

Bientôt SOLEIL : la source française de rayonnement synchrotron

Roger Fourme¹, Marie-Paule Level², Isabelle Quinkal³

Synchrotron Soleil, L'Orme des Merisiers, Saint-Aubin, 91190 Gif-sur-Yvette

1. Directeur scientifique, Roger.fourme@synchrotron-soleil.fr

2. Adjointe au directeur de la division Sources et Accélérateurs, Marie-paule.level@synchrotron-soleil.fr

3. Chargée de communication, Isabelle.quinkal@synchrotron-soleil.fr

Projet initié au début des années 1990 au laboratoire d'utilisation du rayonnement électromagnétique (LURE) d'Orsay, la source française de rayonnement synchrotron SOLEIL fournira une lumière aux caractéristiques exceptionnelles, dès l'automne 2006, aux communautés scientifiques et industrielles. Cette lumière sera produite par des électrons relativistes circulant dans un anneau de 354 mètres de périmètre, puis exploitée dans 24 « lignes de lumière ». SOLEIL, actuellement en construction sur le plateau de Saclay, bénéficiera d'innovations technologiques développées par ses propres équipes, qui le placent au premier rang des centres synchrotron dits de 3^e génération. Les qualités de son rayonnement (brillance et gamme spectrale s'étendant des infrarouges aux rayons X) ouvrent de nouvelles perspectives pour sonder la matière. Aussi, ce grand équipement accueillera-t-il chaque année plus de 2000 utilisateurs spécialistes de domaines aussi variés que la biologie, la chimie, la science des matériaux, l'environnement, la physique, les sciences de la Terre ou le patrimoine culturel et l'archéologie.

Le rayonnement électromagnétique et les photons associés, un outil privilégié pour étudier la matière

Le rayonnement électromagnétique, c'est de la lumière. De la lumière au sens large bien sûr, non restreint au petit domaine de fréquence auquel la rétine de notre œil est sensible. Le photon est un concept introduit par Einstein, dans l'un de ses quatre articles fondamentaux publiés en 1905, pour modéliser les interactions entre le rayonnement électromagnétique et la matière qui s'effectuent par quantités discrètes d'énergie. Le photon est une particule quantique associée au champ électromagnétique (e.m.), dont la fonction d'onde est l'onde e.m. elle-même. Sa vitesse c dans le vide, invariante dans tout référentiel, est celle de la lumière (voisine de 300 000 km/s). Le photon a une durée de vie infinie et suit les géodésiques de l'espace-temps. Il emporte une énergie liée à la fréquence ν de l'onde e.m. associée par la relation $E = h\nu$, et son impulsion est $p = h\nu/c$, h étant la constante de Planck.

Les photons sont un outil essentiel pour sonder la matière, et ceci tient à un ensemble de raisons. Il existe divers procédés pour produire du rayonnement e.m. de la fréquence souhaitée. Les sources disponibles permettent de produire des ondes e.m. dans une très large gamme de fréquence (donc d'énergie de photons), de brillance, d'intensité et de flux. On sait comment modifier la géométrie des faisceaux e.m. (par exemple pour les focaliser) et choisir et modifier leur état de polarisation, y compris dans le domaine des rayons X. La gamme des détecteurs disponibles est également large. Par ailleurs, les conditions de sécurité dans l'utilisation des faisceaux e.m. sont bien maîtrisées. En choisissant l'énergie des photons, on sélectionne le phénomène physique étudié. Enfin, les photons, selon leur énergie et les conditions expérimentales, permettent l'analyse de la surface et/ou du volume des échantillons sondés.

Le rayonnement synchrotron

Une particule chargée qui subit une accélération émet du rayonnement e.m., donc éjecte des photons. Dans un tube à rayons X médical, par exemple, les électrons émis par le filament cathodique, puis accélérés, sont brutalement ralentis dans le métal de l'anode et émettent alors du rayonnement continu baptisé « *bremsstrahlung* » (rayonnement de freinage). Lorsque l'électron se déplace à vitesse relativement faible par rapport à l'observateur, il rayonne dans toutes les directions de l'espace un rayon-

nement monochromatique (c'est-à-dire d'une seule fréquence) (figure 1). Quand sa vitesse augmente pour atteindre une fraction appréciable de la vitesse de la lumière, l'émission devient de plus en plus anisotrope. Pour un électron de très haute énergie, donc animé d'une vitesse proche de celle de la lumière, l'anisotropie devient extrême. Dans ce cas, du point de vue de l'observateur dans le système du laboratoire, le rayonnement e.m. est confiné dans un cône de très petite ouverture dont l'axe est le vecteur-vitesse de l'électron (figure 1).

De plus, le rayonnement n'est plus monochromatique, mais « blanc » : on est en présence d'une distribution continue de fréquences. Ces caractéristiques découlent directement des lois de l'électromagnétisme et des postulats et résultats de la relativité restreinte, théorie exposée dans un autre article d'Einstein de la miraculeuse année 1905.

Le principe du rayonnement d'un électron en mouvement apparaît pour la première fois dans un ouvrage de J. Larmor en 1897 en ce qui concerne les électrons non relativistes, puis dans les ouvrages de A. Lienard et E. Wiechert en 1898 pour les électrons de vitesse arbitraire (concept des potentiels retardés). Il faut ensuite attendre les années 1950 pour qu'apparaissent des ouvrages de référence tels les articles de

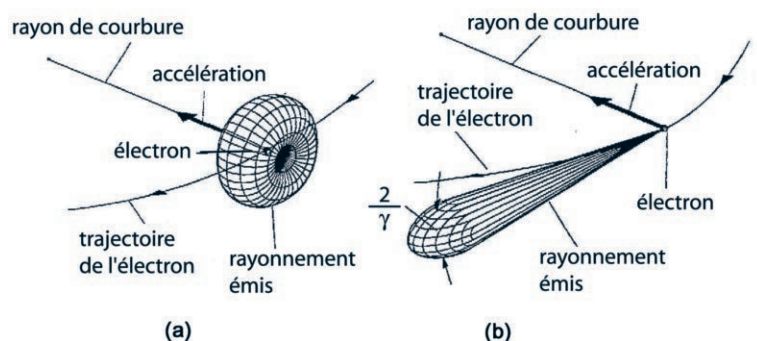


Figure 1 : Production de rayonnement par un électron lent (a) ou relativiste (b) sur orbite circulaire.

