

PCSI – PSI

Sortie « Soleil »

Préparation de la partie scientifique

D'après : http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/physique/d/synchrotron-soleil-accelereur-de-particules-du-futur_516/c3/221/p1/ et <http://fr.wikipedia.org>

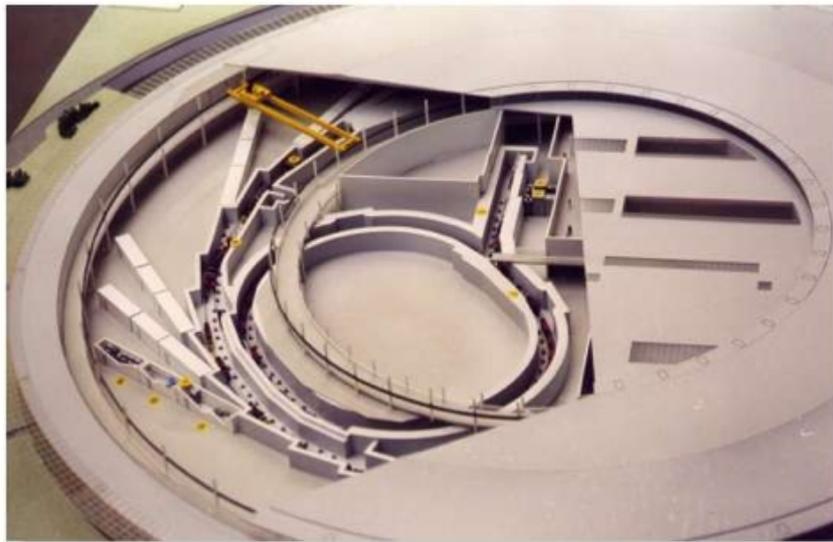
Qu'est-ce que Soleil ?

SOLEIL est une source de lumière extrêmement puissante qui permet d'explorer la matière, inerte ou vivante.

Plus concrètement, c'est un accélérateur de particules qui produit un rayonnement synchrotron. Ce rayonnement est fourni par un anneau de stockage de 354 m de circonférence dans lequel des électrons de très haute énergie circulent quasiment à la vitesse de la lumière.

Capté à différents endroits de l'anneau, le rayonnement est canalisé vers des sorties, les lignes de lumières. Chaque ligne est un véritable laboratoire, instrumenté pour préparer et analyser les échantillons à étudier, et traiter les informations recueillies.

Opérationnel à partir de 2006, SOLEIL ouvre de nouvelles perspectives pour sonder la matière avec une résolution de l'ordre du milliardième de mètres et une sensibilité à tous les types de matériaux. Ses applications sont multiples en physique, en chimie, en sciences de l'environnement, en médecine et en biologie.



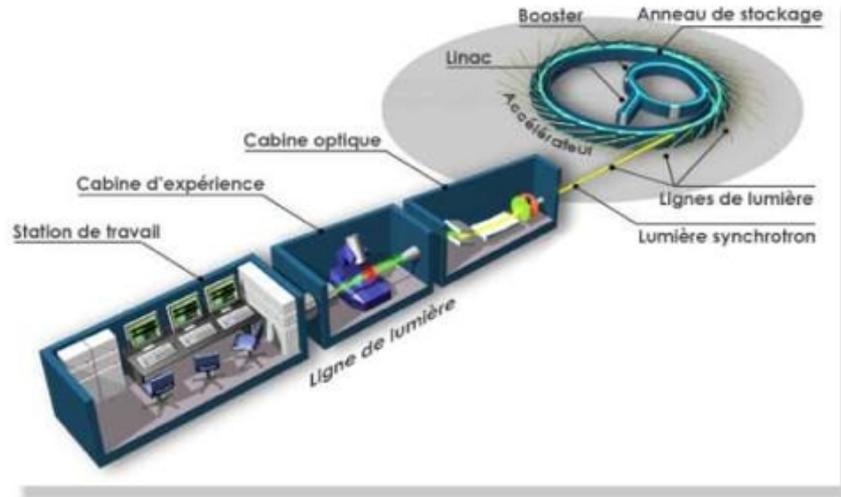
Quelle est la différence entre un accélérateur de particules et un synchrotron ?

Un accélérateur sert à accélérer des particules élémentaires - protons, ions, électrons, positons - pour les projeter contre des "cibles". Les collisions produites donnent naissance à d'autres constituants élémentaires. Un accélérateur sert donc essentiellement en recherche fondamentale. Le plus connu est celui du CERN à Genève.

Un synchrotron est un accélérateur d'électrons destiné à produire un rayonnement électromagnétique. Cette lumière est canalisée pour venir frapper la matière à explorer. Les applications concernent tous les domaines de la science.

SOLEIL : Source Optimisée de Lumière d'Énergie Intermédiaire du LURE

A noter qu'un accélérateur de particules génère également un rayonnement électromagnétique. Mais celui-ci est considéré comme « parasite » car il correspond à une déperdition d'énergie pour des particules que l'on cherche au contraire à accélérer !



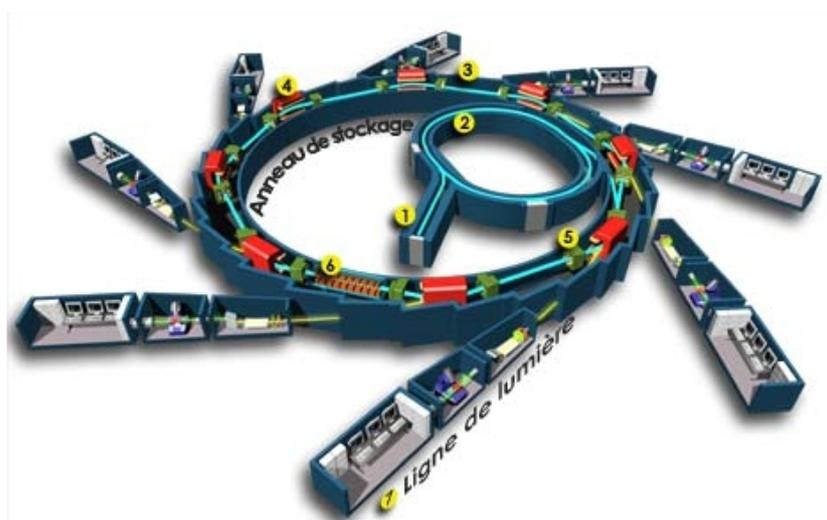
Comment fonctionne Soleil ?

