

Chimie et rayonnement synchrotron : une histoire pleine d'avenir

Jean-Pierre Samama, Paul Morin et Serge Pérez

Les synchrotrons modernes exploitent les dernières avancées technologiques pour produire de la lumière d'une extrême brillance, allant de l'infrarouge aux rayons X durs. Plus de vingt-cinq ans ont été consacrés à une amélioration constante des conditions opérationnelles. Des avancées spectaculaires ont été obtenues, résultant de progrès réalisés en physique des accélérateurs, en électronique, en informatique, ainsi qu'en techniques du magnétisme et du vide. **Le temps de la maturité technologique est atteint.** Aux propriétés intrinsèques de la lumière synchrotron que sont la brillance, la cohérence et l'émission pulsée, s'ajoutent d'autres caractéristiques telles que le flux, la polarisation et la stabilité du faisceau.

Le rayonnement synchrotron dit « de troisième génération » offre ainsi des possibilités uniques d'analyse et de compréhension des mécanismes élémentaires, de la réactivité et des propriétés des assemblages et des interfaces. Fondés sur les propriétés électroniques des éléments, nous sommes au cœur de la chimie, une discipline fondamentale au sein des sciences de la nature, et dont l'omniprésence dans notre vie quotidienne conduit quelquefois à en oublier l'importance.

Les évolutions actuelles, pour ne pas dire les révolutions en termes d'innovations scientifiques et technologiques, s'accompagnent au quotidien de nouvelles applications qui concernent toutes les populations, qu'il s'agisse des énergies, des matériaux, de la santé, des transports ou des communications. Ce mouvement suscite de nouvelles exigences, en termes de connaissances fondamentales et de maîtrises, en termes de qualité, avec des impacts économiques et environnementaux majeurs.

Les développements scientifiques et instrumentaux peuvent désormais être mis en jeu de manière concertée afin de répondre aux besoins, aux préoccupations et aux interrogations fondamentales de la société, parmi lesquels : la connaissance profonde de la complexité et de la diversité des êtres vivants, le fait planétaire, les ressources et l'énergie, les progrès des conditions de vie, la maîtrise des nanosciences et nanotechnologies, et la nouvelle génération de molécules, de matériaux avancés et d'instruments de pointes.

Les interfaces de la chimie avec les autres disciplines sont croissantes et les outils de caractérisation et d'analyse doivent y apporter toutes leurs contributions. Les synchrotrons de 3^e génération y jouent un rôle majeur. Les autres sources de lumière très intenses et pulsées y contribueront bientôt aussi. Les synchrotrons de

3^e génération permettent par la gamme d'énergie et par les propriétés des faisceaux de photons qu'ils délivrent, de mettre en œuvre toutes les méthodologies d'études des interactions rayons X-matière avec des précisions, des sensibilités et des résolutions qui ne cessent de croître, révélant des propriétés de la matière ignorées jusqu'à ce jour, mais indispensables aux exigences mentionnées précédemment. Les articles de ce numéro spécial de *L'Actualité Chimique* illustrent les applications de la diffraction, les applications de l'absorption X par les éléments, celles de ce même phénomène avec des faisceaux polarisés, et quelques applications qui exploitent la cohérence du faisceau de rayons X. La variété des thématiques que ces méthodologies impactent fortement est remarquable, allant de la biologie aux auto-assemblages moléculaires, des batteries à la séquestration du CO₂, des matériaux nouveaux à ceux du patrimoine, de l'asymétrie moléculaire aux atmosphères planétaires, ou encore de la chimie des nanoparticules et des interfaces à celle des organisations complexes, hétérogènes et hiérarchiques. En termes méthodologiques, les aspects temporels prennent également toute leur importance, qu'il s'agisse d'étudier des cinétiques de réactions (μ s à ms) ou bien d'élucider des dynamiques ultrarapides (ps à fs) qui gouvernent l'évolution de tel ou tel système sur une échelle plus longue.

Il est important de préciser que ces nouvelles connaissances résultent de l'implémentation sur les lignes de lumière des centres synchrotrons de développements technologiques majeurs concernant les optiques X et leurs composants, les détecteurs et les sources elles-mêmes. Ces développements sont le fruit de recherches pluridisciplinaires et leur mise en œuvre n'est possible que par des équipes aux compétences-métiers complémentaires. Ils permettent aujourd'hui d'aller encore plus loin et de concevoir et de construire des lignes de plus de 150 m de long, exploitant la cohérence du faisceau et le focalisant jusqu'à des tailles de quelques nanomètres pour des études multimodales sur un même échantillon. Avec de tels instruments au service des communautés scientifiques, les synchrotrons SOLEIL et l'ESRF offriront des méthodes et des outils d'analyse pour comprendre et explorer la matière à cette même échelle, avec des performances d'un ordre de grandeur supérieur aux possibilités actuelles.