(a) Quand la vitesse de l'électron accéléré est faible par rapport à c :

- émission de rayonnement e.m. dans toutes les directions
- photons mono-énergétiques

(b) Quand la vitesse de l'électron accéléré est proche de c :

- émission concentrée autour du vecteur vitesse dans un cône d'ouverture totale proche de $2/\gamma$ radian (γ , le facteur de Lorentz en relativité restreinte, est égal au rapport de l'énergie totale de la particule à l'énergie associée à la masse au repos)
- distribution continue en énergie des photons émis.

J. Schwinger en 1949, de D. Ivanenko et A. Sokolov (traduction allemande en 1953), de M. Sands en 1955 et enfin l'ouvrage général de J.D. Jackson en 1962 (*Classical Electrodynamics*).

La mise en évidence expérimentale du rayonnement produit par des électrons relativistes eut lieu d'abord indirectement en 1946, par l'observation de la variation de l'orbite de l'électron (J. P. Blewett), puis directement en 1947, par l'observation du rayonnement lui-même (H. Pollock et R. Langmuir) à travers le hublot d'un synchrotron produisant des électrons de 70 MeV dans les laboratoires de la General Electric à Schenectady (USA), d'où le nom de « rayonnement synchrotron ».

Les sources de rayonnement synchrotron sont des accélérateurs d'électrons qui dérivent de ceux conçus initialement pour la physique des hautes énergies. L'idée des anneaux de collisions est née chez les physiciens des hautes énergies (B. Touschek, Frascati, 1961) afin de disposer de toute l'énergie des particules dans l'interaction. Il s'agit d'anneaux dans lesquels des particules (ici, e^+ , e^-) circulent sur la même orbite dans des directions opposées. Le premier anneau, ADA, d'énergie 160 MeV (anneau italien installé à Orsay en 1963), fut bientôt suivi de beaucoup d'autres dans les différents pays, dans une course aux énergies de plus en plus grande qui a culminé avec le LEP (100 GeV et 27 km de circonférence) au CERN, mis en service en 1989. Le rayonnement synchrotron a tout d'abord été une nuisance. En effet, l'effet synchrotron dissipe de l'énergie des particules et engendre du rayonnement parasite : le grand diamètre du LEP est imposé par la nécessité d'avoir une faible courbure de la trajectoire des particules, de manière à limiter la production de rayonnement synchrotron. Puis les physiciens se sont avisés que ces anneaux étaient des sources de lumière de grand intérêt. Dans un premier temps, il y eut utilisation partagée entre physiciens des hautes énergies et physiciens du rayonnement synchrotron (par exemple ACO et DCI au laboratoire LURE à Orsay, ou SPEAR à Stanford). Puis des anneaux de stockage de 2^e génération, dédiés seulement à la production de rayonnement synchrotron, ont été réalisés (par exemple, le SRS à Daresbury près de Manchester en Grande-Bretagne, SuperACO à Orsay). Nous en sommes à la troisième génération, celle des anneaux conçus pour obtenir des sources de rayonnement synchrotron *très brillantes, très stables et taillées sur mesure* pour diverses applications.

Les anneaux de stockage à électrons sont souvent appelés dans le langage courant des synchrotrons, ce qui est plus court et plus percutant, mais impropre. En réalité, un anneau de stockage est en général associé à un (vrai) synchrotron – appelé encore « booster » – qui accélère jusqu'à l'énergie requise les électrons produits par un petit accélérateur linéaire – ou « linac » – avant de les injecter dans l'anneau de stockage (voir figure 2).

Comment fonctionne un anneau de stockage à électrons

Dans un tel anneau, la trajectoire des électrons est constituée d'une alternance de parties courbées en arc de cercle (par application d'un champ magnétique permanent produit par des aimants dits de courbure) et de sections droites. L'énergie perdue par les électrons à chaque révolution sous forme de rayonnement leur est restituée intégralement durant la traversée d'une cavité où règne un champ électrique longitudinal produit par un système radio-fréquence (RF). Seuls les électrons qui arrivent en phase avec l'oscillation du champ radio-fréquence sont maintenus en orbite stable : cet effet provoque le regroupement des particules en « paquets » équidistants. La structure magnétique de l'anneau comprend, outre les aimants de courbure, un ensemble de quadripôles qui ramènent les électrons sur l'orbite moyenne, et d'hexapôles qui corrigent diverses aberrations. Lors de la phase de

remplissage (dite phase d'injection), les électrons produits par le booster sont injectés dans l'anneau et se stabilisent, ou sont perdus dans les parois. Une fois l'anneau « rempli » (alors la circulation des particules correspond à un courant continu moyen d'une fraction d'Ampère), l'injection est arrêtée et les électrons peuvent rester en orbite plusieurs heures.

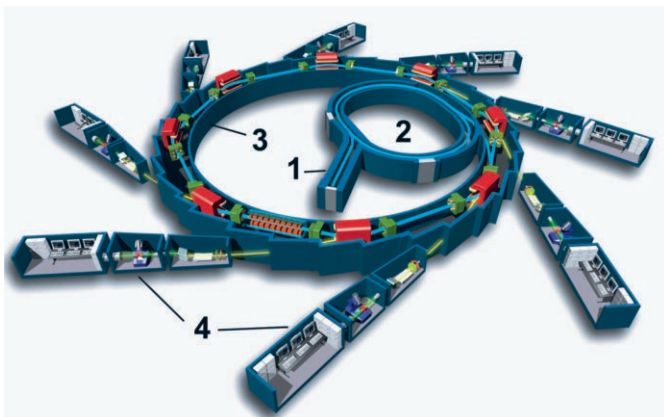


Figure 2 : Vue d'artiste d'un ensemble synchrotron, comprenant LINAC (1), booster (2), anneau de stockage (3) et des lignes de lumière (4).

