

L'accélérateur d'électrons SIRIUS du Laboratoire des Solides Irradiés

Un outil unique pour l'étude des effets d'irradiation dans les matériaux

Bruno Boizot⁽¹⁾ et **Martine Soyer⁽²⁾** (martine.soyer@polytechnique.edu)

(1) Responsable de l'installation SIRIUS. (2) Directrice du LSI.

Laboratoire des Solides Irradiés (LSI), UMR 7642 CEA-École polytechnique-CNRS, 91128 Palaiseau Cedex.

Le Laboratoire des Solides Irradiés (LSI) vient de renouveler son installation d'irradiation aux électrons implantée à l'École polytechnique.

Le nouvel équipement (fig. 2), appelé SIRIUS (Système d'IRradiation pour l'Innovation et les Utilisations Scientifiques), a été financé par la région Île-de-France, l'École polytechnique et le CEA, et a été inauguré le 19 novembre 2012.

Ouvert à la communauté scientifique, il offrira des moyens uniques d'étude *in situ* des propriétés physiques des matériaux sous irradiation.

Le premier accélérateur d'électrons Van de Graaff du LSI, en service depuis 1975, était au départ essentiellement consacré à l'étude des effets d'irradiation dans les métaux et alliages. Cependant, au cours des quinze dernières années, les thématiques abordées ont fortement évolué, accordant une place de plus en plus importante à des travaux sur des matériaux non métalliques. Les études de l'effet du désordre sur la dynamique de vortex dans les supraconducteurs à haute température critique et sur les propriétés des semi-conducteurs ont constitué des éléments précurseurs. Le nombre et le type de matériaux étudiés sur cette précédente installation, ainsi que la variété de leurs propriétés, ont considérablement augmenté. On peut citer, par exemple, les diélectriques à grande bande interdite (diamant, silice), les céramiques (de plus en plus utilisées en ambiance radiative), les verres (évolution de la microstructure sous irradiation, mais aussi contrôle des propriétés optiques), les polymères (vieillessement, mais aussi contrôle de la réactivité chimique, avec application à la synthèse de matériaux nouveaux), les matériaux géologiques...

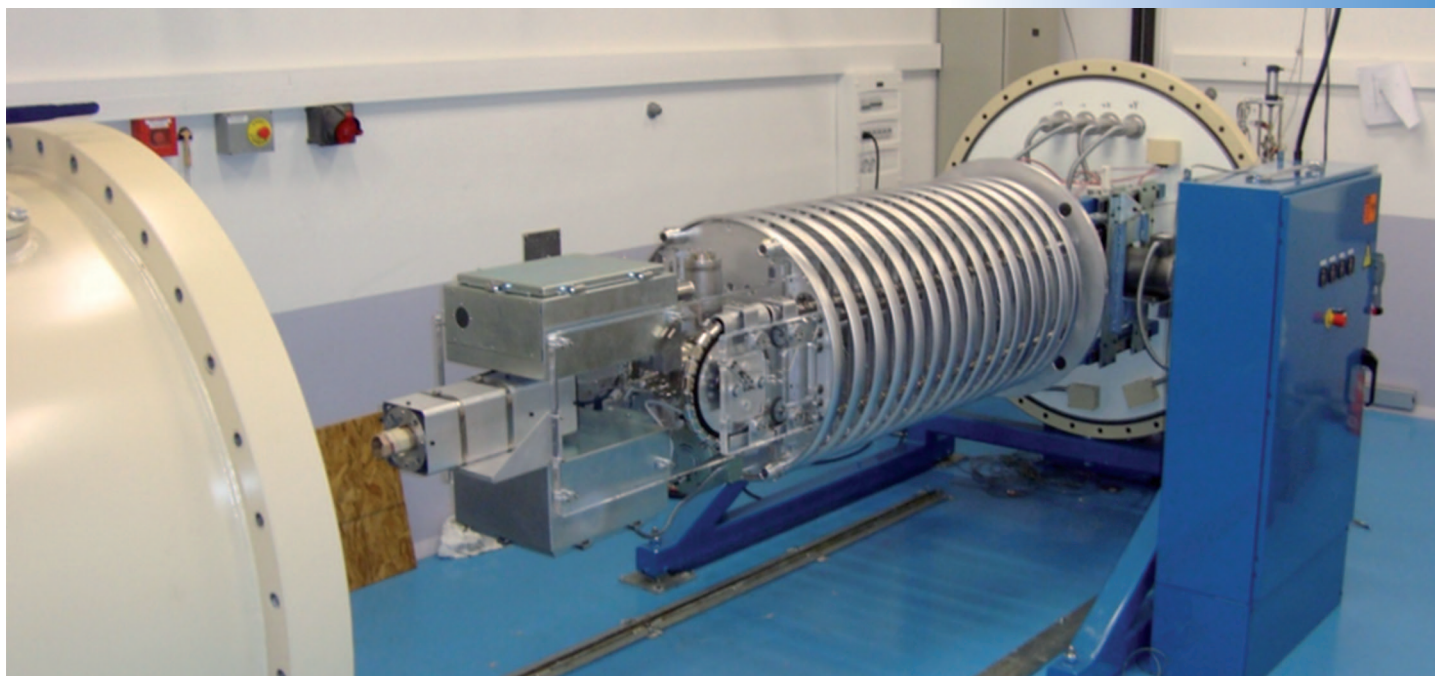
La nécessité de remplacer l'ancien accélérateur Van de Graaff arrivé en fin de vie, a offert l'opportunité de réaliser une plateforme d'irradiation aux électrons unique au monde, associant à la fois des conditions d'irradiation diversifiées (courant de quelques nA à 50 μ A, énergie de 150 keV à 2,5 MeV, surface irradiée allant de quelques μ m² à quelques dizaines de cm², possibilité



1. Cellule d'irradiation à 20 K en ligne sur l'installation SIRIUS.

d'irradiations à fort courant et à basse température, 20 K, fig. 1), et une variété accrue de méthodes d'étude *in situ* (optiques, électriques, électrochimiques) pouvant être mises à la disposition d'une vaste communauté (voir encadré).