Les équipements de base de SOLEIL sont l'accélérateur linéaire, le booster et l'anneau de stockage, dans lequel est produit le rayonnement synchrotron.

Un faisceau d'électrons fin comme un cheveu est d'abord accéléré dans un accélérateur linéaire (1), un Linac de 27 mètres où il atteint la vitesse de la lumière.

Après cette première accélération, le faisceau d'électrons est dirigé vers un deuxième injecteur appelé booster (2) qui porte leur énergie à la valeur de fonctionnement de SOLEIL soit 2,75 GeV.

Ayant atteint 2,75 GeV grâce aux deux accélérateurs, les électrons sont injectés dans l'anneau de stockage de 364 mètres de circonférence (3).



Fonctions de "Soleil"

Fonctions de "Soleil"

Le faisceau d'électrons tourne dans l'anneau de stockage, où sont installés différents dispositifs magnétiques : les aimants de courbure (4) dans les sections courbes, les quadrupôles et sextupôles (5), les wigglers et les onduleurs (6) dans les sections droites. A chaque passage dans les dispositifs magnétiques, les électrons sont accélérés et perdent de l'énergie sous forme d'une lumière particulière appelée « rayonnement synchrotron ».

L'énergie perdue par les électrons en émettant le rayonnement synchrotron est compensée par une ou plusieurs cavités radiofréquence RF (non représentées sur la figure).

Le rayonnement synchrotron, produit dans les aimants de courbures et les éléments

d'insertion (onduleurs et Wiggler), est dirigée par des systèmes optiques vers les stations expérimentales. Chaque ligne de lumière (7) constitue un véritable laboratoire de biologie, chimie, sciences de la Terre...

Qu'est-ce que le rayonnement synchrotron ?

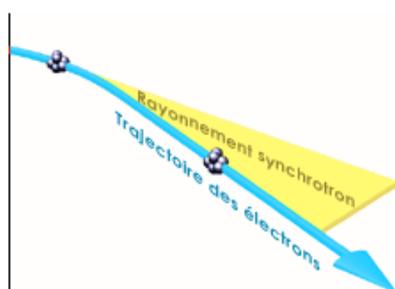
Le rayonnement synchrotron est un rayonnement lumineux émis par des électrons qui tournent dans un anneau de stockage.

Le rayonnement synchrotron de SOLEIL sera émis essentiellement de l'infrarouge (1 eV) aux rayons X durs (50 keV) pour une énergie des électrons dans l'anneau de 2,75 GeV. Cette lumière est si intense (10000 fois plus intense que la lumière solaire) qu'elle pénètre la matière dans ses plus intimes recoins : les photons émis viennent frapper une cible, un objet, une matière, une molécule et permettent ainsi de l'étudier.

L'émission de rayonnement dépend de la vitesse des électrons.

Si l'électron est non relativiste (sa vitesse est bien inférieure à celle de la lumière), l'émission de rayonnement est isotrope autour de la direction d'accélération. Nous pouvons comparer cette émission de lumière à celle d'un dipôle classique comme par exemple une antenne radio d'axe horizontale.

Si l'électron est relativiste (sa vitesse est proche de celle de la lumière, ce qui est le cas dans un synchrotron), l'émission de rayonnement se fait tangentiellement à la trajectoire et le faisceau est très collimaté. Cette émission nous apparaît comme celle d'un phare de voiture qui ne s'allumerait que dans les tournants.



Quels sont les domaines d'application de Soleil ?

L'utilisation du rayonnement synchrotron concerne un très large ensemble d'activités de recherche, que ce soit en recherche fondamentale pour les sciences de la matière et celles du vivant, ou en recherche appliquée.

En recherche fondamentale, SOLEIL couvrira des besoins en physique, chimie et en sciences des matériaux, en sciences du vivant (notamment en cristallographie des macromolécules biologiques), en sciences de la terre et de l'atmosphère. Il offrira l'utilisation d'une large gamme de méthodes spectroscopiques depuis l'infrarouge jusqu'aux rayons X, et de méthodes structurales en diffraction et diffusion X.

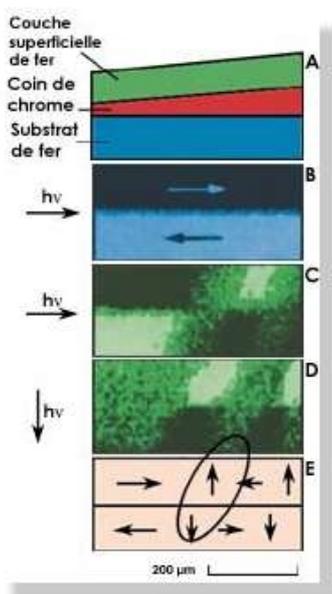
En recherche appliquée, SOLEIL sera utilisé dans des domaines très différents tel que la pharmacie, le médical, la chimie et la pétrochimie, l'environnement, le nucléaire, l'industrie automobile, mais aussi les nanotechnologies, la micromécanique et la microélectronique, etc.....

SOLEIL développera également une politique volontariste d'ouverture vers les applications pour l'industrie et les grands enjeux nationaux (environnement, énergie...), avec le souci de favoriser l'accès des PME/PMI aux techniques de rayonnement synchrotron.

* Sonde exceptionnelle pour la physique

des propriétés électroniques et magnétiques, SOLEIL fera progresser les recherches fondamentales et appliquées.

Il sera utile par exemple vers une nouvelle électronique et le stockage magnétique d'informations à ultra-haute densité.



- A : Concevoir les matériaux de demain

(BESSY, Ligne de microspectrométrie)

A : coupe d'un composé sandwich (fer/chrome/fer)

B : deux domaines magnétiques sont présents sur le substrat de fer, avec les directions d'aimantation représentées par les deux flèches.

C et D : visualisation du fer de la couche superficielle, selon deux directions perpendiculaires.

E : sens d'aimantation dans les domaines magnétiques.

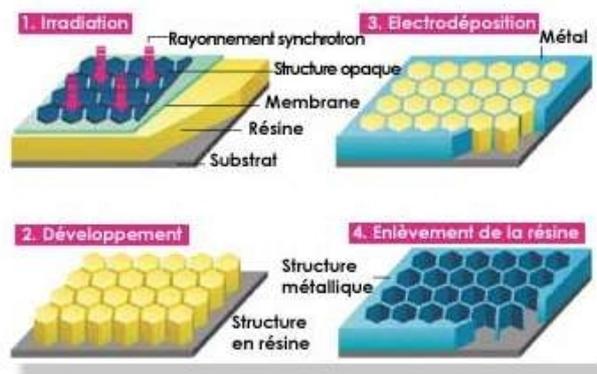
La partie entourée signale la combinaison magnétique qui permet de faire le lien entre deux directions opposées et de progresser vers la miniaturisation.

