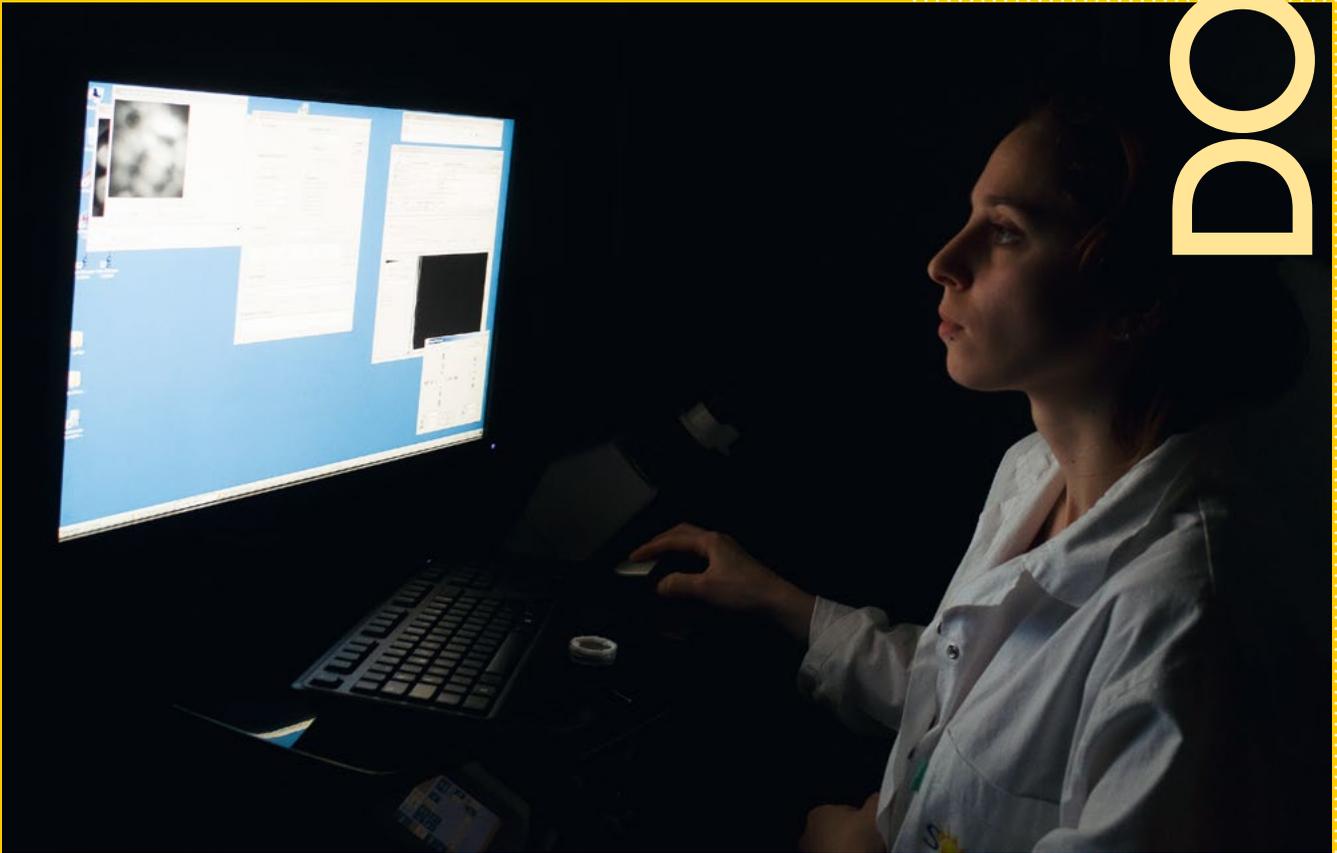


# Imageries 2 et 3 dimensions



L'Homme a très tôt voulu avoir accès à ce que ses yeux seuls ne pouvaient voir. Vers l'infiniment petit, grâce aux lentilles, loupes puis aux tout premiers microscopes à la fin du XVI<sup>e</sup> siècle, jusqu'aux microscopes électroniques à transmission actuels, les images obtenues ont gagné au cours des temps un bon nombre d'ordres de grandeur en termes de résolution. Celle-ci atteint aujourd'hui une centaine de picomètres ( $10^{-12}$  m), permettant de distinguer par exemple deux atomes de carbone dans un diamant.

Sur les 29 lignes de lumière de SOLEIL, près de la moitié mettent en œuvre des techniques d'imagerie, et cette proportion va encore augmenter dans les années à venir.