Le rayonnement synchrotron est extrait dans des « lignes de lumière » raccordées tangentiellement à la chambre à vide dans laquelle circulent les électrons. À chaque fois qu'un paquet passe devant un trou d'extraction, un éclair de rayonnement synchrotron est émis dans la ligne de lumière correspondante. L'émission synchrotron est donc pulsée. Toutefois, à raison de millions d'éclairs par seconde, on peut considérer pour beaucoup d'applications que l'émission recueillie à l'extrémité de chaque ligne de lumière est continue. La structure pulsée de l'émission peut être mise à profit dans des expériences impliquant une résolution temporelle ; à cette fin, l'anneau est spécialement injecté avec un nombre réduit de paquets contenant le plus de charges possible.

Les anneaux de 3^e génération accueillent dans leurs sections droites des dispositifs magnétiques spéciaux appelés **onduleurs** et **wigglers**. Un onduleur est une structure magnétique périodique dans lequel les électrons décrivent une trajectoire en forme de sinussoïde de faible amplitude. Pour chaque électron, les émissions successives dans les diverses arches de la sinussoïde interfèrent entre elles. Il en résulte, d'une part une concentration de l'énergie rayonnée dans une bande fondamentale et des bandes harmoniques (au lieu du spectre continu produit dans un aimant de courbure) et d'autre part une réduction de la divergence du faisceau synchrotron. Dans ces conditions, la **brillance** (paramètre fondamental défini comme le nombre de photons émis par seconde, à une certaine longueur d'onde et dans une bande spectrale déterminée, par unité de surface de source et par unité d'angle solide) devient très élevée. Le domaine spectral d'utilisation de chaque onduleur dépend de sa période magnétique. Il est possible aussi d'ajuster à volonté l'état de polarisation des photons. Les **wigglers** sont des systèmes intermédiaires entre aimants de courbure et onduleurs. *Ainsi, un anneau de 3^e génération est un vélodrome à électrons, truffé d'éléments magnétiques d'insertion taillés sur mesure pour une application déterminée.*

Les photons émis dans les aimants de courbure et les sections droites équipées d'éléments d'insertion sont ensuite dirigés par des systèmes optiques (miroirs classiques ou multicouches, réseaux, cristaux) vers les stations expérimentales utilisatrices du rayonnement et disposées à l'extrémité des lignes de lumière. Chaque ligne de lumière constitue un véritable laboratoire où tous les éléments, depuis la source de

rayonnement jusqu'au détecteur et au système d'acquisition de données, sont conçus et optimisés spécifiquement pour un ou plusieurs types d'applications.

<i>Principales caractéristiques du rayonnement synchrotron</i>	<i>Avantages potentiels</i>
Étendue spectrale allant de l'infrarouge aux rayons X durs	Source universelle
Brillance très élevée	Réalisation d'expériences rapides et/ou à très haute résolution spectrale ou spatiale
État de polarisation : linéaire, circulaire ou elliptique	Parfaitement contrôlable
Structure pulsée	Études résolues en temps
Grande stabilité	Mesures précises, potentiel d'expériences d'imagerie

Tableau 1. Caractéristiques du rayonnement synchrotron, et ses principaux avantages.

De LURE à SOLEIL

Une source de rayonnement synchrotron est un outil crucial pour la recherche et les applications. C'est démontré par l'existence, chez nos voisins, de sources synchrotron de 3^e génération *nationales*, soit opérationnelles (Suisse, Italie, Allemagne, Suède), soit en construction (Grande-Bretagne, Espagne). Il y a de plus une source *européenne de haute énergie*, l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) à Grenoble. À l'échelle mondiale, il existe actuellement environ 84 sources de rayonnement synchrotron opérationnelles ou en construction, dont 17 de 3^e génération.

Le projet SOLEIL (acronyme de *Source Optimale de Lumière d'Énergie Intermédiaire de LURE*) a été initié il y a environ 15 ans au laboratoire LURE (Laboratoire d'Utilisation du Rayonnement Électromagnétique) d'Orsay. C'est au LURE, créé en 1972 et arrêté (pour la production de rayonnement synchrotron) fin 2003, qu'a commencé l'aventure française du rayonnement synchrotron. Le projet SOLEIL a fait l'objet d'une convention des tutelles CEA et CNRS pour la création d'un groupe d'études sur une durée de 3 ans qui a abouti en mai 1999 à l'élaboration d'un avant-projet détaillé comprenant toutes les spécifications nécessaires pour démarrer la construction.

Nous n'évoquerons pas ici la belle et tumultueuse saga qui s'ensuivit pour aboutir, en septembre 2000, à la décision de construire SOLEIL, sur le site du plateau de Saclay. Elle n'a guère d'équivalent dans toute l'histoire de la science française. Ce qui importe est qu'une décision positive ait finalement été prise, suite à l'avis positif d'un organisme instruisant les décisions de l'Assemblée Nationale et du Sénat, l'OPECST (Office Parlementaire d'Évaluation des Choix Scientifiques et Technologiques). Nous soulignerons seulement quelques aspects techniques et scientifiques de ce projet, qui est en France l'un des plus grands chantiers scientifiques du moment.

Une société civile, Synchrotron-SOLEIL, a été créée pour la construction et la mise en œuvre de l'installation. Le Conseil d'administration de la société est constitué de représentants du CNRS et du CEA. Le financement de la construction est assuré majoritairement par des collectivités (Région Ile-de-France, Département de l'Essonne, Région Centre), et pour le reste par les organismes de recherche. Actuellement, le projet est financé pour la construction de 24 lignes de lumière. Le calendrier actuel, prenant en compte les ressources tant en

personnel que budgétaires, vise à mettre en service une douzaine de ces lignes en 2006, avec le début de l'accueil des équipes extérieures (phase 1). Le reste du programme s'échelonne jusqu'en 2008 (phase 2). Par la suite, une vingtaine de lignes supplémentaires pourraient être installées sur l'anneau, moyennant de nouveaux investissements.