Pour concevoir des matériaux susceptibles de stocker de grandes quantités d'informations et ainsi, réaliser les composants magnétiques de demain, il est nécessaire de préciser la composition et le comportement de ces nouveaux matériaux à une échelle submicronique. En combinant les propriétés de focalisation spatiale et d'accordabilité en énergie du rayonnement synchrotron, on peut produire de manière très sélective une image de la surface d'échantillons très variés. De plus, si l'on utilise son état de polarisation, on a accès également à l'état magnétique local de l'échantillon : c'est la spectromicroscopie magnétique, technique nouvelle qui verra son plein essor à SOLEIL.

En étudiant la différence de réponse d'un système (ici un matériau) à une excitation en lumière polarisée circulairement (gauche puis droite), on peut par exemple établir la cartographie de l'orientation de l'aimantation de micro-domaines magnétiques. Ils résultent de la superposition de couches d'atomes (on dit "composé sandwich") aux propriétés magnétiques différentes.

- B : Fabriquer des micro-moteurs

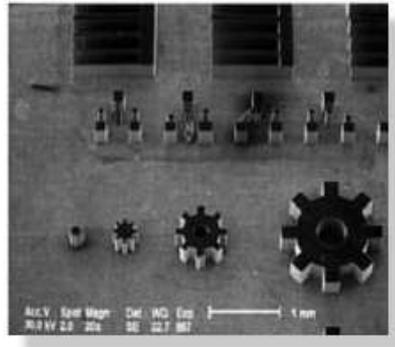
La fabrication des micro-pièces repose sur le principe du pochoir : un cache définit le contour de la pièce à fabriquer.



Procédé LIGA : Lithographie profonde et électrodéposition

Grâce aux rayons X, le rayonnement synchrotron réalise une sorte de "gravure" dans une résine : c'est la lithographie profonde, qui permet de fabriquer les moules de minuscules pièces avec une précision inégalée.

L'image ci-contre montre des exemples de micro-objets obtenus au LURE par le procédé LIGA ; la largeur des dents de la plus petite roue est d'environ 25 microns. Les micro-roues dentées peuvent être assemblées en micro-engrenages, qui sont intégrés dans des micromoteurs potentiellement utilisables en médecine par exemple.



Le moule de résine peut ensuite être reproduit dans des matériaux très divers : métaux, céramique, verre, polymères, utilisés par exemple en microchirurgie pour remplacer ou faire fonctionner certains organes défaillants.

* En médecine et en biologie

Il est utilisé pour la recherche de nouveaux médicaments, l'imagerie des vaisseaux sanguins, des tissus osseux ou des constituants de la cellule.

- A : Préciser les diagnostics pour adapter les traitements

Dans les synchrotrons de 3ème génération, la cohérence des faisceaux permet de visualiser la matière en 3D, même si elle n'absorbe que très peu la lumière. Cette technique d'imagerie (dite "par contraste de phase") est particulièrement adaptée pour visualiser des détails de la matière vivante, car à l'inverse des radiographies X habituelles, elle permet d'obtenir une image contrastée même si la matière absorbe peu le rayonnement.



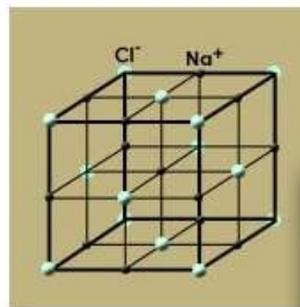
L'exemple ci-dessus montre l'évolution dégénérative de l'os iliaque d'une patiente atteinte d'ostéoporse. Les détails des structures ainsi obtenus permettent de mieux comprendre

la maladie et son évolution au cours du temps.

Chaque faisceau est une onde lumineuse qui ondule selon un certain rythme (sa phase). Lorsqu'un tel faisceau intercepte un échantillon, sa phase va être modifiée localement en fonction de la quantité de matière (l'indice) rencontrée. En plaçant un détecteur suffisamment loin de la cible, on peut mesurer des figures d'interférences induites par les différences de phase, qui permettent de reconstituer en trois dimensions la structure du milieu traversé.

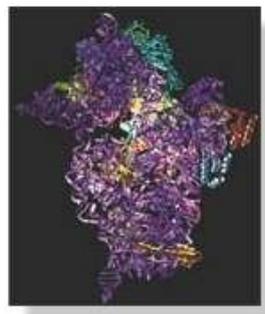
- B : Apprivoiser les protéines, ces microscopiques briques de la vie

Structure cristalline « simple » du chlorure de sodium. Cette structure a été déterminée vers 1920, avec un tube à rayons X.



Une application importante des rayons X, mise en œuvre dès le début du 20ème siècle, est l'étude des structures cristallines. Pour les structures simples (le chlorure de sodium par exemple), des tubes à rayons X suffisent. Mais pour les structures complexes comme les protéines, il est nécessaire d'utiliser des rayons X de très haute énergie (de très faible longueur d'onde), que des synchrotrons comme SOLEIL savent produire.

Structure d'une sous-unité du ribosome, assemblage complexe de protéines et d'acides nucléiques. L'organisation de cette extraordinaire micro-machine, constituée de dizaines de milliers d'atomes, n'aurait pu être élucidée sans le rayonnement synchrotron. ESRF— Ligne de cristallographie)



Certaines lignes de lumière de SOLEIL seront spécialisées dans la « cristallographie des protéines ». Les clichés de diffraction de rayons X sur des cristaux de protéine permettront de connaître leur structure atomique et leur fonction, pour mieux comprendre comment

agissent certains antibiotiques, et ainsi, d'en concevoir de plus efficaces. C'est un des enjeux de la biologie contemporaine.

Vue du synchrotron soleil

Les expériences de biologie représentent 20 % du total de l'activité du synchrotron de LURE. L'une des évolutions marquantes prévues pour SOLEIL dans ce domaine porte sur la réduction considérable de la durée des manipulations, avec un temps d'acquisition des données de cristallographie passant d'une vingtaine de minutes à quelques secondes, ce qui augmentera considérablement le nombre de projets accueillis.

Les protéines sont des macromolécules codées par les gènes de l'ADN. Elles assurent le fonctionnement de nos cellules.

