

SOLEIL et ses perspectives

L'anneau SOLEIL, de plus basse énergie que l'ESRF, est idéalement optimisé dans le domaine des rayons X mous pour sonder efficacement les propriétés électroniques de la matière. Cependant, les progrès techniques (onduleurs sous vide) permettent d'augmenter l'énergie des photons émis et donc d'explorer tout aussi efficacement les propriétés structurales de la matière. Le nombre de lignes de lumière s'est accru de 11 en 2008 à 25 en 2013. Il est prévu d'atteindre la saturation de l'équipement (environ 36 lignes) d'ici 2020. Pour optimiser le service aux utilisateurs, SOLEIL a installé des laboratoires proches des lignes de lumière, pour préparer les échantillons et les caractériser avant et après les mesures. Sont également proposées des plates-formes de type « hôtel à projet ».

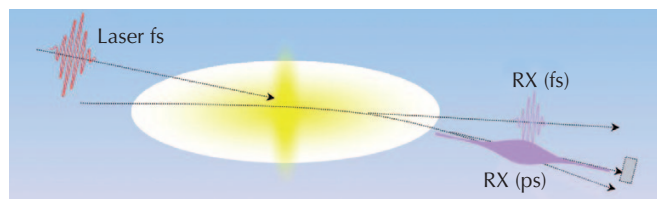
Des innovations majeures sur les synchrotrons devraient voir le jour dans la décennie en cours, comme les approches multi-modales et multi-échelles, c'est-à-dire la combinaison de l'imagerie 3D (jusqu'à l'échelle nanométrique) et des informations spectroscopiques.

On peut aussi s'attendre au développement des mesures en contraste de phase et à haute résolution temporelle : si les lasers à électrons libres (LEL) sont plus performants à ce double point de vue, les anneaux de stockage permettent néanmoins d'obtenir un certain degré de cohérence transverse et une résolution limite (longueur du paquet d'électrons) de 50 ps.

Stratégies d'avenir

Physique fondamentale et propriétés de la matière

Les mouvements ultrarapides (noyaux, électrons) jouent un rôle important dans les transitions de phase, les réactions chimiques ou la dynamique de l'aimantation, et SOLEIL vise à renforcer son potentiel d'investigation dans le domaine temporel. Pour ce faire, il faut exciter l'échantillon (par exemple, avec un laser pulsé) de façon synchronisée avec les paquets d'électrons, et avec un décalage temporel d'un paquet à l'autre (expériences dites « pompe-sonde »). Un tel schéma est prévu pour les lignes de photoémission et de diffraction. Enfin, pour atteindre des résolutions temporelles meilleures que 50 ps (le standard de base à SOLEIL), on développe – mais au détriment du flux – le schéma dit de « femto-slicing », qui fournit des durées d'impulsions comparables au LEL (fig. 1).



1. Principe du « femto-slicing ». Une tranche du paquet d'électrons acquiert un surplus d'énergie grâce au laser, ce qui modifie légèrement son orbite et permet d'extraire le rayonnement synchrotron qu'elle émet, ceci sur quelques lignes avoisinantes. En bonus, cette tranche émet aussi un rayonnement cohérent dans le domaine de fréquence du THz, utilisable pour la spectroscopie.

De l'échelle nanométrique à l'échelle macroscopique, des systèmes idéaux aux systèmes complexes

Actuellement, nombre de projets scientifiques demandent de caractériser la matière dans les conditions « réelles » de fonctionnement (i.e. *in situ*, *in operando*). Les objets d'étude sont très variés : nanoparticules, jets supersoniques, aérosols, ions en cage... et sont placés sous des conditions extrêmes de température, de pression, de champ magnétique...