L'installation fournira sur chaque ligne aux utilisateurs, en régime de croisière, de l'ordre de 5500 heures par an de temps de faisceau.

SOLEIL accueillera pour des périodes plus ou moins longues plus de 2000 chercheurs par an sur ses lignes de lumière. Il gèrera sur son budget 350 emplois permanents, auxquels s'ajouteront une cinquantaine d'étudiants en thèse ou post-doctorat, des chercheurs invités, etc. Des enseignants-chercheurs des universités pourront être affectés à SOLEIL pour la partie recherche de leur activité statutaire, *via* des conventions liant le laboratoire aux universités concernées. Par ailleurs, des chercheurs d'organismes extérieurs (CNRS, CEA, INRA...) ou des enseignants-chercheurs pourront être associés à titre individuel à SOLEIL pour y faire tout ou partie de leur recherche et participer aux tâches générales.

Pour la recherche ou la formation, SOLEIL est un laboratoire très ouvert et bien connecté à son environnement, dans un contexte régional, national et international.

Pourquoi SOLEIL sera à la pointe de la technologie

L'étude qui est à l'origine du projet SOLEIL a permis de développer un certain nombre d'idées nouvelles et ainsi de marquer des points décisifs dans les performances des machines de 3^e génération d'énergie dite intermédiaire : la brillance et la durée de vie, mais également la stabilité du faisceau de photons (en position et en énergie) pour les utilisateurs, ont été améliorées.

L'**énergie des photons** est déterminée par l'énergie des électrons stockés, mais également par les caractéristiques des dispositifs d'insertion : pour un onduleur, plus la période magnétique est petite, plus l'énergie des photons émis est élevée. Des onduleurs de périodes différentes permettent de couvrir des domaines spectraux complémentaires. Par ailleurs, la durée de vie des faisceaux stockés croît avec l'énergie. On a donc tout intérêt, même pour la production de rayonnement VUV (lumière visible et ultra-violette), à disposer d'une énergie de machine suffisamment élevée ($E > 2.10^9$ eV = 2 GeV), pour garantir une bonne durée de vie et utiliser des onduleurs à grande période pour couvrir le spectre désiré. En revanche, une énergie trop élevée conduirait à des onduleurs trop longs ou à une dégradation inacceptable des optiques des lignes VUV à cause de la puissance émise. C'est à partir de telles considérations que l'énergie choisie a été 2,75 GeV, soit un facteur de Lorentz γ de 5380 ! Cette valeur permet à SOLEIL de fournir du rayonnement synchrotron de très haute brillance depuis l'infrarouge lointain (longueur d'onde de 300 μ m) jusqu'aux rayons X. SOLEIL couvrira 7 décades en longueur d'onde du rayonnement e. m. (et bien sûr en énergie des photons).

La **brillance** (définie plus haut) est le principal facteur de mérite des sources de 3^e génération. Cette grandeur permet de qualifier à la fois le flux de photons disponible sur l'échantillon, et la possibilité de le focaliser et de l'exploiter avec une très haute résolution spectrale. Une des solutions pour augmenter la brillance est d'équiper l'anneau de stockage d'onduleurs à grand nombre de périodes. Le gain en brillance par rapport à un aimant de courbure est alors de quatre ordres de grandeur. C'est dire l'importance du nombre et de la longueur des sections droites dans ces machines. Or, l'optique de SOLEIL a été particulièrement optimisée dans ce sens : l'anneau de SOLEIL a une circonférence de 354 m, dont 104 m

sont disponibles pour les onduleurs et les *wigglers*, soit 29% de la circonférence (21 sections droites utilisables pour accueillir une insertion). Un record, auquel on peut par exemple comparer les 17% correspondants pour l'ESRF.

Des **onduleurs de conception originale**. Deux lignes de lumière de phase 1 vont être équipées d'onduleurs développés spécialement à SOLEIL. La ligne DESIRS, fonctionnant dans les basses énergies (5-40 eV), bénéficiera des performances de l'onduleur HU640, constitué de successions de bobines fixes de 3 types différents (figure 3). Fruit d'un an et demi de recherches, il est capable de produire tout type de polarisation, de circulaire à linéaire à phase variable, et de faire varier très rapidement cette polarisation grâce à un champ horizontal inversable en 0,2 s avec une fréquence de 1 Hz. HU640 permettra par exemple la modélisation des processus fondamentaux de synthèse et de fragmentation en milieu interstellaire, études de dynamique qui nécessitent une grande réactivité de la source de lumière.

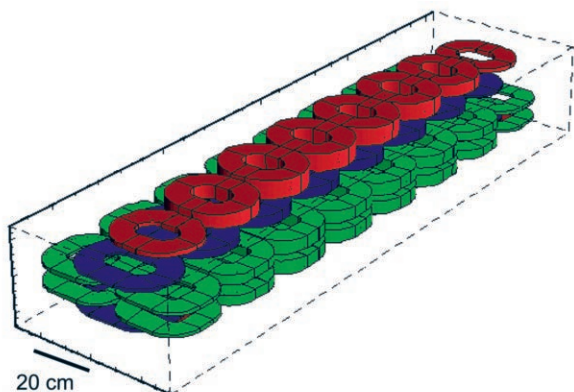


Figure 3 : Une des deux mâchoires de l'onduleur HU640. En vert : bobines à champ horizontal. En bleu : bobines à champ vertical. En rouge : bobines à champ vertical déphasé.