La fonction des protéines dépend de leur structure spatiale, c'est-à-dire de l'arrangement de leurs atomes constitutifs dans l'espace. On le détermine par la méthode de la cristallographie, en utilisant un petit cristal de la protéine étudiée. Le diagramme de diffraction obtenu en éclairant ce cristal avec des rayons X permet, après une analyse mathématique complexe, de remonter à la structure tridimensionnelle de la protéine. Le rayonnement synchrotron est si intense qu'il permet d'enregistrer les données de diffraction très rapidement et avec des cristaux très petits, jusqu'à quelques microns. La possibilité de changer à volonté la longueur d'ondes de ce rayonnement est aussi mise à profit pour la "résolution" de la structure.

On connaît maintenant les génomes de nombreux organismes, des bactéries pathogènes à l'homme. L'étape suivante est la détermination de la structure d'un très grand nombre des protéines codées par ces génomes. La cristallographie est la méthode essentielle pour effectuer ces analyses systématiques. L'utilisation du rayonnement synchrotron va donc s'intensifier, avec des lignes de lumière robotisées. Les retombées attendues sont considérables, au plan fondamental comme au plan des applications médicales et biotechnologiques.

* La chimie et sciences de l'environnement

La chimie profite également de cette technologie de haut niveau de détection de substances polluantes dans l'environnement, optimisation du fonctionnement des pots catalytiques, élaboration de nouveaux matériaux.

- A : Préserver l'environnement

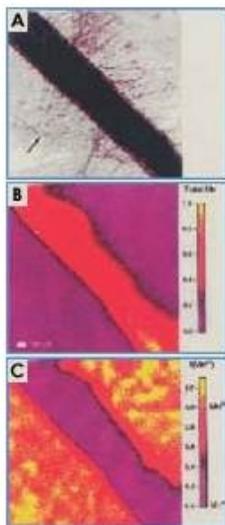
<Comme le révèle un examen microscopique, la présence d'un champignon bloque le transfert de manganèse (Mn^{2+}) indispensable à la croissance de la plante. L'image A représente la racine d'un épi de blé et ses radicelles.

A partir des agrandissements B et C d'une des radicelles, il est possible de visualiser les zones où le manganèse est plus ou moins oxydé (forme Mn^{2+} ou Mn^{4+}), seule la forme la moins oxydée, Mn^{2+} , étant assimilable par la plante.

En effet, l'image B montre une concentration globale du manganèse (en rouge) importante

dans la radicelle.

L'image C, prenant en compte le degré d'oxydation du manganèse, montre que Mn^{2+} (en rouge) reste localisé en périphérie, Mn^{4+} (en pourpre) étant présent dans toute la radicelle ; le champignon transforme le manganèse en Mn^{4+} et empêche alors Mn^{2+} de pénétrer dans la plante.



Un des atouts du rayonnement synchrotron est son accordabilité en énergie, c'est-à-dire que son énergie peut être facilement et précisément sélectionnée. En examinant comment, à quel endroit et dans quelle proportion un échantillon absorbe la lumière, on peut déterminer sa composition chimique et la forme chimique des différents éléments mis en évidence. Cette technique est très performante, en particulier en sciences de l'environnement où la toxicité de nombreux composés dépend non seulement de leur nature, de leur quantité mais aussi de leur état chimique.

* La géophysique

Elle bénéficie aussi des performances de cet outil pour la connaissance de la structure des matériaux du manteau terrestre.

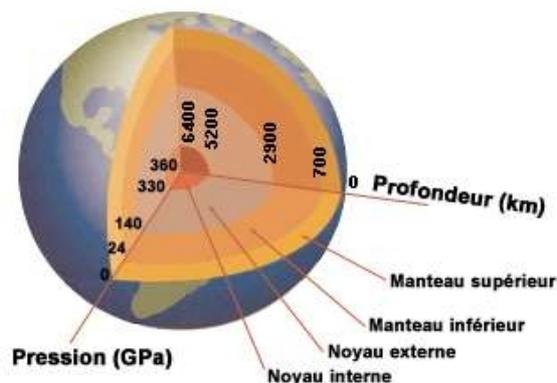
- A : Le rayonnement X de SOLEIL

très focalisé, est un outil idéal pour déterminer la structure cristallographique des matériaux situés à l'intérieur de la Terre, où règnent des températures et des pressions très élevées. Dans le manteau inférieur, par exemple, la pression est de 50 GPa et la température de 3000 °C.

La structure des matériaux se modifie avec la température et la pression.

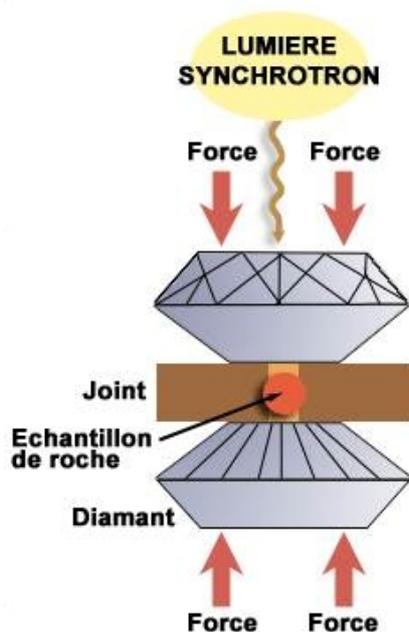
A l'intérieur de la Terre, la température et la pression augmentent très rapidement avec la profondeur (en moyenne 3 degrés et 3,5 kPa* par m² tous les 100 mètres), modifiant ainsi la structure des matériaux qui la composent. L'étude de la dynamique du manteau

terrestre nécessite une bonne connaissance de ces structures.



La focalisation de SOLEIL pour étudier les profondeurs de la Terre.

Reproduire, en laboratoire, les conditions extrêmes qui règnent à l'intérieur de la Terre n'est possible qu'en utilisant un chauffage laser et des « enclumes » en diamant dont la pointe est de très petite taille.

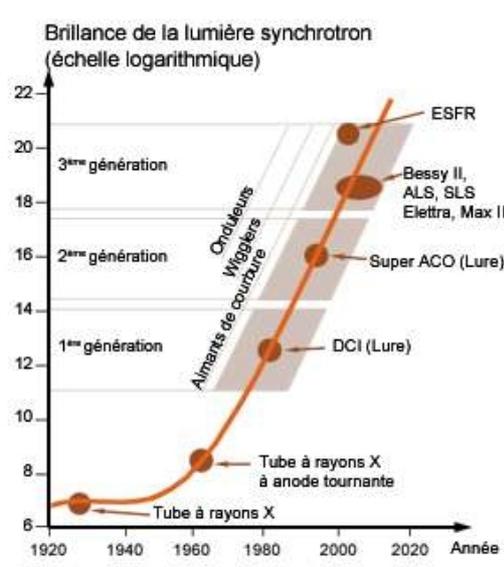


Le rayonnement X de SOLEIL, focalisé lui aussi sur quelques dizaines de microns, permet d'étudier la zone de l'échantillon où ces conditions de pression et température sont homogènes et d'identifier via des techniques de diffraction X et de spectroscopie d'absorption, des changements de phase à l'intérieur de la Terre : phases solides et liquides.