Un faisceau d'électrons dans la gamme d'énergie 150 keV-2,5 MeV interagit avec la matière en induisant des excitations électroniques et des chocs balistiques. Le parcours des électrons de quelques MeV dans la matière étant de l'ordre du millimètre, l'irradiation aux électrons induit des modifications structurales homogènes dans le volume du matériau. Ceci permet l'utilisation d'une large gamme de méthodes de caractérisation, comme des nouvelles méthodologies spectroscopiques *in situ* pour étudier le comportement du matériau pendant l'irradiation, ainsi que les processus de relaxation hors irradiation.



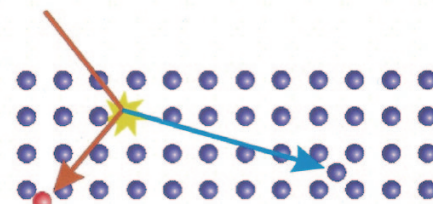
2. Le nouvel accélérateur d'électrons du LSI : un accélérateur Pelletron, fabriqué par la société NEC (www.pelletron.com).

Citons ci-dessous quelques exemples de recherches qui peuvent être menées sur l'installation SIRIUS.

- Dans un choc balistique produit lors d'une irradiation aux électrons, compte tenu du rapport réduit entre la masse de l'électron et celle de l'ion, l'énergie transférée à ce dernier est suffisamment faible pour qu'un seul ion du réseau soit déplacé (fig. 3). On peut donc, avec les électrons, étudier l'**influence de chocs balistiques isolés dans les matériaux**. La possibilité d'induire ce processus élémentaire dans la matière est indispensable dans les études sur les métaux et alliages, car il permet la mesure des énergies de seuils de déplacements atomiques, une donnée importante pour la simulation numérique des matériaux sous irradiation.
- L'**introduction contrôlée de défauts** produits, lors d'une irradiation, par des chocs balistiques est également un outil de choix en physique du solide. Par exemple, on peut étudier l'état fondamental des nouveaux supraconducteurs en comparant la diminution de la température critique T_c et de la densité superfluide n_s induite par les défauts, avec des prévisions théoriques. L'irradiation est également très utile pour la physique des vortex dans l'état mixte supraconducteur. Les vortex sont des lignes de flux magnétiques quantifiées qui forment un système modèle pour la physique des variétés élastiques (entités élastiquement déformables), interagissant avec un potentiel

désordonné. L'irradiation permet de modifier ce potentiel à volonté et de sonder les phases d'agrégation des vortex, voire de modifier leur diagramme de phase.

- Une problématique spécifique aux isolants (comparés aux matériaux métalliques) est leur beaucoup plus grande sensibilité aux effets d'excitation électronique. Il semble que le mécanisme « excitonique » (piégeage d'une paire électron-trou) soit à l'origine de ces différences. Ceci a des conséquences sur les propriétés d'usage de ces matériaux, comme leur tenue sous rayonnement et leur qualité d'isolation électrique. L'irradiation aux électrons est ainsi une source précieuse de renseignements pour **comprendre les modifications de la structure et des propriétés physiques des matériaux isolants sous excitation électronique**. Ceci intéresse essentiellement deux domaines d'application : l'aval du cycle du combustible nucléaire et le spatial. En effet, la compréhension des mécanismes de dégradation sous irradiation de certains colis de confinement de déchets nucléaires, comme les verres de stockage et les matériaux de barrière (argiles, ciments), est un problème important de l'aval du cycle du combustible. Par ailleurs, les irradiations aux électrons permettent également de mieux comprendre les perturbations constatées dans le fonctionnement de certains dispositifs opto-électroniques embarqués à bord des satellites soumis au rayonnement cosmique. ■



3. Choc balistique isolé induit par une irradiation aux électrons dans un matériau cristallin. Création d'une paire lacune-interstitiel (paire de Frenkel). En rouge : la trajectoire de l'électron. En bleu : la trajectoire de l'atome déplacé.

► Comment obtenir du temps de faisceau sur SIRIUS

Deux moyens sont à votre disposition.

- Le premier est de soumettre une proposition d'expérience au réseau EMIR (<http://emir.in2p3.fr/>), le réseau national d'accélérateurs pour l'Étude des Matériaux sous IRradiation, dont SIRIUS fait partie.
- Le second consiste à nous envoyer directement une proposition de temps de faisceau, à l'adresse électronique sirius@polytechnique.fr. Le fichier de demande de temps de faisceau sur SIRIUS peut soit nous être demandé à cette même adresse ou être téléchargé sur : www.lsi.polytechnique.fr/accueil/equipements/accelerateur-sirius/.

Dans tous les cas, les propositions d'expériences sont évaluées par un comité scientifique.