Second exemple, la ligne CASSIOPEE sera un outil de caractérisation extrêmement puissant des nouveaux matériaux et de leurs surfaces et interfaces, qui permettra de relier les propriétés électroniques, structurales et éventuellement morphologiques de nouveaux objets de dimensions réduites. CASSIOPEE nécessitait un onduleur capable de produire une polarisation du rayonnement circulaire ou linéaire (horizontal ou vertical). Or il n'existait pas d'onduleur assurant une polarisation circulaire pour les valeurs de champ auxquelles il doit fonctionner (le champ magnétique dépend de l'énergie des photons émis sur la ligne). C'est ainsi qu'a été mis au point le « design » de l'onduleur HU256, avec des dipôles en forme de H disposés verticalement et horizontalement. Mais un tel assemblage n'a pu être envisagé que parce que la chambre à vide dans laquelle circulent les électrons (entre les « mâchoires » de l'onduleur) sera équipée d'un dépôt de matériau NEG (Non Evaporating Getter). Constitué de titane, zirconium et vanadium, cet alliage recouvrant les parois en aluminium extrudé de la chambre à vide piège les molécules d'oxygène résiduelles et permet de s'affranchir de système de pompage dans le plan médian de l'onduleur. Développé depuis quelques années au CERN et déjà employé à l'ESRF, c'est à SOLEIL que ce matériau sera utilisé à grande échelle pour la première fois : il couvrira les parois des chambres à vide de toutes les sections droites de l'anneau. Quand une innovation en entraîne une autre...

Une fois atteint l'objectif de la brillance optimale, le challenge devient la **stabilité du faisceau** : courant, durée de vie, stabilité en énergie et position. Les collisions entre particules dans les paquets d'électrons circulant sont une limitation de la

durée de vie du faisceau. Un effort particulier a été réalisé sur l'optimisation de l'optique de l'anneau de stockage afin d'assurer la stabilité des électrons, menant à un gain de l'ordre d'un facteur 3 sur les performances habituelles, ce qui permet d'espérer des durées de vie de l'ordre de 15 heures en mode multi-paquets (grand nombre de paquets d'électrons très proches les uns des autres). Cette valeur est difficile à comparer directement avec celle d'autres synchrotrons de 3^e génération, car elle met en jeu un grand nombre de paramètres (énergie et taille des paquets d'électrons, ou dimensions de la chambre à vide dans les onduleurs à faible entrefer par exemple). Indiquons cependant qu'une durée de vie élevée représente un confort d'utilisation pour les expérimentateurs, qui demandent en général qu'elle soit supérieure à 10 heures.

Outre la dynamique du faisceau, la qualité de l'ultraviolet qui règne dans l'anneau est un autre facteur influant sur la durée de vie du faisceau. Nous avons évoqué plus haut l'emploi de dépôts NEG, dont la particularité est d'avoir un faible taux de désorption sous l'action des photons rayonnés. Le temps de conditionnement pour obtenir l'ultraviolet (10^{-9} mBar en présence du faisceau) devrait ainsi être diminué de l'ordre d'un facteur 30, réduisant ce temps d'environ un an à quelques semaines !

D'autres innovations vont bénéficier à la stabilité en énergie du faisceau. Organe crucial de l'anneau de stockage, le système radio-fréquence fournit le champ accélérateur nécessaire au faisceau. Or, les performances de brillance peuvent être limitées par des oscillations longitudinales des paquets d'électrons se produisant dans ces cavités. Afin d'éliminer ce phénomène, il faut des tubes faisceaux de large diamètre, ce qui impose des **cavités supraconductrices** (figure 4), seules capables de fournir le champ accélérateur. Leur conception originale « made in SOLEIL » permet d'amortir les modes parasites responsables des oscillations des paquets d'électrons, assurant une très grande stabilité en énergie du faisceau. Enfin, la puissance RF est fournie à ces cavités par des systèmes à amplificateurs solides, une technologie élégante et fiable, également mise au point à SOLEIL.

Pour assurer la **stabilité du courant moyen** dans l'anneau, gage d'une charge thermique constante sur les systèmes optiques des lignes, une injection quasi-continue du booster (mode dit « top-up » : injection d'une bouffée d'électrons toutes les 2 minutes) est prévue à SOLEIL. Ce mode d'injection, progressivement employé depuis environ 3 ans dans certains centres de 3^e génération, nécessite une extrême fiabilité de l'ensemble du système d'injection.

La **stabilité en position** a, quant à elle, été très travaillée à différents niveaux : **stabilité du bâtiment** assurée par une

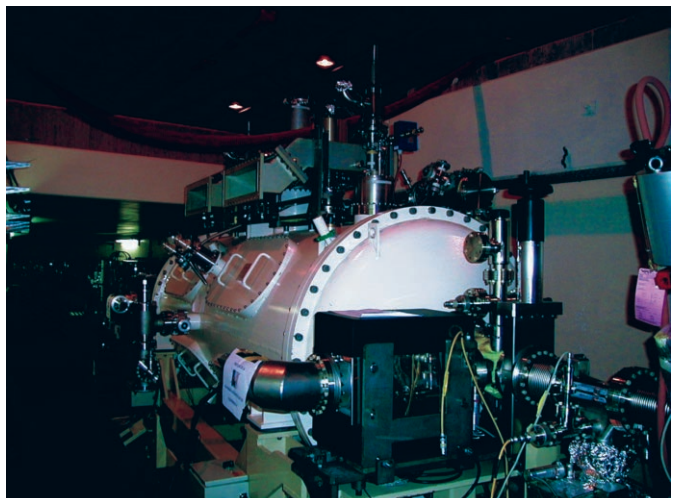


Figure 4 : L'enceinte (« cryomodule ») renfermant deux des quatre cavités supraconductrices qui seront installées sur SOLEIL. Cette photo a été prise quand le cryomodule était installé sur l'anneau de stockage de l'ESRF pour une série de tests.



Figure 5 : Installation des pieux pour stabiliser le bâtiment du synchrotron, en octobre 2003.

dalle épaisse flottant sur 600 pieux en béton plantés profondément dans le sable de Fontainebleau du Plateau de Saclay (figure 5) ; conception des **supports des aimants** (poutres) évitant les modes de vibration indésirables ; **moniteurs de position du faisceau** et **système de correction et de guidage** performants ; et enfin **compacité** de nombreuses lignes de lumière.

La stabilité locale

sur une durée de quelques heures escomptée de la position du faisceau d'électrons est de l'ordre du μm !