Evolution des synchrotrons

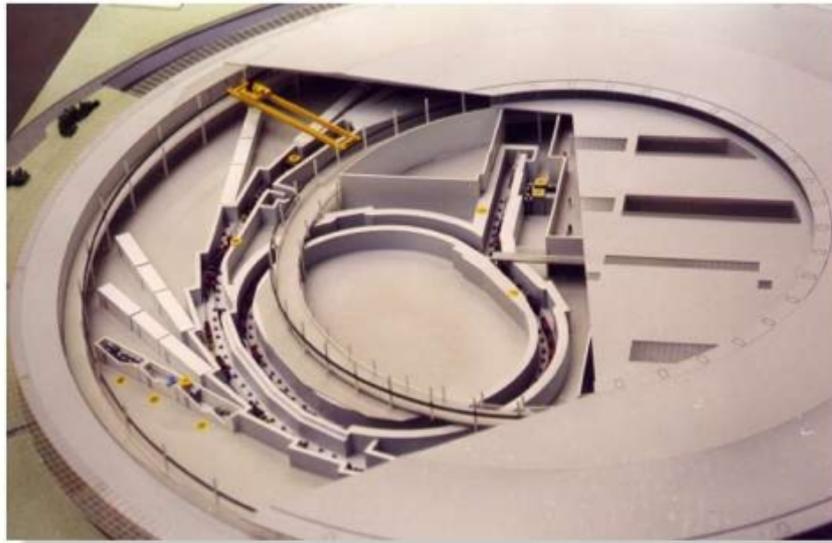
Trois générations de synchrotrons sont classiquement distinguées.

La première génération date des années 1960 et 1970 et correspond aux installations dérivées de la physique des particules, comme le DCI d'Orsay.



La deuxième génération correspond aux installations conçues et construites dans les années 1980 spécifiquement pour la production de rayonnement synchrotron, comme le Super ACO d'Orsay.

Les synchrotrons de troisième génération datent des années 1990 et se caractérisent par la production de rayonnement non seulement dans les aimants de courbure mais aussi dans les onduleurs et les "wigglers" insérés dans les sections droites de l'anneau de stockage.



SOLEIL, comme l'ESRF à Grenoble, est une machine de troisième génération, optimisée pour l'émission synchrotron tant dans les aimants de courbure que dans les parties droites avec les wigglers et les onduleurs. D'autres machines de troisième génération existent dans le monde. Citons par exemple SLS en Suisse, Elettra en Italie, Spring 8 au Japon et bientôt, DIAMOND en Angleterre.

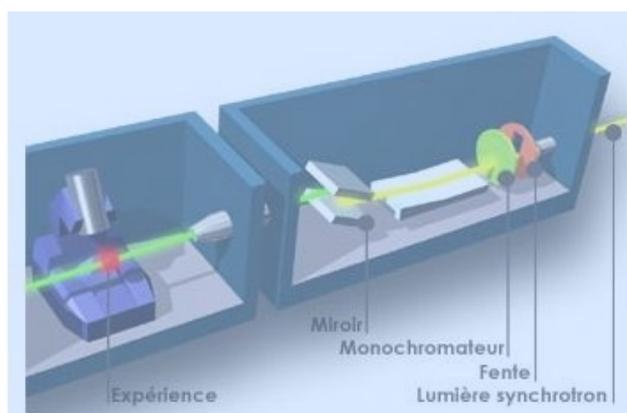
Les installations expérimentales

Le rayonnement synchrotron est une lumière blanche qui comprend toutes les longueurs d'onde depuis l'infrarouge jusqu'aux rayons X en passant par le visible et l'ultraviolet. Prélevée dans les aimants de courbure et au bout de chacun des onduleurs, cette lumière blanche se propage dans des lignes de lumière d'une vingtaine de mètres de long.

Une ligne de lumière comprend :

- la cabine optique, dans laquelle des systèmes (fente, monochromateur, miroir) "préparent" le faisceau, c'est-à-dire sélectionnent une longueur d'onde puis la concentrent sur l'échantillon,
- la cabine expérimentale dans laquelle le faisceau de rayonnement "préparé" frappe l'échantillon,
- la station de travail qui traite les informations recueillies.

Chaque ligne de lumière est un véritable laboratoire avec une spécificité bien définie : biologie, micro-fabrication, sciences de la Terre, etc. SOLEIL en exploitera 24 simultanément, six jours par semaine, 24 heures sur 24 : une véritable « usine » scientifique, accueillant plus de 2000 utilisateurs par an .



Des perspectives scientifiques à long terme

L'installation est conçue pour pouvoir exploiter jusqu'à 40 lignes de lumière ; toutefois, le programme ne prévoit actuellement que la construction de 24 d'entre elles, en deux phases :

2002-2005 : 4 ans de construction des bâtiments et infrastructures, du complexe d'accélérateurs (Linac, booster, anneau de stockage) et des 12 premières lignes et expériences (effectif permanent nécessaire 260 personnes).

2006-2009 : 4 ans correspondant au début d'exploitation du laboratoire et à l'installation et la mise en service progressive de 12 autres lignes et expériences (total : 350 personnes).

Le faisceau de rayonnement est "préparé" dans la cabine optique, avant de frapper l'échantillon

La possibilité d'une montée en puissance jusqu'à 40 lignes impose de prévoir, dès la conception, la présence de 520 personnes permanentes sur le site et les extensions nécessaires. A noter que l'évolution technique des synchrotrons est loin d'être achevée. Des progrès considérables sont attendus non seulement sur les onduleurs, mais aussi sur l'équipement des lignes de lumière : l'optique et l'instrumentation, notamment les détecteurs.

Le cyclotron

Fonctionnement

Un électro-aimant de cyclotron au Laurence Hall of Science. Les parties noires sont en acier et se prolongent sous terre. Les bobines de l'aimant sont situées dans les cylindres blancs. La chambre à vide se situerait dans l'espace horizontal entre les pôles de l'aimant.