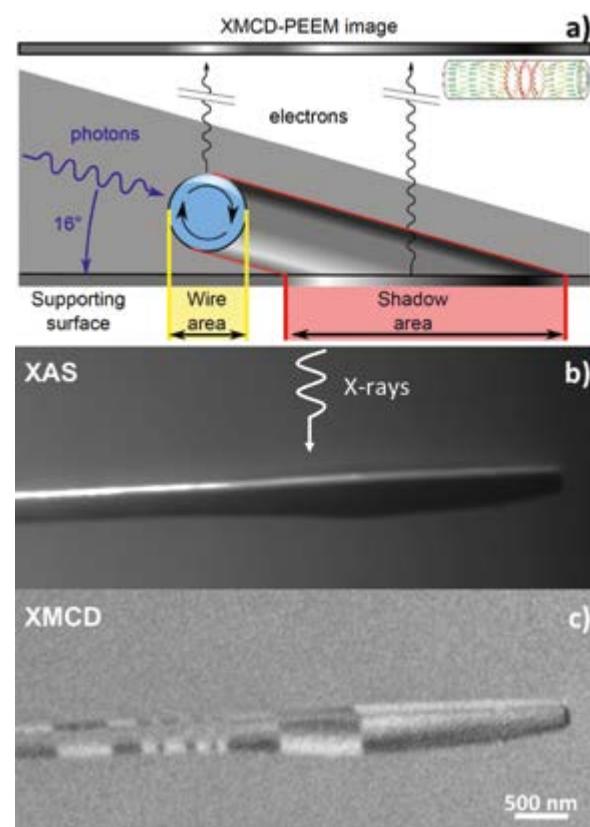
HERMES

# Tisser des mémoires magnétiques 3D à l'aide de nanofils

Ces dernières années ont connu une demande quasi exponentielle de dispositifs à haute capacité de stockage de l'information. Toutefois cette demande n'est plus limitée à la capacité de stockage. La vitesse d'accès, l'endurance, la volatilité, l'énergie nécessaire pour l'écriture/lecture d'un bit et le coût par bit... sont devenus des défis technologiques aussi, voire plus, importants que la capacité de stockage. Dans le cadre d'un projet européen (M3D), plusieurs laboratoires européens sont impliqués dans le développement de matériaux magnétiques pour le stockage de masse non volatile, avec comme objectif d'optimiser la densité d'information tout en réduisant le coût par bit. L'approche originale du projet consiste à développer des mémoires magnétiques 3D en utilisant des nanofils magnétiques. Une série de bits serait déplacée le long des fils magnétiques verticaux denses disposés en réseau, ce qui ne nécessite qu'un seul élément de lecture/écriture par fil. Comprendre les propriétés magnétiques dans un nanofil magnétique unique est une première étape obligatoire vers la conception de tels dispositifs. Des mesures XPEEM de nanotubes magnétiques ont récemment été effectuées sur HERMES. À la connaissance des scientifiques impliqués, c'est la première observation directe d'une structure en domaine dans des nanotubes. Cependant, contrairement aux prédictions, une aimantation orthoradiale avec plusieurs domaines bien définis a été mise en évidence. Ces tubes à aimantation orthoradiale sont

attractifs pour les mémoires de type race-track 3D, car leurs parois de domaines donnent lieu à un très petit champ dipolaire, contrairement au cas des nanofils. Ceci permet d'éviter les limitations liées au cross-talk (interaction magnétique mutuelle entre les nanotubes) en dépit de la forte densité de la matrice de nanotubes.

→ **Contacts:**  
rachid.belkhou@synchrotron-soleil.fr;  
olivier.fruchart@cea.fr



**Figure 1 : Image XPEEM à haute résolution de nanotube CoNi. a) Schéma de principe de la géométrie de mesures XMCD exploitant l'effet d'ombrage, lié à la faible incidence du faisceau X (16°). Cet effet permet de résoudre la structure en domaine, en surface et en volume. L'analyse de l'anisotropie de l'intensité de la partie ombrée en fonction de la polarisation circulaire de la lumière permet d'obtenir des informations sur la distribution en volume des domaines magnétiques. b) Image XAS-XPEEM mesurée au seuil L3 du nickel. La région claire correspond au nanotube, tandis que la région sombre représente l'ombre portée du nanotube. c) Image XMCD-XPEEM mesurée au seuil L3 du nickel, mettant en évidence la contribution en surface et en volume des domaines magnétiques tridimensionnels dans le nanotube.**

Les techniques de microscopie qui permettent d'obtenir les résolutions les plus élevées n'utilisent pas la lumière visible, comme c'est le cas avec la microscopie optique, mais d'autres gammes de rayonnement électromagnétique, ou encore des électrons. D'autre part, les images ne se forment plus directement sur l'œil de l'opérateur : pour pouvoir être interprétables elles sont d'abord « reconstruites », en une ou plusieurs étapes, à partir de signaux enregistrés par des détecteurs qui ne sont plus les yeux. Il existe ainsi différentes sortes d'imageries, en fonction du type de rayonnement employé et

de l'interaction entre ce rayonnement et l'objet étudié : absorption, émission, diffraction... Si, en termes de résolution d'images, la microscopie électronique reste pour l'heure imbattable, les techniques synchrotron font de grands progrès en permettant d'atteindre quelques dizaines de nanomètres de résolution, et elles ont pour atout d'offrir des informations complémentaires qui résultent de l'interaction rayonnement/matière.

