

Le rayonnement synchrotron : principes de fonctionnement et utilisation

Culture Sciences
de l'Ingénieur

Louis HÉBRARD - avec la relecture d'Élodie BOLLER

Édité le
01/06/2020

école
normale
supérieure
paris-saclay

Cette ressource est issue du travail personnel de Louis Hébrard, étudiant en master 2 Mécanique des Matériaux pour l'Ingénierie et l'Intégrité des Structures au département Génie Mécanique de l'ENS Paris-Saclay. Élodie BOLLER est ingénieure spécialisée dans la microtomographie au sein du synchrotron européen (ESRF) où son travail se porte sur les projets industriels notamment à travers la caractérisation de matériaux.

La physique des accélérateurs de particules est très utilisée dans la recherche actuelle. Notamment, de tels accélérateurs nommés synchrotrons permettent l'utilisation de particules comme les électrons ou les positrons afin de générer un rayonnement synchrotron qui peut ensuite être utilisé pour étudier la matière à des échelles inédites. (À noter qu'un autre type de synchrotron se distinguant par ses contraintes de construction permet d'étudier l'interaction forte en accélérant des protons ou des antiprotons).

Par conséquent, ce type d'instrument est développé dans de nombreux pays du monde afin de servir différents domaines de la recherche comme l'étude des matériaux, la médecine, la biologie ou encore l'archéologie. Ainsi, la technologie synchrotron est aujourd'hui très accessible à travers notamment des projets cofinancés par plusieurs pays (par exemple le Synchrotron Européen en Figure 1) ; cela ouvre la porte de cette technologie de pointe à de nombreux chercheurs spécialistes dans des disciplines variées à travers le monde (études des protéines permettant la photosynthèse, développement de médicaments, mise au point de nouveaux matériaux, etc.).



Figure 1 : European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), le Synchrotron Européen de Grenoble [1]

Cette ressource présente, après un historique du développement de cette technologie, le fonctionnement d'un synchrotron actuel. Les complexes générateurs de rayonnements synchrotrons existants à travers le monde vont ensuite être présentés ainsi que des exemples d'applications.

1 – Origine de la technologie synchrotron et phénomènes physiques

Il existe différents types d'accélérateurs de particules qui se différencient par leur technique d'accélération mais aussi leur puissance ou même leur génération.

1.1 - Le cyclotron

Le principe de fonctionnement des cyclotrons a été développé à l'Université de Californie à Berkeley durant les années 1930. De tels équipements peuvent accélérer des particules chargées, des ions lourds, mais pas d'électrons. Les cyclotrons classiques peuvent monter les particules jusqu'à des énergies allant de quelques millions d'électronvolts à 70 MeV mais ils ne peuvent accélérer les particules qu'à des vitesses très inférieures à celle de la lumière. Cependant, les modèles actuels, à la pointe de la technologie, peuvent monter jusqu'à des énergies de quelques centaines de MeV comme par exemple le cyclotron TRIUMF à Vancouver, Canada (le plus grand du monde) ou RIKEN au Japon.

Un tel mécanisme est constitué de demi-cercles successifs dont le rayon augmente progressivement (représentés en Figure 2) et qui sont placés dans un champ magnétique constant. Les particules vont parcourir ce circuit en spirale placé sous vide.

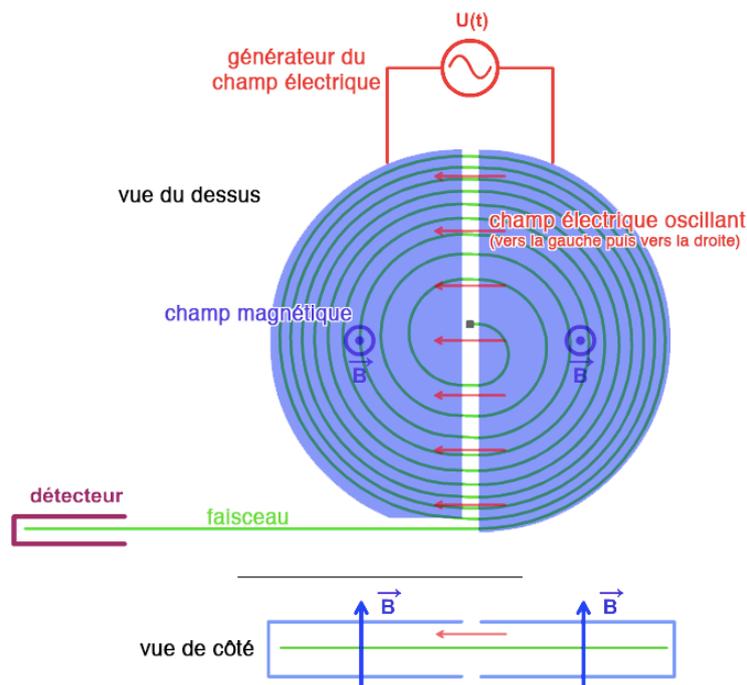


Figure 2 : Schéma explicatif du fonctionnement d'un cyclotron [2]