Dans un cyclotron le champ magnétique est appliqué perpendiculairement dans une chambre vide en forme de disque, laquelle contient deux électrodes semi-circulaires en forme de D. Les portions rectilignes de ces électrodes se font face. Le flux d'électrons ou d'ions traversant un champ magnétique perpendiculaire est soumis à une force perpendiculaire à la direction du mouvement (la force de Lorentz qui fait en quelque sorte office de force centripète ici) (ce principe est utilisé pour le fonctionnement des moteurs électriques). Ici, dans le vide, ces particules chargées suivent un parcours circulaire. Si les particules perdent de l'énergie elles suivront une spirale intérieure. Si l'appareil est capable d'augmenter leur énergie elles suivront une spirale en expansion. C'est ce principe qui est utilisé dans un cyclotron. Une tension alternative de haute fréquence est appliquée aux électrodes en D, ce qui accélère les particules à chacun de leurs passages de l'une à l'autre.



Un électro-aimant de cyclotron au Laurence Hall of Science. Les parties noires sont en acier et se prolongent sous terre. Les bobines de l'aimant sont situées dans les cylindres blancs. La chambre à vide se situerait dans l'espace horizontal entre les pôles de l'aimant.

Fréquence du cyclotron

La force centripète est fournie par le champ magnétique transversal B , et la force qui s'applique à une particule traversant un champ magnétique (ce qui provoque la trajectoire circulaire) est égale à Bqv . En exprimant l'égalité avec la force centrifuge, on obtient:

$m v^2/r = B q v$ d'après Newton qui dit que la somme des forces appliquées est égale à ma et donc, la force de Lorentz ($B q v$) est égale à ma (dans un mouvement circulaire uniforme, l'accélération $a = v^2/r$)

(Où m est la masse de la particule, q sa charge, v sa vitesse et r le rayon de sa trajectoire.)

En conséquence,

$$v/r = B q/m$$

v/r est égal à la vitesse angulaire, ω , ce qui donne

$$\omega = B q/m$$

On a également la fréquence f ,

$$f = \omega / (2 \pi)$$

Donc,

$$f = B q / (2 \pi m)$$

Cela montre que pour une particule de masse constante, la fréquence ne dépend pas du rayon de l'orbite de cette particule. Tandis que le rayon s'accroît, la fréquence ne diminue pas, mais la particule accélère, ce qui lui fait parcourir une distance supplémentaire à chaque tour, pendant la même période. Cependant, quand elle approche la vitesse de la lumière, un effet relativiste lui fait gagner une masse supplémentaire, ce qui demande un ajustement de la fréquence du champ électrique, opération qui est réalisée dans un synchrocyclotron. La courbe de la fonction exprimant la vitesse du cyclotron par rapport à son rayon est appelée courbe de Thomas, du nom du célèbre professeur de physique officiant dans les années 30.

Utilité

Un cyclotron est un accélérateur de particules d'environ 6 m³, pouvant permettre la production de quatre radioéléments : l'oxygène 15 (¹⁵O), le carbone 11 (¹¹C), l'azote 13 (¹³N), et le fluor 18 (¹⁸F).

Le fluor 18 (isotope à demi-vie courte : 109 minutes) permet de fabriquer du fluorodésoxyglucose (FDG), un sucre radioactif inutilisable par la cellule, qui va s'accumuler préférentiellement dans les zones cancéreuses, fortes consommatrices de glucose. Une Tomographie à émission de positons (TEP) permettra de détecter de façon particulièrement fine certains cancers puis de les traiter à des stades très précoces.

Les synchrotrons

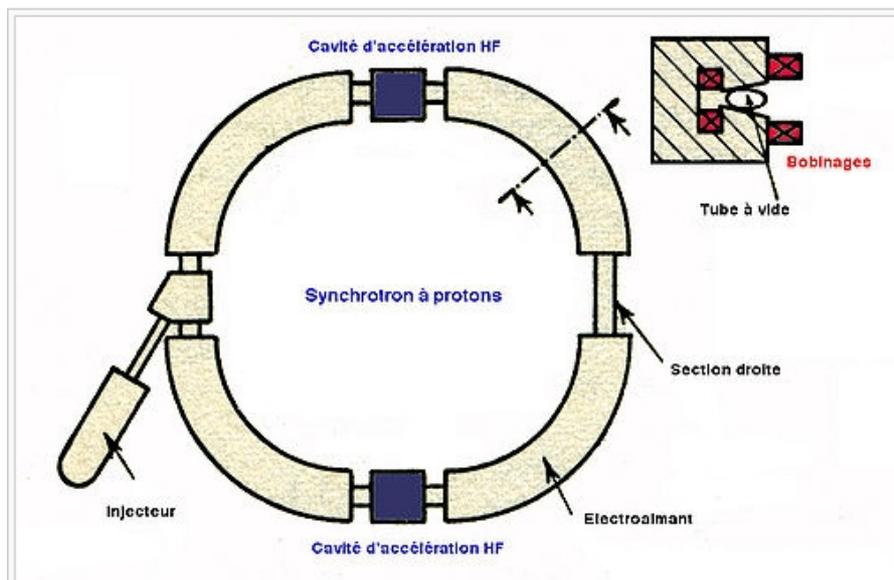
Perspective historique

Le principe du synchrotron a été pressenti pendant la guerre, en 1943, par le Pr Oliphant à Birmingham. Les premiers projets américains (Brookhaven et Berkeley, 1947), suivirent de près l'invention du synchrocyclotron. Pour dépasser les limites des cyclotrons, liées aux particules relativistes, il a été imaginé de faire varier la fréquence de la tension accélératrice de façon qu'elle reste synchronisée avec le moment de passages des particules. L'accélération doit être pulsée et la phase de la tension accélératrice doit être réglée pour que les particules restent groupées (il faut éviter l'extension des paquets de particules le long de leur trajectoire).

Le synchrotron est un instrument pulsé permettant l'accélération à haute énergie de particules stables chargées. Comme le cyclotron il contraint les particules à tourner en rond entre les pôles d'électro-aimants disposés en anneau. Les particules sont accélérées à chaque tour. Pour les maintenir confinées dans le cercle, on ajuste le champ magnétique à l'énergie atteinte par les particules. Les particules sont injectées en bouffées dans l'anneau à bas champ magnétique, accélérées à mesure que croît le champ, puis éjectées quand ce dernier a atteint son maximum. On recommence alors avec une nouvelle bouffée. La stabilité de phase permet aux particules les plus lentes de recevoir une tension accélératrice plus haute que celle appliquée aux particules les plus rapides. Ainsi les particules de la bouffée restent groupées.