<sup>1</sup>Résolution : distance minimale entre deux points contigus pour qu'ils soient correctement discernés par un système de mesure ou d'observation.

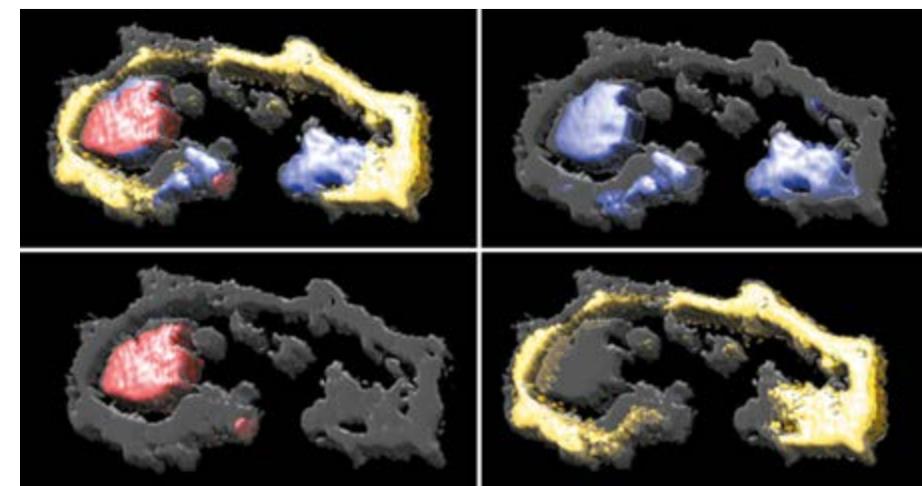
NANOSCOPIUM

# MMX-I : un logiciel pour l'imagerie X multimodale

La technique de microscopie en rayons X durs par balayage permet l'acquisition de données multimodales, c'est-à-dire d'images dont chaque pixel contient plusieurs types de données. On peut, par exemple, utiliser cette technique pour réaliser la cartographie d'un échantillon en contrastes d'absorption, de phase, de champs sombre et en fluorescence X en un seul balayage. Les informations obtenues permettent de déterminer à la fois la structure et la composition chimique des échantillons.

L'association de cette technique avec l'infrastructure d'acquisition rapide FLYSCAN, développée à SOLEIL [1] permet de proposer aux futurs utilisateurs de la ligne de lumière longue (155 mètres) NANOSCOPIUM [2] la possibilité d'aller encore plus loin et de faire des acquisitions tomographiques multimodales. Les acquisitions tomographiques permettent, après un traitement informatique, de reconstruire en 3D la structure interne de l'échantillon observé. Elles consistent à prendre des images de l'échantillon sous différentes orientations. Un des challenges de ces techniques d'imagerie est le traitement en ligne et l'analyse de l'énorme quantité de données multimodales générées par l'acquisition. Ceci est particulièrement critique pour la large communauté d'utilisateurs (biologie, science de la vie, géologie, géobiologie...) de la ligne NANOSCOPIUM, qui n'a pas nécessairement l'expérience de la manipulation de grands jeux de données.

MMX-I pour « Multi-Modal X-ray Imaging » est le premier logiciel libre et open-source dédié au traitement et à la reconstruction des données d'imagerie X multimodales et de tomographie [3]. C'est un outil multiplateforme (Mac, Windows ou Linux 64bit) simple à installer, complet, extensible, intuitif et « user friendly ». MMX-I implémente des méthodes de réduction et correction des données brutes et des techniques de



reconstruction 2D/3D qualitative et quantitative. Un des points forts du logiciel est son algorithme de lecture des grands jeux de données (plusieurs centaines de giga-octets) obtenus typiquement pendant une acquisition multi techniques sur NANOSCOPIUM. Cet algorithme, apparenté à un système de « streaming », permet de lire de manière efficace les données que ce soit sur un serveur de calcul ou sur un ordinateur standard.

Le projet MMX-I offre ainsi la possibilité aux utilisateurs experts ou débutants de traiter leurs données brutes soit directement sur la ligne NANOSCOPIUM soit sur leur ordinateur personnel. Les utilisateurs les plus expérimentés et sachant programmer peuvent également intégrer MMX-I comme librairie de calcul dans un logiciel existant, ou implémenter de nouvelles fonctionnalités qui seront alors disponibles pour le reste de la communauté.