Brillance et stabilité combinées sont des qualités essentielles pour des expériences utilisant des faisceaux de lumière focalisés sur des surfaces de taille micronique voire sub-micronique, et l'imagerie en IR, VUV et rayons X mous et durs.

SOLEIL est donc une source universelle de lumière qui se prête à une multitude d'applications pluridisciplinaires. Le programme scientifique a été élaboré avec l'aide de groupes de travail et d'ateliers thématiques issus de larges communautés de chercheurs et répondra à de multiples problématiques de la science en train de se faire. Il comprend de manière équilibrée des expériences visant soit à caractériser les propriétés électroniques de la matière, soit à déterminer ses propriétés structurales.

Des performances au service de la recherche et de l'industrie

L'utilisation du rayonnement synchrotron concerne, nous l'avons déjà souligné, un très large ensemble d'activités de recherche, que ce soit en recherche fondamentale dans les sciences de la matière et celles du vivant, ou en recherche appliquée (figure 6).

En recherche fondamentale, SOLEIL couvrira les besoins en physique, en chimie et en sciences des matériaux, en sciences de la vie, en sciences de la terre et de l'atmosphère.

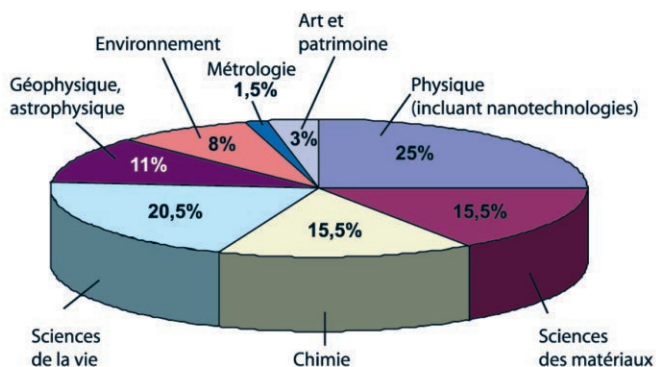


Figure 6 : Parts de temps qui seront consacrées aux différents domaines d'étude sur les lignes de SOLEIL.

Par ailleurs, SOLEIL souhaite s'ouvrir aux industriels, PMI, PME et groupes, et aux acteurs de certains grands enjeux sociétaux intervenant à différents échelons géographiques : régional, national, européen et international. Le centre de rayonnement synchrotron sera ainsi largement dédié aux activités de recherche appliquée et de développement, de contrôle qualité (des matières premières, des produits intermédiaires et finis) et de fabrication, dans des secteurs variés :

- pharmacie, biotechnologies, médical,
- chimie, pétrochimie, cosmétiques, agroalimentaire,
- métallurgie, mécanique, électronique,
- matériaux plastiques, céramiques, verres...,
- environnement, géophysique, sciences de la terre,
- défense et sûreté nationales, police scientifique,
- développement durable, sauvegarde du patrimoine culturel, etc.

Les techniques qui seront disponibles à SOLEIL couvrent la plupart des besoins d'analyse, de caractérisation et de mesures : absorption, diffraction, diffusion, fluorescence, microscopie, tomographie, imagerie, microspectroscopie... et permettent également la mise en œuvre de procédés de transformation de la matière : fabrication de microsystèmes, irradiation de matières premières biologiques ou de matériaux...

Parmi tous ces domaines, la **crystallographie des macromolécules** sera le pivot du programme en sciences de la vie. Les macromolécules biologiques sont en effet des machines dont le fonctionnement détaillé ne peut être décrit complètement que si l'on en connaît la structure tridimensionnelle (3D), ce que permet la cristallographie. Dans les dernières années, de nombreux génomes, y compris le génome humain, ont été séquencés et l'exploitation rationnelle de la marée d'information ainsi obtenue passe notamment par l'étude de la structure 3D de diverses protéines codées par le génome concerné. Le rayonnement X issu des onduleurs sous vide de SOLEIL est idéalement adapté pour l'enregistrement ultra-rapide des données de diffraction de cristaux de ces protéines, dont l'analyse mathématique conduit rapidement à la structure 3D. C'est pourquoi deux lignes de lumière sont en construction à SOLEIL pour cette application. Ces lignes seront munies d'un robot manipulant les cristaux, de détecteurs très performants et, à terme, d'un véritable système-expert assurant toutes les opérations depuis l'enregistrement des données de diffraction jusqu'à l'analyse structurale. Ces possibilités intéressent les industries du médicament. En effet, la pharmacologie moderne s'appuie de plus en plus sur la connaissance détaillée de la structure, par exemple, d'une protéine-cible, pour concevoir des inhibiteurs efficaces qui seront éventuellement utilisables comme médicaments. La figure 7 montre la structure d'un complexe membranaire résolue grâce à l'utilisation du rayonnement synchrotron (ESRF).

La cristallographie n'est que l'une des méthodes qui seront mises en œuvre dans le cadre du programme en sciences de la vie. Ce programme s'appuiera sur une dizaine de lignes de lumière utilisées à temps complet ou partiel. Il s'agit surtout de biologie structurale et d'imagerie dans un domaine spatial étendu (depuis la résolution atomique atteinte par la cristallographie jusqu'à l'imagerie de la cellule, de fibres et de tissus par IR, VUV et éventuellement microscopie X mous), avec souvent le couplage à des études résolues en temps.

