la mesure de contraintes résiduelles « absolues »*
- *La CIN sur des champs d'orientation cristalline*
- *L'exploitation d'imagerie multimodale*

Nous conclurons cette présentation par le suivi de la cinématique à 3D pour des essais mécaniques in situ, qui reste une perspective mais qui est aujourd'hui à portée de main.

9h30 – 10h15 Utilisation des API (Application Programming Interface) pour le pilotage de MEB et de systèmes analytiques

Jean-Claude MENARD - RAITH GmbH

L'évolution des microscopes électroniques à balayage (MEB) et des systèmes analytiques s'accompagne d'une ouverture croissante de leurs architectures logicielles grâce aux interfaces API.

Ces interfaces offrent aux utilisateurs la possibilité d'automatiser des tâches, de développer des flux de travail personnalisés et d'intégrer les instruments dans des environnements numériques plus larges.

Cette présentation montrera comment les API peuvent être utilisées pour piloter un MEB, automatiser l'acquisition d'images et des données analytiques, coordonner plusieurs équipements et mettre en œuvre des stratégies de caractérisation avancées.

Plusieurs exemples concrets illustreront les bénéfices de cette approche, notamment pour l'amélioration de la productivité, la reproductibilité des mesures et la réduction des interventions manuelles.

L'intervention abordera également l'association des API avec les outils d'intelligence artificielle et de traitement de données, ouvrant la voie à des systèmes capables d'adapter automatiquement les conditions d'acquisition en fonction des résultats obtenus en temps réel. Ces évolutions constituent une étape importante vers le développement de laboratoires plus autonomes, connectés et orientés données.

Enfin, les opportunités, les limites et les bonnes pratiques liées à l'utilisation des API dans les environnements de microscopie et d'analyse seront discutées, à travers des retours d'expérience issus de solutions déployées dans les domaines de la recherche et de l'industrie.

10h15 – 14h00 Exposition Constructeurs au Centre International de Congrès de Sorbonne Université
(salle 102, Tour 44, 1er étage)
Pause-café et Buffet de midi offerts par l'ensemble des constructeurs et le GN-MEBA

Intelligence artificielle, deep learning, API, logiciels libres : comment ces outils peuvent-ils nous aider dans nos expérimentations de tous les jours ?

Journées pédagogiques 2026 du GN-MEBA

14h00 – 14h30 Segmentation et reconstruction à partir de données 3D obtenues au MEB. Comparaisons des méthodes array tomography, serial bloc facing et FIB sur échantillons biologiques. Traitement par logiciels libres

Groupe de travail "Traitement et analyse d'images 3D en microscopie électronique" du RIME
Michaël TRICHET - Institut de Biologie Paris Seine, Sorbonne Université/CNRS

Cette présentation est le fruit d'un travail collectif mené au sein du groupe de travail « Traitement et analyse d'images 3D en microscopie électronique » du RIME (Réseau national d'Imagerie en Microscopie Électronique - https://rime.cnrs.fr/).

Ces dernières années, notre groupe a fédéré une vingtaine d'utilisateurs de la microscopie électronique autour des problématiques de segmentation pour l'imagerie 3D (array tomography, serial block-face et FIB-SEM), avec pour objectif de suivre et d'intégrer les avancées du domaine afin de partager nos savoir-faire.

Cette présentation proposera une comparaison et un retour d'expérience pratique couvrant les trois volets complémentaires que nous avons utilisés sur différents objets à analyser : la segmentation manuelle avec IMOD, la segmentation par machine learning avec Ilastik, et les approches de deep learning implémentées dans Dragonfly et Empanada-Napari. Elle montrera qu'IMOD reste une solution simple et efficace pour l'annotation manuelle et la reconstruction 3D, mais au prix d'un investissement important en temps (Kremer et al., 1996). Elle présentera ensuite Ilastik comme une approche intermédiaire, basée sur l'apprentissage interactif et itératif, qui facilite et automatise la segmentation et permet un traitement en série des données (Sommer et al., 2011). Enfin, elle introduira les approches de deep learning, dépendantes de la qualité et de la quantité des annotations initiales, ainsi que des ressources informatiques (Makovetsky et al., 2018 ; Conrad et al., 2023).

Conrad, R., & Narayan, K. (2023). Instance segmentation of mitochondria in electron microscopy images with a generalist deep learning model trained on a diverse dataset. Cell Systems, 14(1), 58–71.e5. https://doi.org/10.1016/j.cels.2022.12.006

Kremer, J., & Mastronarde, D. (1996). Computer visualization of three-dimensional image data using IMOD. Journal of structural biology, 116 1, 71-6. https://doi.org/10.1006/jsbi.1996.0013

Makovetsky, R., Piché, N., & Marsh, M. (2018). Dragonfly as a Platform for Easy Image-based Deep Learning Applications. Microscopy and Microanalysis, 24, 532 - 533. https://doi.org/10.1017/s143192761800315x

Sommer, C., Straehle, C., Köthe, U., & Hamprecht, F. (2011). Ilastik: Interactive learning and segmentation toolkit. 2011 IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Macro, 230-233. https://doi.org/10.1109/isbi.2011.5872394

14h30 – 15h00 Mesurer l'invisible : comment les fréquences de vibration des nanofils dévoilent leurs propriétés physiques

Sébastien PAIRIS - CNRS Institut Néel

Le laboratoire a étendu l'utilisation du MEB au domaine temporel et montré qu'il est possible de détecter les vibrations à haute fréquence de nanostructures comme des nanofils. Cette nouvelle technique « Dynamical Electron MicrOscopy » (DEMOS) s'applique aux domaines de la nanomécanique, de la thermométrie à résolution spatiale et ouvrent de nouvelles fonctionnalités comme la mesure des modules de Young ou le contrôle et la surveillance de masse en temps réel.

Cet exposé présentera une étude préliminaire utilisant des simulations de Monte-Carlo (3D) pour évaluer les énergies maximales absorbées par les nanofils en fonction des conditions d'observations. Il montrera ensuite les développements réalisés pour enregistrer ces fréquences de vibration permettant ainsi d'établir des cartographies des fréquences.