La force de Lorentz ($F_{Lorentz}$) est l'action subie par une particule de charge q qui serait plongée avec une vitesse \vec{v} dans un champ électromagnétique. Le champ électromagnétique en question est constitué d'un champ magnétique \vec{B} et d'un champ électrique \vec{E} et vérifie par définition :

$$\vec{F}_{Lorentz} = q \cdot \vec{E} + q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$$

Dans un cyclotron, un champ magnétique uniforme est imposé et les particules sont injectées au centre du dispositif. Elles vont ainsi subir une force de Lorentz due à ce champ magnétique : $\vec{F}_{Lorentz} = q \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$. Cette force leur confère un mouvement rotatif centripète (dirigé vers le centre du cercle).

Du fait de leur mouvement circulaire de rayon r , les particules subissent aussi une force centrifuge $F_c = m \cdot v^2 / r$.

Le principe fondamental de la dynamique appliqué à une particule nous donne donc une égalité entre les paramètres ainsi introduits à travers l'égalité $F_c = F_{Lorentz}$ c'est-à-dire $q \cdot B = m \cdot v / r$.

Ainsi, on en déduit que la vitesse angulaire ω des particules est constante et que le rayon est proportionnel à la vitesse linéaire :

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{q \cdot B}{m} \text{ et } R = \frac{m}{q \cdot B} \cdot v$$

Celle-ci va être augmentée à chaque demi-tour ; ce qui explique la géométrie de la machine composée de demi-cercles de plus en plus grands. Pour augmenter la vitesse à chaque demi-tour, les particules circuleront dans un champ électrique entre chaque portion de demi-cercle.

L'équation de Lorentz nous indique que la particule va ainsi subir une force égale à $\vec{F}_e = q \cdot \vec{E}$ lorsqu'elle subira ce champ électrique.

Du fait de la géométrie circulaire, les particules parcourent l'espace entre les demi-cercles selon une direction, puis selon la direction opposée pour le demi-tour suivant, etc. (cf. Figure 2). Ainsi, le champ électrique doit être alterné avec une pulsation fixée sur celle de rotation des particules. Ce dispositif permet donc d'augmenter la vitesse des particules accélérées durant leur parcours le long du circuit spiralé.

1.2 - Le synchrocyclotron

Les synchrocyclotrons sont des variantes améliorées des cyclotrons et ont été développés au cours des années 1940. En effet, lorsque la vitesse des particules se rapproche de celle de la lumière, la vitesse angulaire constante jusqu'alors va diminuer du fait de phénomènes relativistes. Ainsi, la pulsation du champ électrique utilisé pour accélérer les particules doit être adaptée en fonction du temps.

Cela constitue la principale avancée technologique que présentent les synchrocyclotrons par rapport aux cyclotrons classiques avec le fait que l'accélération des particules soit pulsée, ce qui leur permet de rester groupées et donc d'être délivrées par paquets. De tels engins peuvent monter à des énergies plus importantes ; par exemple, un modèle classique de synchrocyclotron atteint quelques centaines de MeV sans problèmes.

L'accélération d'électrons est aussi irréalisable avec les synchrocyclotrons car leur faible masse implique une variation de la fréquence de champ électrique beaucoup trop importante.

1.3 - Le synchrotron

Rapidement après le développement du synchrocyclotron, le principe du synchrotron a été envisagé. La différence de conception avec les cyclotrons réside dans le fait que l'accélération des particules se fait dans un pseudo-cercle de rayon constant (en fait constitué de sections droites mises bout-à-bout). Ainsi il est possible de fournir beaucoup plus d'énergie aux particules, elles sont donc accélérées à des vitesses plus importantes. En effet, au cours du développement des synchrotrons, les énergies ont rapidement dépassé le GeV puis le TeV pour certains synchrotrons à protons. Cependant une des principales avancées que constitue le synchrotron est la possibilité d'accélérer des particules aussi petites que les électrons et c'est bien la circularité du parcours

accélérateur qui rend cela possible car elle permet de monter plus haut et plus progressivement en énergie.