L'étude de sites pollués est également une application du rayonnement synchrotron en fort développement. Un thème majeur en sciences de l'environnement concerne l'étude du comportement de substances produites par les activités humaines et qui peuvent être dispersées alentour (contact : rose@cerege.fr). Le rayonnement synchrotron constitue un outil bien adapté à de telles études. Parmi toutes les techniques, la spectroscopie d'absorption X (XAS) demeure incontournable. Tout d'abord le XAS agit comme une sonde sélec-

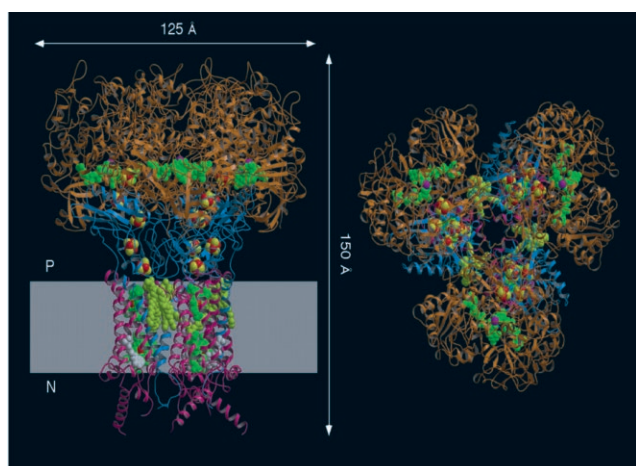


Figure 7 : Vue dans deux directions orthogonales de la structure cristallographique de la formate déshydrogénase, un système macromoléculaire membranaire [1]. Cette représentation montre, non pas les atomes, mais pour plus de clarté les éléments de la structure secondaire (notamment hélices-alpha et feuillets-béta) et les groupements fonctionnels. La position de la membrane est représentée en gris.

tive, c'est-à-dire qu'il est possible d'étudier un seul élément au sein d'un système complexe, d'en déterminer la structure électronique et l'environnement atomique. Il peut en effet être primordial de connaître l'état de valence des métaux impliqués dans certaines contaminations, car de cet état de valence peut dépendre leur toxicité. C'est par exemple le cas du chrome : la forme Cr(VI) est beaucoup plus toxique que la forme Cr(III), dont la mobilité et la bio-accessibilité sont limitées par une faible solubilité. Le spectre XAS (figure 8) permet de déterminer le rapport Cr(III)/Cr(VI).

La préparation simple des échantillons rend également possible des analyses *in situ*, c'est-à-dire sans perturber l'échantillon. Enfin, l'élément étudié est souvent en très faible concentration. Or la technique XAS est l'une des seules capable de sonder l'environnement local de tout élément trace dans des systèmes naturels (sols, sédiments, neige, végétaux et micro-organismes...). L'étude de tels systèmes pour lesquels les échantillons sont hétérogènes, et où les éléments sondés se trouvent à l'état de traces, tire un grand avantage de la brillance délivrée par les anneaux de 3^e génération tels que SOLEIL. Les qualités du faisceau de photons (intense et collimaté) permettent la combinaison d'expériences de microfluorescence qui donnent une cartographie des éléments, l'étude de la spéciation de ces éléments (micro-XAS) et la détection de phases précipitées à l'échelle du micron (microdiffraction X).

Comme les échantillons prélevés sur des sites pollués, les **objets anciens d'intérêt archéologique ou artistique** exigent des conditions particulières d'étude et de manipulation, dues ici à leur hétérogénéité, leur fragilité et leur rareté. Les laboratoires du domaine du patrimoine culturel et de l'archéologie testent ainsi, depuis une vingtaine d'années, l'utilisation du rayonnement synchrotron pour leurs recherches : microdiffraction des rayons X pour identifier finement les pigments utilisés en peinture ; absorption des rayons X pour comprendre la dégradation des vestiges archéologiques marins ; microscopie infrarouge pour appréhender les interactions entre emplâtres à base de plomb, datant de l'Antiquité, et la peau ; analyse par fluorescence X pour retrouver les méthodes de fabrication de verres anciens... Il s'agit de techniques particulièrement adaptées à ce type d'études car non (ou micro-) destructives. De plus, leur diversité ainsi que la possibilité de coupler plusieurs techniques, sont adaptées à l'analyse d'échantillons hétérogènes, minéraux ou organiques, amorphes ou structurés. La brillance du rayonnement synchrotron de SOLEIL permettra, avec un faisceau de quelques μm de diamètre, de répondre à la plupart des

besoins expérimentaux concernant les matériaux du patrimoine, par des mesures en cartographie et en tomographie sur des prélèvements. Concrètement, des partenariats se sont créés, notamment avec les acteurs du GDR (Groupement De Recherche) du CNRS « Matériaux du patrimoine et synchrotron SOLEIL », qui réunit une vingtaine d'équipes françaises utilisant le rayonnement synchrotron pour l'étude des matériaux du patrimoine. SOLEIL fournira également support, formation et expertise aux chercheurs dans le choix des méthodes d'étude, l'analyse des données et le développement de nouvelles expériences. Ce projet fait l'objet d'une interface dédiée.

SOLEIL portera encore mieux son nom lorsque ses photons **simuleront le rayonnement solaire** : par son caractère continu et accordable, le rayonnement synchrotron constitue en effet un excellent moyen de simuler l'activité ionisante du soleil. Ce sont alors les chercheurs en planétologie qui se tourneront vers SOLEIL... (contacts : odile.dutuit@lcp.u-psud.fr, christian.alcaraz@lcp.u-psud.fr). Dans les hautes couches des atmosphères planétaires, les espèces gazeuses qui sont soumises au rayonnement UV lointain provenant du soleil sont ionisées. C'est dans cette couche, appelée ionosphère, que se produisent bien des processus primordiaux, pouvant affecter la planète toute entière. Dans le cas de la Terre, il y a d'une part l'activité électromagnétique, régie par le champ magnétique de la planète, qui induit par exemple les phénomènes d'aurores boréales ou la réflexion des ondes hertziennes (télécommunication). Il y a d'autre part l'activité chimique, qui résulte de la réactivité exacerbée des espèces ioniques présentes dans ce milieu, et qui conduit à la synthèse d'espèces de complexité variable (phénomènes de croissance fractale dans l'atmosphère de Titan). Il est dès lors important de comprendre de façon détaillée les mécanismes régissant un tel milieu, d'autant plus que la conquête spatiale nous ouvre régulièrement de nouveaux horizons, aux caractéristiques très diverses. C'est la raison pour laquelle une forte activité de modélisation est engagée par les agences spatiales pour prévoir et interpréter, aussi finement que possible, les résultats scientifiques des missions spatiales. Mais pour