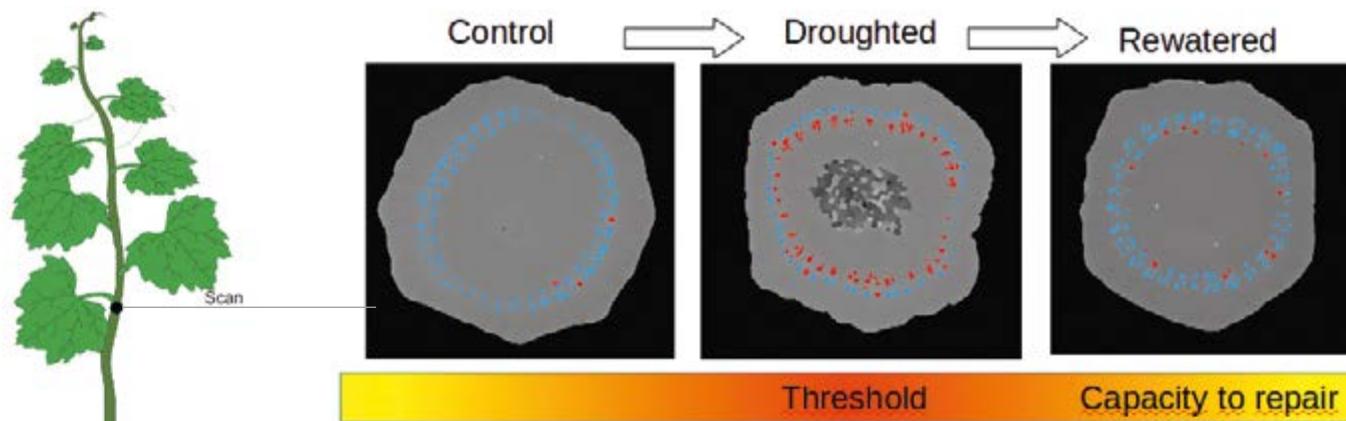
MMX-I est disponible sur internet à l'adresse suivante : <https://bitbucket.org/antoinebergamaschi/mmx-i>

→ **Contacts:**  
antoine.bergamaschi@synchrotron-soleil.fr;  
kadda.medjoubi@synchrotron-soleil.fr

**Figure 1 : Rendu volumique d'un fossile de foraminifère. La tomographie associée au balayage multi techniques permet de visualiser les informations structurales et chimiques de cet échantillon. Ces informations permettent l'étude de la bio-minéralisation des métaux lourds chez les foraminifères. Les différentes modalités ont été reconstruites avec le logiciel MMX-I développé sur la ligne NANOSCOPIUM. La phase reconstruite est représentée en gris dans la figure, le champ sombre en bleu, la distribution du fer en rouge et celle du calcium en jaune.**

Références :  
[1] K. Medjoubi *et al.* In X-Ray Nanoimaging: Instruments and Methods, (2013/09/26), Proc. SPIE 8851:88510P, San Diego, California, United States. doi:10.1117/12.2026680.  
[2] A. Somogyi *et al.* Journal of Synchrotron Radiation (2015) 22, 1118.  
[3] A. Bergamaschi *et al.*, Journal of Synchrotron Radiation (2016) 23, 783.

PSICHE  
**Embolie des plantes et résistance à la sécheresse**



La mortalité des plantes soumises à des événements de sécheresse extrême a récemment été associée à la vulnérabilité des plantes à la cavitation du xylème, un phénomène qui correspond au dérèglement du transport d'eau dans les vaisseaux embolisés. Malgré les progrès récents réalisés en hydraulique végétale, il existe encore un débat pour savoir si les plantes subissent des embolies fréquentes puis se rétablissent, ou si elles sont hautement résistantes à l'embolie. Certaines études ont suggéré que les plantes seraient hautement vulnérables à l'embolie mais se rétabliraient quotidiennement. Dans les branches ainsi que dans les feuilles, ce rétablissement consisterait à re-remplir les vaisseaux pendant la journée ou sous l'action de la poussée racinaire. Cependant, ce processus a seulement été observé chez les espèces à vaisseaux longs telles que le laurier, le peuplier et la vigne, ce qui peut indiquer des problèmes méthodologiques biaisant les mesures conventionnelles effectuées au laboratoire.

La micro-tomographie par synchrotron est utilisée pour étudier la formation et la diffusion de l'embolie induite par la sécheresse dans le xylème de plantes intactes, et tester l'hypothèse selon laquelle les plantes seraient ainsi régulièrement soumises à de hauts niveaux d'embolie même lorsqu'elles ne sont pas en stress hydrique.

Lors de leur première campagne SOLEIL en 2015 [1], des chercheurs de BIOGECO (INRA - Université de Bordeaux) ont démontré pour la première fois que la tomographie aux rayons X, une méthode non invasive permettait l'observation directe d'éléments conducteurs remplis d'air et de sève dans le xylème des plantes, pour l'évaluation non biaisée de l'adaptation des plantes à la sécheresse. Leurs observations directes des vaisseaux ont démontré la capacité remarquable des espèces à vaisseaux longs tels que le chêne à résister à l'embolie. En 2016, ils ont d'autre part observé que les vaisseaux du xylème

dans des conditions physico-chimiques identiques, avec un faisceau X qui peut être micronique ( $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ). Dans le cas de matériaux complexes, les cartographies à résolution modérée ainsi obtenues mettent en évidence les inhomogénéités de l'échantillon - pour les matériaux anciens, par exemple, mais aussi dans le domaine médical. Les mesures peuvent par ailleurs être réalisées sous contrainte, pour une étude du comportement mécanique de l'échantillon en conditions extrêmes de température - domaine d'excellence de la ligne - et pression. LUCIA dispose quant à elle d'un microfaisceau plus focalisé ( $2,5 \times 2,5 \mu\text{m}^2$ ) pour des cartographies en absorption et fluorescence X à plus basse énergie que DIFFABS - d'où une complémentarité entre les deux lignes pour la cartographie chimique d'objets hétérogènes.