Après la seconde guerre mondiale des synchrotrons successifs ont dépassé l'énergie symbolique de 1 GeV vers 1950, 30 GeV en 1960, 500 GeV en 1972, 1 TeV dans les années 1980. Le synchrotron à protons de 6 GeV a produit les premiers antiprotons à Berkeley en 1956. Entre 1955 et 1970 (Berkeley, Brookhaven, CERN) des synchrotrons à protons ont permis la découverte de résonances, du neutrino muonique, de la violation de CP.

Les grands synchrotrons à protons ont proposé des faisceaux de toutes sortes de particules, même instables ou neutres. Pions, kaons, antiprotons, muons, neutrinos ont été créés et ont permis d'explorer le proton et d'identifier les quarks. Les machines du Fermilab (500 GeV) et du CERN (SPS, 450 GeV) ont projeté des particules sur d'autres particules au repos (cible fixe) puis ont été transformées en collisionneurs (proton-antiproton) pour monter en énergie.



Principe de fonctionnement d'un synchrotron à protons

Synchrotron à protons à gradient constant

* Lorsqu'on impose au rayon de l'orbite d'accélération d'être constant, les deux variables champ magnétique et fréquence HF ne sont plus indépendantes. On doit ajuster la fréquence HF sur la montée du champ magnétique. L'avantage d'un rayon constant de l'orbite d'équilibre est qu'il suffit que le champ magnétique de guidage soit présent sur une couronne centrée sur cette orbite, et non plus sur toute la surface du cercle (comme dans le cyclotron).

* La pièce maîtresse du synchrotron est un aimant annulaire composé d'un certain nombre de secteurs magnétiques raccordés par des sections droites. L'alimentation pulsée de l'électro-aimant nécessite une grande puissance. A cause de l'aimantation rémanente du matériau magnétique, il n'est pas possible de démarrer l'accélération à une énergie nulle ce qui implique un système d'injection (accélérateur électrostatique ou linéaire).

* Le système HF d'accélération utilise des cavités résonnantes excitées par un amplificateur HF de puissance.

Focalisation par gradients alternés

Une contrainte technique limite l'énergie maximale des particules accélérées. Elle est liée au mouvement latéral des particules. Sous l'action des forces électro-magnétiques les particules ont tendance à osciller autour de la trajectoire théorique, la trajectoire centrale. Dans un premier temps les constructeurs ont construit de plus gros électro-aimants, avec des chambres à vide de grandes dimensions. Ces synchrotrons à focalisation faible n'ont donné que des faisceaux peu intenses (Doubna, URSS, 10 GeV).

À Brookhaven en 1952 une nouvelle méthode de guidage a permis de faire progresser la technique du synchrotron (et des accélérateurs linéaires). Pour diminuer la taille et le poids des éléments magnétiques il faut focaliser le faisceau grâce à l'alternance de secteurs magnétiques à indice fortement positif et à indice fortement négatif. Les pièces

polaires des aimants ont été dessinées pour que les champs magnétiques complexes produisent un effet focalisant sur les particules qui y circulent. Au lieu d'être parallèles, les extrémités des pièces polaires des aimants sont inclinées, les inclinaisons de deux aimants successifs étant opposées (on parle de gradients alternés). Il y a stabilité verticale et stabilité radiale du mouvement lorsque le synchrotron est constitué par une succession d'aimants à indices de champ alternés. La focalisation forte permet de réduire la taille des aimants, celle des tubes à vide, la consommation électrique. 2 appareils ont été construits sur les prédictions théoriques : au CERN en 1959 (Diamètre 200 m, circonférence 600 m, énergie du faisceau 25 GeV) et au Brookhaven National Laboratory, Long Island (NY) en 1960 (Diamètre 200 m, circonférence 600 m, énergie du faisceau 30 GeV)

En résumé un synchrotron

Se compose principalement des éléments suivants:

- * un petit accélérateur, l'injecteur, qui prépare les particules à faible énergie;
- * un anneau magnétique, maintenant les particules sur une trajectoire grossièrement circulaire (elle peut être interrompue par des sections rectilignes)
- * des cavités accélératrices destinées à augmenter - ou maintenir - l'énergie des particules tournant tout autour de l'anneau.
- * tout un ensemble d'appareillages annexes : alimentation électrique des aimants de courbure et des cavités, systèmes à ultravide, sondes de contrôle de position et de forme du faisceau, systèmes d'injection et d'éjection, systèmes de refroidissement, etc.

Les particules sont maintenues dans un vide extrêmement poussé, tout autour de l'anneau, à l'intérieur d'un tube de forme torique.

La caractéristique du synchrotron est que l'intensité du champ magnétique de l'anneau est maintenue adaptée de façon synchrone à l'énergie du faisceau de particules, afin de les maintenir sur une trajectoire fixe. Il peut en outre y avoir un second anneau, avec des particules tournant en sens inverse, afin de réaliser des collisions entre particules avec une énergie utilisable très élevée. Ce sont des collisionneurs.

On distingue principalement, par leurs contraintes de construction, deux types de synchrotrons ou de collisionneurs :

- * les synchrotrons à protons (ou à antiprotons) destinés à l'étude de l'interaction forte;
- * les synchrotrons à électrons ou à positons. Les collisionneurs comme LEP servent à l'étude de l'interaction électrofaible.

La suite concernera les synchrotrons à électrons, considérés comme sources de lumière synchrotron.

Fonctionnement d'un synchrotron générateur de lumière synchrotron

Schéma de principe du synchrotron

En raison de la faible masse des électrons, l'accélération occasionnée par la courbure de leur trajectoire génère une onde électromagnétique, le rayonnement synchrotron. Ce rayonnement est collecté à différents endroits du tore, les lignes de lumière. Chaque faisceau lumineux rencontre ensuite des lentilles, miroirs ou monochromateurs afin de sélectionner la gamme de longueurs d'ondes et de modifier les caractéristiques du faisceau (taille, divergence) qui sera utilisé dans l'expérience. « Au bout » de chaque ligne de lumière est monté un échantillon de matière servant de cible. Les photons (ou les

électrons) éjectés lors de l'interaction du faisceau incident avec la cible sont détectés par des appareils de mesure ponctuels, linéaires ou bidimensionnels (caméra CCD, image plate). Suivant la taille de l'anneau, jusqu'à des dizaines d'expériences peuvent être menées simultanément.