Lorsque l'on reprend les équations obtenues lors de l'application de la force de Lorentz au principe fondamental de la dynamique et qu'on les transpose au cas d'un rayon de parcours constant, on remarque que pour augmenter la vitesse, il faut avoir un champ magnétique qui augmente progressivement. Logiquement, dans le cas d'un rayon constant, la fréquence du champ électrique d'accélération est aussi augmentée.

Deux types de synchrotrons existent, les accélérateurs à protons et ceux à électrons qui sont très utilisés, notamment à des fins d'imagerie car une telle technologie permet d'avoir accès à un rayonnement, appelé lumière synchrotron.

En effet, quand des particules chargées sont accélérées de manière radiale - perpendiculairement à leur mouvement - elles émettent un rayonnement électromagnétique. C'est le cas des électrons au cours de leur parcours dans un anneau de synchrotron. Ce rayonnement ainsi généré est appelé rayonnement synchrotron ou lumière synchrotron et peut couvrir une grande partie du spectre électromagnétique : entre l'infrarouge (jusqu'à 1 mm de longueur d'onde) et les rayons X durs (10^{-10} m de longueur d'onde).

La grande variété de longueurs d'onde accessibles à partir du rayonnement synchrotron mais aussi sa très importante brillance permettant une précision accrue, rend cette technologie primordiale dans de nombreux domaines tels que la science des matériaux, la biologie, la physique et chimie fondamentales, la médecine ou même l'archéologie.

Il est important de noter que pour un synchrotron générateur de lumière synchrotron, les énergies sont généralement bien moins élevées que pour les synchrotrons à protons. Par exemple, l'énergie nominale de 2,75 GeV pour le synchrotron SOLEIL situé sur le plateau de Saclay et celle de l'ESRF de 6 GeV n'ont rien à voir avec le Super Proton Synchrotron du CERN et ses 450 GeV.

2 – Fonctionnement technique d'un synchrotron

Comme expliqué dans la partie précédente, la lumière synchrotron est utilisée par de nombreuses équipes de recherches pour analyser des échantillons de manière non-destructive, car ce sont des rayons X aux propriétés particulières. Les échelles atteintes sont du même ordre de grandeur que les longueurs d'onde de rayonnement synchrotron employé et peuvent donc aller jusqu'à l'ångström (10^{-10} m).

Afin de produire cette lumière synchrotron, des électrons sont générés et accélérés dans un accélérateur linéaire appelé linac. Ils passent ensuite dans un accélérateur circulaire - le booster - afin d'être amenés à l'énergie souhaitée. Enfin, ils sont déviés dans l'anneau de stockage où ils vont perdre de l'énergie à chaque tour sous forme de rayonnement synchrotron qui sera collecté dans les lignes de lumières où les chercheurs l'exploiteront pour leurs expériences. L'anneau de stockage comporte de nombreux modules, comme des cavités radiofréquences, afin de venir réaccélérer les électrons ayant ainsi perdu un peu d'énergie ou encore des pompes à vide pour venir assurer un ultravide. En effet, durant tout le parcours que suivent les électrons au sein d'un synchrotron, il règne un vide très poussé - aux alentours de 10^{-12} bar - pour limiter les interactions avec des molécules de gaz. De plus, un renouvellement en électrons de l'anneau de stockage peut être effectué plusieurs fois par jour ou en continu. L'ensemble des composants d'un synchrotron est représenté sur la Figure 3.