... Suite de la page 20

Par ailleurs, dans le cas des imageries basées sur le rayonnement électromagnétique, un synchrotron offre tout naturellement la plus grande variété de techniques, de par l'étendue du spectre de photons et la diversité des dispositifs d'analyse de la matière disponibles. Ainsi, à SOLEIL il est possible de parcourir les différentes échelles de taille de la matière, du micron au nanomètre, et d'obtenir des informations complémentaires aux données « topographiques » données par un microscope: propriétés magnétiques, électroniques ou composition chimique par exemple.

**Dès les débuts de SOLEIL**

Depuis 2007, DIFFABS permet de combiner des analyses en diffraction et absorption X haute énergie, sur la même zone de l'échantillon et

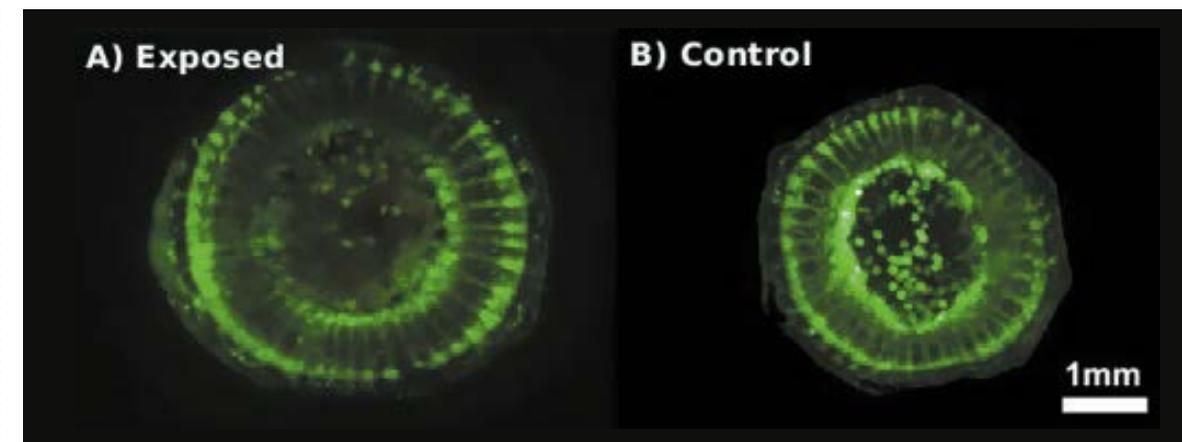


Figure 2. Coupe transversale de la tige supérieure d'une plante de vigne scannée par micro-CT. Cette coupe a été réalisée 10 jours après le scan. Les cellules fluorescentes en vert représentent des cellules vivantes, qui étaient légèrement plus prononcées dans l'image témoin (B) que dans la zone exposée au faisceau de rayons X (A). Barre blanche = échelle de 1 mm [2].

pouvaient être réparés plusieurs heures après le ré-arrosage de la plante (figure 1). Toutefois, ce re-remplissage des vaisseaux a été uniquement observé lorsque la pression dans le xylème était positive (poussée racinaire). Les chercheurs ont aussi démontré que la plupart des cellules vivantes restaient en vie (Figure 2) 10 jours après le scan. Une partie de l'activité de la ligne de lumière PSICHE est consacrée à la tomographie et à l'imagerie pour un grand nombre d'applications telles que l'exemple présenté. La source synchrotron, qui émet un flux de rayons X très intense, est beaucoup plus brillante qu'un tomographe médical ou de laboratoire. Cette méthode peut être utilisée pour réaliser des mesures très rapides afin d'étudier des phénomènes résolus en temps tels que la fissuration ou la déformation en génie des matériaux. Autrement, un monochromateur peut être utilisé pour sélectionner une seule longueur d'onde du faisceau afin d'étudier des échantillons

déliés (tels que ces plantes vivantes) qui seraient endommagés par le flux intense. Les mesures sont néanmoins beaucoup plus rapides qu'en laboratoire, avec seulement 90 secondes pour une acquisition 3D complète. Ceci permet aux chercheurs d'étudier un grand nombre d'échantillons en une semaine d'utilisation du faisceau.

→ **Contacts:**  
sylvain.delzon@u-bordeaux.fr  
andrew.king@synchrotron-soleil.fr

Références :  
1-B. Choat *et al.* Plant Physiology (2016) 170, 273.  
2- G. Charrier *et al.* Plant Physiology (2016) 172, 1657.