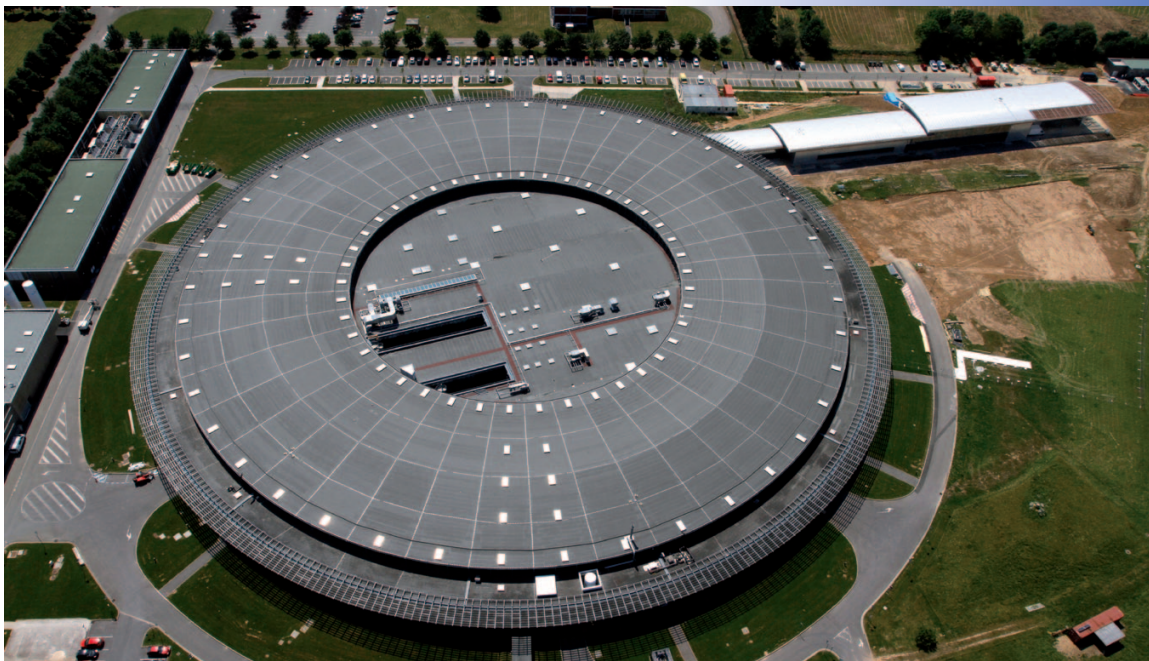
Récemment, nous avons terminé l'installation de plusieurs ensembles (photoémission, diffraction) qui permettront d'étudier des surfaces sous pression de gaz, afin de décortiquer les processus fondamentaux des réactions chimiques de surface, si importantes pour la catalyse.

Chimie et environnement

SOLEIL et la communauté scientifique « chimie et environnement » collaborent pour développer une nouvelle ligne de lumière (ROCK) pour des mesures cinétiques d'absorption X *in operando*. En raison de l'importance des besoins des utilisateurs, ce programme prioritaire devrait voir le jour en 2014. En particulier, un accent fort sera mis sur les études portant sur la catalyse et l'énergie. Les aspects cinétiques seront abordés par la technique « quick-EXAFS », permettant d'enregistrer très rapidement (en quelques dizaines de ms) un spectre EXAFS pour sonder l'environnement local d'atomes sélectionnés. Cette expérience a nécessité le développement d'un monochromateur original.

Matériaux anciens

Une ligne de haute énergie (sur *wiggler*), « PUMA », dédiée aux matériaux anciens (archéologie, conservation, paléontologie...), est proposée. Elle aura deux modes de fonctionnement : (i) analyses en microfaisceaux (spectroscopies d'absorption, de fluorescence, de diffraction et de diffusion aux petits angles) ; (ii) imagerie 2D et 3D. Les applications (voir les articles de M. Cotte et de J. Baruchel *et al.*) sont nombreuses : identification d'objets, processus techniques archaïques, vieillissement et restauration de tableaux, paléoclimatologie... La figure 2 présente un exemple d'utilisation de la spectroscopie d'absorption X appliquée aux matériaux du patrimoine.



© Synchrotron SOLEIL

Vue aérienne du synchrotron SOLEIL, à Saint-Aubin (Essonne).