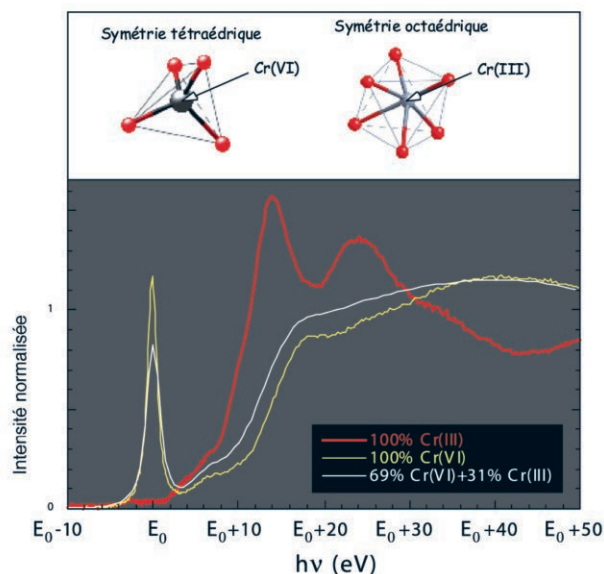


Figure 8 : Spectre XANES(*) au voisinage du seuil K du chrome ($E_0 \approx 5990$ eV) dans un échantillon de ciment dopé au chrome, comparé à deux références : Cr_2O_3 (Cr(III)) et Na_2CrO_4 (Cr(VI)). Le spectre d'absorption des rayons X présente un « pré-pic » intense autour de E_0 du CrVI.

(*) Le XANES (pour X-ray Absorption Near Edge Structure) est la méthode qui étudie la région des spectres XAS proche du seuil d'absorption d'un élément donné. Il renseigne sur la structure électronique et les liaisons chimiques de l'élément, ici le chrome.

affiner ces modèles, des données expérimentales sont nécessaires, et c'est à ce niveau qu'interviennent les études fondamentales de réactivité chimique élémentaire qui peuvent être menées sur un centre de rayonnement synchrotron tel que SOLEIL. Il devient ainsi possible de produire des espèces dont on connaît précisément le mode de formation, pour ensuite les faire réagir, en atmosphère raréfiée, avec un gaz correspondant à celui rencontré dans l'ionosphère considérée. De plus, le caractère pulsé de la lumière synchrotron permet une définition précise de l'énergie d'excitation portée par l'ion réactant. Autant d'atouts qui font de SOLEIL un outil aux caractéristiques extraordinaires pour aller plus loin dans la description précise de telles réactions chimiques.

Pour clore cette liste, loin d'être exhaustive, citons les recherches menées sur **les dispositifs d'enregistrement magnétique**, qui sont présents dans un nombre croissant de foyers. De plus en plus perfectionnés, ils rendent possible l'utilisation de supports à très haute densité de stockage. Par exemple, les têtes de lecture de disques durs les plus sensibles sont aujourd'hui capables de lire des informations magnétiques stockées sur des supports à plus de 10 Gbits/cm², soit 1 bit magnétique pour 100x100 nm². Ces têtes de lecture sont réalisées par un empilement successif de films minces non magnétiques, ferromagnétiques et anti-ferromagnétiques couplés. Le mécanisme de couplage entre couches et le rôle joué par les interfaces sont encore mal connus, leur compréhension nécessite des approches variées.

La haute brillance des nouvelles sources de rayonnement synchrotron a ouvert la voie à l'imagerie des surfaces, interfaces et films minces avec des résolutions spatiales latérales de l'ordre de 20 nm. Ainsi, un microscope à photoélectrons (PEEM, pour PhotoEmission Electron Microscope) permet de combiner la sélectivité chimique et magnétique de l'absorption X, la sensibilité aux couches les plus superficielles de la technique de photoémission et l'imagerie. Récemment, à l'ALS à Berkeley, une étude très complète de l'interface entre une couche antiferromagnétique d'oxyde de nickel, NiO, et une couche ferromagnétique de cobalt a permis de préciser l'origine du couplage magnétique entre les deux films [2].

L'installation d'un PEEM, prévu sur l'une des lignes de lumière de SOLEIL, permettra à la communauté scientifique de disposer d'un outil unique de visualisation des domaines magnétiques dans des dispositifs multicouches (contact : rachid.belkhou@lure.u-psud.fr). À l'avenir, il peut être envisagé d'enregistrer des images en des temps suffisamment courts pour accéder à des évolutions lentes de cartes de domaines magnétiques (échelle de la seconde).



Figure 9 : Hall expérimental en construction du synchrotron SOLEIL (juin 2005). À chaque redent, une ligne de lumière prendra place. Au total, 24 lignes seront ouvertes progressivement entre 2006 et 2010.

Perspectives

Grâce aux efforts de tous, équipes de SOLEIL mais aussi utilisateurs et chercheurs associés, SOLEIL sera une source polyvalente, d'une grande souplesse d'adaptation, incorporant de nombreuses idées novatrices en même temps que les meilleures techniques actuelles, ce qui devrait assurer la pérennité de l'installation pendant les 30 ans à venir. Le projet est maintenant dans sa phase la plus excitante, à quelques mois de son entrée en fonctionnement (figure 9), pour la fourniture des premiers photons début 2006 et un accueil des premiers utilisateurs à l'automne 2006.

Pour en savoir plus...

Mis à jour en continu, le site WEB de SOLEIL permet d'avoir des informations détaillées sur le projet et son état d'avancement : www.synchrotron-soleil.fr. Ce site comprend une section « ressources pédagogiques » permettant aux enseignants d'obtenir des outils de travail, en classe ou en vue d'une préparation de visite de SOLEIL, sur les thèmes du rayonnement synchrotron et ses applications, et fournit des liens avec les sites internet des autres synchrotrons de 3^e génération.

Références

- [1] Jormakka, M., Tornroth, S., Byrne, B. & Iwata, S. (2002) *Science* **295** (5561), 1863-68.
- [2] Ohldag J. *et al.* (2001) *Phys. Rev. Lett.* **87**, 247201.