Les premiers résultats en imagerie magnétique résolue en temps à SOLEIL ont été obtenus par spectroscopie de photoémission d'électrons et d'absorption en rayons X mous sur TEMPO, autre ligne opérationnelle dès 2007. Les travaux ont été effectués en collaboration avec l'Institut Néel de Grenoble. [2] Avec l'installation de nouveaux microscopes, TEMPO s'est concentré sur la prise en compte de la variable temporelle des mesures effectuées. Elle permet par exemple la détermination des cinétiques de réaction en surface ou aux interfaces, ou encore des mesures de dynamique de l'aimantation dans les matériaux magnétiques. Des résultats d'imagerie en photoémission ont aussi été obtenus, toujours sur la deuxième branche de TEMPO, en utilisant le microscope des laboratoires IRAMIS et LETI du CEA.

[2] Reffets de la Physique (2013), 34-35, p38-42.

**Dans les basses énergies**

Quelle que soit la gamme de longueur d'ondes, il existe à SOLEIL au moins une ligne de lumière en imagerie. Dans les infrarouges (IR),

SMIS couple spectroscopie d'absorption à transformée de Fourier (FTIR) et microscopie. Depuis bientôt 10 ans la ligne permet la réalisation à une résolution de quelques microns de cartographies chimiques de composés variés: films de polymères, inclusions minérales, matériaux d'intérêt biologique et biomédical, ou archéologique, notamment. Mais, nouveauté, SMIS vient de s'équiper d'une station dite « nanoIR » qui fournit une analyse chimique des échantillons jusqu'à quelques dizaines de nanomètres de résolution spatiale, soit une amélioration de trois ordres de grandeur par rapport à la micro-spectroscopie IR classique. Le faisceau IR illumine l'échantillon par le haut. Deux modalités d'analyse, dites AFMIR et SNOM, sont alors offertes; cf. page 12 pour plus d'informations.

Actuellement le nanoIR fonctionne avec une source laser IR pulsée, mais le couplage avec une source laser large-bande (accès au domaine des vibrations d'élongation C-H, O-H et N-H) et avec la source synchrotron (accès à l'ensemble du domaine moyen IR), est en cours. Autre gamme d'énergie, les ultraviolets: l'une des trois branches de la ligne DISCO est une station d'imagerie de fluorescence UV dédiée aux études en biologie (cellules vivantes) et en science des matériaux.

## SMIS Imagerie et spectro-tomographie infrarouge

L'équipe de la ligne SMIS développe depuis de nombreuses années une fructueuse collaboration avec des chercheurs de l'IAS (Institut d'Astrophysique Spatiale d'Orsay) pour l'analyse par micro-spectroscopies IR et Raman de petites poussières extraterrestres issues d'objets primitifs (astéroïdes, comètes ; cf. Rayon de SOLEIL n°18, p.4). Cela permet d'améliorer nos connaissances sur les débuts de notre système Solaire et sur l'évolution de ces matériaux dans différents environnements astrophysiques : de la nébuleuse primitive, en passant par les processus d'accrétion et incorporation dans les planétésimaux, jusqu'aux altérations de surface d'astéroïdes et comètes et les apports en matériaux volatils aux planètes telluriques.

Récemment a été installé sur SMIS un nouveau microscope-imageur FTIR équipé d'un détecteur matriciel de type Focal Plane Array avec 128x128 pixels, qui permet d'obtenir simultanément un très grand nombre de spectres sur des surfaces allant de plusieurs centimètres à quelques microns. La rapidité de ce type de détecteurs permet aussi de développer une nouvelle méthode d'analyse : la micro-tomographie tridimensionnelle FTIR. Cette technique, qui a été développée en 2013 au Synchrotron Radiation Centre à Madison (USA) par M. C. Martin et ses collaborateurs, est maintenant en cours d'implémentation sur la ligne SMIS. De premières analyses ont été effectuées sur des grains de la météorite carbonée « Paris », montés sur des pointes FIB.

Les résultats montrent la distribution en 3D des différentes phases de ces grains, qui sont très hétérogènes en composition. Des analyses

complémentaires ont été effectuées en tomographie X sur la ligne PSICHE. Le couplage des deux techniques permet d'élucider à petite échelle les relations entre les matériaux organiques et les minéraux, ce qui est fondamental pour comprendre l'origine et l'évolution de la matière organique dans les différentes phases de formation de notre système planétaire. Ces analyses constituent la phase initiale d'un protocole de mesures, allant des techniques analytiques les moins destructives aux plus destructives, visant à caractériser dans leur ensemble les propriétés des échantillons, en vue des prochaines missions spatiales de retour d'échantillon (Hayabusa 2, JAXA, et OSIRIS-REx NASA).

L'objectif est de développer et exploiter une large activité d'analyses par micro-tomographie tridimensionnelle FTIR de différents matériaux d'origine extraterrestre par les chercheurs de l'IAS, et d'autres échantillons (biologiques, médicaux, du patrimoine, de la physique des matériaux, etc.) par les scientifiques et les autres utilisateurs de la ligne SMIS. Cette méthode analytique constitue une avancée technologique majeure qui permettra de caractériser à une échelle encore jamais atteinte et de façon non-destructive la composition de ces matériaux.