Si les informations spatiales et d'imageries tridimensionnelles aux échelles nanométriques ont une importance évidente dans tous les domaines que couvre la chimie, les informations temporelles ne le sont pas moins. De telles informations sont essentielles pour ce qui concerne les réactivités, tout particulièrement dans les domaines de la catalyse et des

énergies. SOLEIL apportera à ces communautés une ligne de lumière dédiée à ces études, couplant le suivi des phénomènes catalytiques ou électrochimiques à l'échelle de quelques dizaines de millisecondes, par le suivi quasi simultané de l'état et de la spéciation de plusieurs éléments, de la formation ou de la transformation des composants, des réactifs et des produits. Les perspectives dans le domaine des études résolues en temps sont alimentées à court terme à SOLEIL avec le développement du « slicing », technique permettant de transférer un peu d'énergie au paquet d'électron à l'aide d'un laser femtoseconde intense et de générer ainsi des pulses X de 100-150 fs. La réflexion à plus long terme a conduit SOLEIL à imaginer une source « de cinquième génération » (LUNEX5, en étroite collaboration avec l'ESRF et d'autres partenaires) : l'accélération des électrons est apportée par le champ intense d'un plasma créé par laser, pour générer ensuite un rayonnement cohérent de type laser à électron libre. L'intérêt majeur sera non seulement de rendre plus compact ce genre de source, mais surtout de viser des résolutions temporelles encore plus courtes.

Des développements comparables sont également mis en œuvre à l'ESRF dans le domaine des expériences en temps résolu et d'imagerie. Ils s'inscrivent dans le cadre de l'ambitieux programme d'Upgrade mené à l'ESRF qui a été conçu en complément des capacités offertes par les différentes installations nationales de rayonnement synchrotron. Le projet d'extension vise à mettre l'accent sur les moyens de caractériser la matière à des échelles inférieures à 100 nm de manière routinière en temps réel et dans des conditions réelles d'utilisation. Outre l'amélioration des performances de l'accélérateur et du faisceau d'électrons, le programme permettra la réalisation de huit nouveaux ensembles de lignes de lumière, composés de quinze stations expérimentales indépendantes. Un facteur d'amélioration supérieur à mille (au maximum des performances) est attendu pour l'ensemble des lignes de lumière.

Innovation et industrie : outil incontournable dans de nombreux domaines en recherche fondamentale, la demande de rayonnement synchrotron par les différentes communautés scientifiques ne cesse de croître. **Dans plusieurs domaines disciplinaires, on est passé du temps de l'expérimentation à celui de la mesure.** L'ESRF et SOLEIL se sont structurés afin de répondre aux exigences des recherches finalisées en offrant aux partenaires industriels un accès rapide et totalement confidentiel. De très nombreuses techniques utilisant les rayons X, notamment l'imagerie, la diffraction, la diffusion aux petits angles et les diverses spectroscopies, sont directement adaptées aux problématiques de recherches industrielles, particulièrement dans le domaine de la chimie, pour étudier de manière non destructive « des matériaux réels, en conditions réelles et en temps réel. »

Les partenariats : outre leur mission au service de nombreuses communautés scientifiques, les « très grandes infrastructures de recherche » (TGIR) telles que des synchrotrons jouent un rôle structurant dans l'établissement de partenariats scientifiques. Autour de l'ESRF et de l'ILL, l'intégration de tous les acteurs de la biologie structurale à Grenoble a conduit à la création du partenariat PSB (« Partnership for structural biology »). D'autres partenariats sont en train de voir le jour dans le domaine de la matière molle (« Partnership in soft condensed matter ») ou encore des matériaux avancés ou de la paléontologie. Autour du synchrotron SOLEIL, la création de la plate-forme IPANEMA a pour mission de venir en support des laboratoires et institutions spécialisés dans l'étude des matériaux, de l'archéologie, de la paléontologie, de la conservation du patrimoine culturel et des environnements anciens.

La chimie est créatrice, en interface avec l'ensemble des autres disciplines et au cœur d'une science qui gagne en complexité. Ses interfaces avec la biologie ont toujours été fortes et se développent aujourd'hui par les innovations « biomimétiques » et « bio-inspirées ». Les orientations nouvelles en science des matériaux sont majeures, tandis que la chimie supramoléculaire, les nano-objets et leurs applications, les hybridations organo-minérales, la matière molle, la chimie douce nourrissent des domaines nouveaux et émergents. Cette complexité de la science moderne, potentiel d'innovation et de bien-être, requiert des plates-formes d'analyses et de caractérisations d'excellence, parmi lesquelles le synchrotron national SOLEIL et l'ESRF contribueront pleinement par leurs développements et leurs performances.



J.-P. Samama



P. Morin



S. Pérez

Jean-Pierre Samama et **Paul Morin** sont directeurs scientifiques de SOLEIL*.

Serge Pérez est directeur scientifique de la division des expériences de l'ESRF, en charge des programmes de sciences du vivant, de l'imagerie par rayons X et des sciences de la matière molle**.

* Synchrotron SOLEIL, L'Orme des Merisiers, BP 48, F-91192 Gif-sur-Yvette Cedex.

Courriels : jean-pierre.samama@synchrotron-soleil.fr ; morin@synchrotron-soleil.fr

** European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), BP 220, F-38043 Grenoble Cedex 09.

Courriel : serge.perez@esrf.eu



Société Chimique de France

facebook

La SCF sur Facebook, vous aimez ?
Parlez-en autour de vous,
et invitez vos amis et collègues à nous rejoindre !

• www.facebook.com/pages/Soci%C3%A9t%C3%A9-Chimique-de-France/114534205270205