Biologie et santé

La tâche complexe de tenter de comprendre les processus vivants demande une approche pluridisciplinaire. Il s'agit pour SOLEIL de contribuer à l'observation morphologique de systèmes biologiques à différentes résolutions spatiales (depuis la distance interatomique) et temporelles pertinentes, pour corrélérer à leur fonctionnalité les structures observées à ces échelles. Par cette approche multi-échelle, les synchrotrons permettent de déterminer la structure atomique 3D d'un ensemble de macromolécules et d'imager en 3D des cellules et des tissus. Ces mesures complètent les cartographies 2D obtenues par les microspectroscopies en infrarouge et en ultraviolet lointain.

Imagerie X à deux et trois dimensions

SOLEIL sera particulièrement performant dans ce domaine, avec trois lignes complémentaires, du meilleur niveau. Les mesures pourront s'y effectuer à basse température, dans des conditions non invasives. Une longue ligne (145 m), NANOSCOPIUM, opérera dans la gamme d'énergie allant de 5 à 20 keV. Cette ligne sera dédiée à des expériences de micro et nanosondes X à balayage, avec une résolution spatiale de 30 nm à 1 μm , combinant la fluorescence, la spectroscopie d'absorption et l'imagerie de contraste de phase des rayons X (voir l'article de J. Baruchel *et al.*) dans différents domaines comme la microélectronique et les matériaux, les sciences biomédicales, géobiologiques et de l'environnement.

Une seconde longue ligne, ANATOMIX, offrira une cohérence 2D quasi complète pour des mesures tomographiques (c'est-à-dire dans le volume de l'échantillon), sur une gamme allant de quelques dizaines de nanomètres au micromètre. Il s'agit de relier l'organisation spatiale multi-échelle aux propriétés macroscopiques. Cette ligne est promue par les communautés des matériaux avancés et du biomédical.

Enfin la troisième ligne, TXM, opérera dans le domaine des X mous (fenêtre de l'eau, 300–500 eV), et sera dotée d'une imagerie 3D jusqu'à 15 nm de résolution. Le contraste d'absorption entre l'oxygène, le carbone et l'azote permettra d'étudier des échantillons entièrement hydratés. Les champs scientifiques concernés sont la matière molle, les colloïdes, la biologie du développement et la bio-ingénierie.

2. Les trinités céleste et terrestre, tableau du peintre baroque Murillo, sur lequel ont été prélevés des micro-échantillons examinés au rayonnement synchrotron à SOLEIL. La spectroscopie d'absorption X à l'échelle du micron a permis d'associer la perte de la couleur du pigment bleu dans ce tableau à un changement de coordination de l'ion Co^{2+} , de tétraédrique à octaédrique, corrélé à une migration des ions potassium. Publication : L. Robinet *et al.*, *Analytical Chemistry* **83** (2011) 5145.



© National Gallery, London

Plates-formes et hôtels à projets

Si les installations de rayonnement synchrotron ont jusqu'ici cherché à offrir des lignes optimisées et le support associé, l'étape suivante consistera à fournir, de surcroît, un service coordonné plus ambitieux. Des projets à court, moyen et long termes, qu'ils soient académiques ou de R&D industriel, pourront utiliser plusieurs lignes. Appelés « hôtel à projets », ils seront ouverts aux consortia nationaux ou européens qui travaillent dans des domaines scientifiques ou des disciplines émergentes nécessitant une approche coordonnée. C'est notamment le cas de la plate-forme IPANEMA, dédiée à l'étude des matériaux anciens, associant plusieurs organismes de recherche français, qui ouvrira en 2013 (voir p. 105).

Un autre hôtel à projets est envisagé dans les domaines de la biologie, de la biotechnologie et de la santé. Cet hôtel donnera accès à huit lignes offrant toutes les méthodologies et instruments *ad hoc*, de la cristallographie macromoléculaire à la nanotomographie. Des développements d'analyse d'images seront effectués en partenariat avec l'INRIA, en vue d'une recherche industrielle innovante et d'applications pharmacologiques et biomédicales (conception de médicaments, pénétration et distribution au sein de la cellule, cytotoxicité, médecine régénérative, ingénierie tissulaire et biomatériaux). ■

Paul Morin (paul.morin@synchrotron-soleil.fr)
Directeur scientifique, Synchrotron SOLEIL