L'instrument sera également disponible pour l'imagerie 2D spectroscopie IR de grande surface. Le couplage avec la source synchrotron est en cours et il est prévu que l'instrument soit ouvert pour les appels à projets du deuxième semestre 2017.

→ **Contacts :**  
rosario.brunetto@ias.upsud.fr  
ferenc.borondics@synchrotron-soleil.fr

dans l'espace réciproque. Depuis 2011 la ligne ANTARES dispose d'un microscope Nano-ARPES, capable d'effectuer – avec une résolution spatiale de quelques dizaines de nanomètres – l'imagerie des propriétés électroniques de systèmes proches des dispositifs utilisés pour des applications pour l'électronique du futur, et l'ingénierie quantique. Un peu plus haut en énergie, HERMES est une autre ligne de spectromicroscopie. Elle possède deux équipements : pour la microscopie d'émission des photoélectrons (PEEM), technique qui – par rapport à l'ARPES – conserve la proéminence spatiale des photoélectrons, et pour la microscopie X à transmission par balayage (STXM).

[3] - D. Bazin *et al.*, Comptes Rendus Chimie (2016) 19, 1439.

[4] - S. Kaščíková *et al.*, Nano Research (2015) 8, 2373.

[5] - L. Štefančíková *et al.*, Cancer Nanotechnology (2014), 5, art.n° 1.

Entre autres applications, grâce à une résolution spatiale de quelques dizaines de nm, les domaines magnétiques sont imagés physiquement et il devient possible de manipuler des bits magnétiques au sein d'une structure magnétique.

Une autre technique d'imagerie magnétique est mise en œuvre à SOLEIL, sur SEXTANTS : l'holographie X par transformée de Fourier, à une résolution spatiale de quelques nanomètres – limitée par la longueur d'onde des rayons X. L'équipe de la ligne a montré que des rayons X polarisés linéairement pouvaient être utilisés pour imager les domaines magnétiques dans des couches minces, généralement étudiés en polarisation circulaire. Cette technique utilise pleinement les caractéristiques du rayonnement synchrotron X : grande intensité et impulsions courtes (pour la résolution temporelle), accordabilité en énergie et en polarisation (pour une sélectivité chimique et une sensibilité magnétique) et degré de cohérence élevé (pour un grand champ de vue).

La ligne CRISTAL est dédiée à l'étude par diffraction X de poudres et de (mono)cristaux non biologiques. La ligne donne accès à la structure atomique de cristaux par mesure de l'intensité des pics de diffraction (réflexions de Bragg). La cohérence du faisceau de rayons X est également mise à profit : la modification de la forme des pics de Bragg est liée à la forme du cristal diffractant et aux déformations du cristal dues aux contraintes imposées par leur environnement (diffraction cohérente, ptychographie de Bragg). Et, comme TEMPO, CRISTAL possède l'atout supplémentaire de la dimension temporelle avec la diffraction en temps résolu avec, depuis septembre 2016, les premières expériences pompe (IR)-sonde (RX) utilisant le slicing pour une résolution temporelle de l'ordre de 200 fs ( $10^{-15}$  s).

### Et en volume

Quatre lignes proposent, ou proposeront bientôt, des dispositifs de tomographie et/ou d'imagerie à balayage par diffraction cohérente (ptychographie), en plus des analyses réalisées en 2D. En tomographie, comme avec un scanner médical mais avec une résolution spatiale bien meilleure, l'échantillon, placé sur une table de rotation, est éclairé par les rayons X et une image en projection (radiographie) est formée sur un détecteur placé en aval. Pendant la rotation de l'objet sur 180°, il est ainsi radiographié sous tous les angles de vue. Un calcul permet ensuite de reconstruire la structure 3D de l'objet à partir de toutes ces images en projection. Cette technique non-destructive permet ainsi de voir l'intérieur de l'échantillon sans le découper, grâce aux RX, mais également d'étudier l'évolution des échantillons avec le temps, par exemple sous contrainte.

La grande brillance et la cohérence spatiale partielle du rayonnement synchrotron permettent de mettre en œuvre la technique de contraste de phase, plus sensible que la technique d'absorption utilisée classiquement en radiographie. Après avoir traversé l'échantillon, les ondes électromagnétiques se déphasent, créant un phénomène d'interférence observable par le détecteur s'il est placé à une distance optimisant ce contraste. On peut ainsi mettre en évidence de faibles variations de la densité de l'échantillon, et étudier en détails des objets micro, voire nanométriques, selon la ligne de lumière.

Enfin, en ptychographie, la reconstruction 3D est cette fois issue de la « compilation » de centaines de milliers d'images de diffraction de l'échantillon : pour chaque orientation de celui-ci, plusieurs centaines de diagrammes sont enregistrés, qui permettent de reconstruire l'image 2D de chacune de projections (orientations de l'échantillon). L'ensemble des images 2D sert ensuite à la reconstruction finale en 3D, une procédure nécessitant la mise en œuvre d'algorithmes particulièrement puissants.