Le circuit que traversent les électrons est constitué d'un tube de quelques mm² dans lequel règne un vide poussé (10⁻¹⁰ torr, soit 10⁻¹³ atm). Ce vide est nécessaire pour éviter que les électrons ne heurtent des molécules d'air et ne soient ralentis.

Un paquet d'électrons, formant un faisceau fin comme un cheveu, est d'abord accéléré dans un accélérateur linéaire (Linac) jusqu'à une vitesse très proche de celle de la lumière. Puis le faisceau d'électrons passe dans un accélérateur circulaire appelé anneau d'accélération : le but de cet anneau est d'augmenter l'énergie des électrons jusqu'à atteindre environ 2 GeV (à des vitesses proches de celle de la lumière, une accélération change très peu la vitesse, mais influe sur l'énergie de la particule). Cette valeur de l'énergie de fonctionnement n'est qu'approximative, et dépend du synchrotron. Une fois que les électrons ont atteint l'énergie voulue, ils sont injectés dans l'anneau de stockage (beaucoup plus grand que l'anneau d'accélération, il atteint plusieurs centaines de mètres de circonférence), où ils vont faire des centaines de milliers de tours chaque seconde.

En une journée, les paquets d'électrons ont fait des milliards de tours dans l'anneau de stockage. A chaque tour, les électrons perdent un peu leur énergie, d'abord simplement par le rayonnement qu'ils émettent, et aussi, malgré le vide très poussé qui règne dans le tube, par les collisions qui se produisent entre les électrons et les molécules résiduelles d'air. Pour compenser ce phénomène, des cavités accélératrices sont mises en route, environ trois fois par jour, pour ré accélérer les électrons et leur rendre leur énergie nominale.

Aimants de courbure

L'anneau de stockage n'est pas parfaitement circulaire. Il est constitué d'une trentaine de segments rectilignes. A la jonction entre deux segments, on trouve un aimant de courbure. C'est un gros électro-aimant générant un champ magnétique entre 1 et 2 Tesla (et donc relié à un circuit de refroidissement efficace) orienté perpendiculairement à la trajectoire des électrons. Ce champ dévie les électrons et les aligne dans l'axe du segment suivant. Ainsi, la trajectoire des électrons est un polygone de forme quasiment circulaire.

Au niveau de ces aimants de courbure, les électrons subissent une accélération. D'après la théorie électromagnétique, cela se traduit par un rayonnement, dit rayonnement de freinage : c'est le rayonnement synchrotron ou bremsstrahlung. Ce rayonnement polychromatique de photons (dont le spectre est relativement large, et peut s'étendre de l'infrarouge lointain aux rayons X durs) est émis tangentiellement à la trajectoire des électrons. A cause d'effets relativistes, l'ouverture angulaire du faisceau est extrêmement faible (de l'ordre du milliradian). Le faisceau de photons, qui se sépare du faisceau d'électrons, est envoyé dans les lignes de lumière. Comme les électrons sont groupés en paquets dans l'anneau de stockage, le rayonnement synchrotron est émis sous forme d'impulsions de très courte durée.

Éléments d'insertion

Pour obtenir des faisceaux de photons encore plus intenses, les synchrotrons de troisième génération contiennent ce que l'on appelle « éléments d'insertion ». Ce sont des aimants situés au milieu de chaque segment, en plus des aimants de courbure habituels.

Il en existe deux types : les wigglers (tortilleurs), et les onduleurs. Les deux consistent en des aimants fournissant un champ magnétique alternatif. Au niveau de ces éléments,

les électrons subissent de nombreuses accélérations successives, ce qui crée un rayonnement synchrotron bien plus intense que celui créé par un simple aimant de courbure. On place évidemment une ligne de lumière au niveau de chaque élément d'insertion.

La différence entre un wiggler et un onduleur réside simplement dans la période d'oscillation du champ alternatif (cette période n'est pas anodine, et a des conséquences en termes d'interférences et de largeur de spectre du faisceau synchrotron émis).

Utilisations

La lumière synchrotron possède des caractéristiques exceptionnelles par comparaison aux sources de lumière classiques disponibles en laboratoire : son spectre d'émission s'étend de l'infrarouge aux rayons X avec une brillance (petite taille, intensité) exceptionnelle, le rayonnement est stable, pulsé, et avec une forte cohérence spatiale et temporelle. Il peut ainsi être comparé à un laser accordable sur une grande gamme de fréquences spectrales, depuis l'infrarouge lointain jusqu'aux rayons X durs pour les synchrotrons de 3e génération.

Il permet, par ses propriétés, l'accès à de nombreuses expériences, mises en œuvre sur des «lignes de lumière», véritables laboratoires fonctionnant en parallèle à partir d'un même anneau de stockage :

- * dans les rayons X :
 - o fluorescence, pour la détermination de la composition élémentaire
 - o absorption, par exemple pour l'étude de cinétiques chimiques
 - o diffraction, par exemple pour la cristallographie de protéines
 - o microtomographie
 - o spectroscopie de photo-émission...
- * dans l'ultraviolet et le VUV :
 - o spectroscopie
 - o dichroïsme circulaire
- * dans l'infrarouge :
 - o micro-spectrométrie à transformée de Fourier

Ces expériences concernent des domaines très variés, allant de la chimie et la physique fondamentales, à l'analyse de matériaux archéologiques (voir par exemple L'interface patrimoine et archéologie de SOLEIL) ou d'organismes microscopiques. Elles peuvent également être employées à des fins industrielles.

Utilisation du rayonnement synchrotron après monochromatisation

Le rayonnement synchrotron émis est polychromatique. Son utilisation principale est néanmoins comme source monochromatique, en plaçant, entre le dispositif expérimental et la source de lumière synchrotron, un monochromateur (cristal diffracteur, réseau). Les conditions de diffractions données par la loi de Bragg nous dit en effet que selon l'angle d'incidence du faisceau sur un cristal, on obtient un faisceau d'une longueur d'onde désirée. La longueur d'onde obtenue peut être variée très précisément, notamment pour mesurer l'évolution de l'absorption d'un échantillon au voisinage d'un seuil donné et en déduire des informations chimiques sur l'élément étudié dans le matériau.

Utilisation directe de la source polychromatique

La polychromaticité est également employée directement pour faire des expériences de diffraction de Laue en faisceau blanc, de l'absorption de rayons X rapide à l'aide d'un cristal courbe, de la spectromicroscopie infrarouge à transformée de Fourier à l'aide d'un interféromètre de Michelson.