PSICHÉ dispose des 2 premiers types d'expériences, en mode monochromatique ou en mode faisceau rose. De plus elle permet de coupler des expériences de diffraction aux expériences de tomographie. Particulièrement adaptée aux mesures *in situ*, PSICHE est optimisée pour les expériences en science des matériaux : matériaux composites ou structurés, batteries, études sur la corrosion, la fatigue, la déformation...

En 2017 la ligne PUMA, dédiée à l'étude des matériaux anciens, disposera d'une station de spectro-microscopie X durs (imagerie 2D et microanalyses ponctuelles), et d'une station de micro-tomographie X durs par contraste de phase ; toutes deux visent une résolution de l'ordre du micromètre. PUMA est l'une des 3 lignes longues de SOLEIL. Cette longueur a été définie pour avoir une cohérence suffisante du faisceau de RX (grande distance entre point source des RX et point d'interaction RX/échantillon), mais aussi créer un grand champ de vue qui permettra des mesures plein champ sur de grands échantillons. Cette longueur est encore plus importante pour les lignes ANATOMIX et NANOSCOPIUM (160 mètres) afin d'obtenir la cohérence mais aussi la taille (30-100 nm) du faisceau X attendu au niveau de l'échantillon. Ligne dédiée à la radiographie et la tomographie plein champ en contraste d'absorption et contraste de phase, ANATOMIX couvrira une large gamme de résolutions spatiales : de 30 nm jusqu'à 10  $\mu$ m. NANOSCOPIUM permet quant à elle l'analyse élémentaire qualitative, chimique et structurale 2D/3D (ptychographie) dans différents domaines comme la microélectronique et les matériaux, les sciences biomédicales, géo-biologiques et de l'environnement, avec l'objectif d'atteindre la haute résolution : 30 nm.

### Traiter les données, construire les images

Les différentes techniques listées, et particulièrement celles permettant la reconstruction 3D des échantillons, nécessitent le traitement et l'analyse d'une énorme quantité de données. Sur NANOSCOPIUM par exemple, la microscopie en rayons X durs par balayage permet l'acquisition de données multimodales, c'est-à-dire la possibilité d'acquérir des images dont chaque pixel contient plusieurs types de données. On peut par exemple réaliser la cartographie d'un échantillon en contrastes d'absorption, de phase, de champs sombre et en fluorescence X en un seul balayage, grâce à l'infrastructure d'acquisition rapide FLYSCAN. Pour faciliter la tâche des scientifiques, un logiciel libre et open-source dédié au traitement et à la reconstruction des données d'imagerie X multimodales et de tomographie a été développé à SOLEIL. MMX-I (« Multi-Modal X-ray Imaging ») offre la possibilité aux utilisateurs de traiter leurs données brutes soit directement sur la ligne NANOSCOPIUM soit sur leur ordinateur personnel. Les plus expérimentés, sachant programmer, peuvent également intégrer MMX-I comme librairie de calcul dans un logiciel existant, ou implémenter de nouvelles fonctionnalités qui seront alors disponibles pour le reste de la communauté. Un autre projet, impliquant des scientifiques de DESY, du KIT et de SOLEIL, est en cours : « défi imag'in » soutenu par la mission pour l'interdisciplinarité (MI) du CNRS. Il a pour but de développer les outils nécessaires (plateforme de calcul, interface graphique) pour le traitement des mesures d'imagerie rapide par diffraction X au fil de l'expérience, voire en temps réel. Un vrai challenge puisque l'augmentation de la brillance des sources de rayons X et l'amélioration de l'efficacité et de la dynamique des détecteurs ont conduit à une augmentation de la vitesse de collecte de plusieurs ordres de grandeur ces deux dernières décennies.

Que l'on se rassure donc : les Téraoctets de données collectées sur des temps de plus en plus courts sur les différentes lignes de SOLEIL pourront bien être traités et convertis en superbes images 2 ou 3D à haute résolution.

... Suite de la page 23

De nouvelles possibilités d'excitation et de détection des échantillons (autofluorescence, pour s'affranchir du marquage par sondes) se sont révélées particulièrement prometteuses pour des applications en diagnostic [3] ou traitement biomédical : par exemple des thérapies ciblant des tumeurs habituellement non accessibles par photochimiothérapie [4], ou l'amélioration de radiothérapies utilisant des nanoparticules [5].

### Propriétés électroniques et magnétiques des matériaux avancés, à l'échelle du nanomètre

Exploiter au mieux les propriétés remarquables des nano-objets nécessite préalablement une étude exhaustive de leur structure électronique : détection des niveaux de cœur mais aussi étude de la structure des bandes de valence délocalisées, directement responsables des liaisons chimiques, du transport électrique et des propriétés thermiques et mécaniques. Pour ce faire, la spectroscopie de photoélectrons résolue en angle (ARPES) est la technique adaptée, permettant des mesures précises de la dispersion de la structure de bande de matériaux