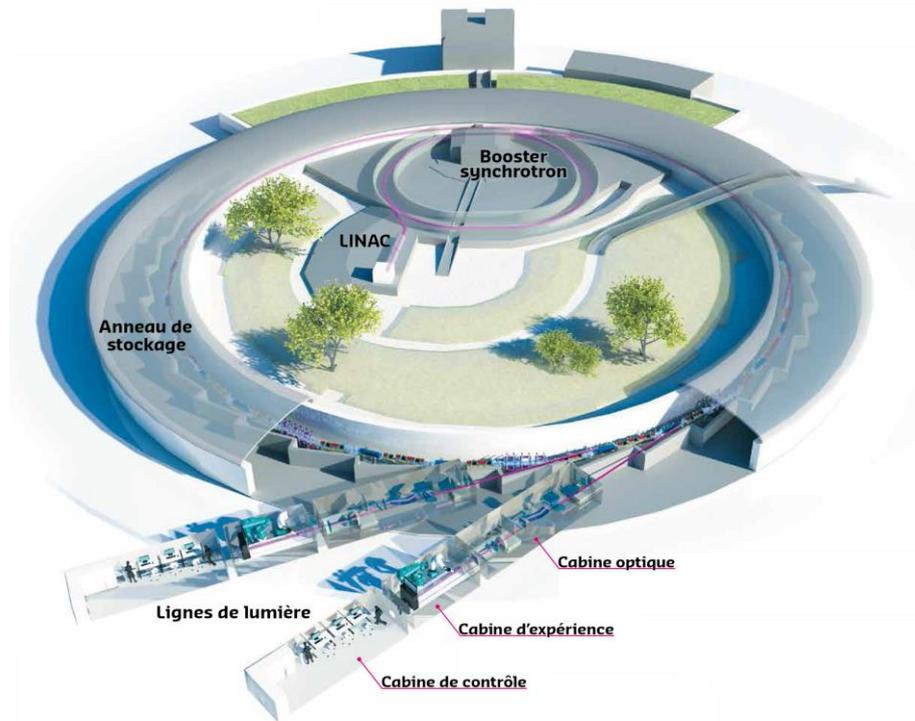


Figure 3 : Schéma représentatif des différentes parties d'un synchrotron [3]

2.1 - Génération des électrons

À l'origine, les électrons vont être générés à partir d'une plaque de métal composite échauffée - la cathode - qui est soumise à un courant de 90 kV. Cette quantité d'électrons en est alors arrachée afin de former un faisceau d'électron d'une énergie de 90 000 eV. Ce courant d'électrons circule directement au sein de l'accélérateur linéaire - le linac - où il va être divisé sous forme de paquets d'électrons (les bunches), focalisé puis accéléré.

- Le groupeur va ralentir les électrons les plus rapides et accélérer les plus lents pour créer des petits paquets. Comme ordre de grandeur, chaque paquet a une énergie de 15 MeV dans le cas du synchrotron SOLEIL.
- Des aimants de focalisation permettent de focaliser le faisceau car ce dernier a naturellement tendance à s'élargir. Ce sont des sortes de lentilles magnétiques qui vont permettre cette concentration du faisceau.
- Enfin, grâce à l'utilisation de champs électromagnétiques (en utilisant les phénomènes de force de Lorentz décrits précédemment), les électrons sont progressivement accélérés jusqu'à atteindre une énergie d'un ordre de grandeur de 200 MeV. Leur vitesse est alors proche de celle de la lumière et, à titre de comparaison, le faisceau est fin comme un cheveu.

Il est important de noter qu'à des vitesses proches de celles de la lumière, une accélération subie par une particule change très peu sa vitesse mais va influencer sur son énergie.

2.2 - Accélération des électrons

Après avoir parcouru le linac, les paquets d'électrons sont reversés dans le booster. Cet accélérateur circulaire - qui est un anneau de 300 mètres de circonférence dans le cas du synchrotron ESRF - va les accueillir pendant plusieurs milliers de tours durant lesquelles leur énergie

va être augmentée petit à petit à chaque tour jusqu'à atteindre la valeur finale qui est, pour illustrer, de 6 GeV, toujours dans le cas de l'ESRF.

Cette opération dure environ 50 millisecondes avant de dévier les paquets, cette fois, dans l'anneau de stockage.

2.3 - Stockage des électrons

L'anneau de stockage est le plus grand des deux anneaux présents dans un synchrotron. Celui de l'ESRF fait, par exemple, 844 mètres de circonférence. Ainsi la taille des bâtiments qui abritent les synchrotrons est souvent imposée par le diamètre de leur anneau de stockage.

Une fois dans l'anneau de stockage, les électrons vont tourner tout en perdant régulièrement de l'énergie sous forme de lumière synchrotron. En effet, cet anneau de stockage est un circuit qui n'est pas tout à fait circulaire car il est composé de sections droites mises bout-à-bout et reliées par des aimants de courbures (ou dipôles). Ainsi, lorsque les électrons voient leur trajectoire modifiée par de tels virages, ils vont alors subir une accélération centripète et ainsi émettre tangentiellement à leur trajectoire une énergie appelée rayonnement de freinage qui est récupérée et qui constitue la lumière synchrotron (Figure 4).

Lorsque la vitesse des particules déviées est bien inférieure à celle de la lumière, le rayonnement émis est très peu énergétique et diffuse dans presque toutes les directions, sous forme de tore (Figure 4). Alors que dans le cas des accélérateurs de particules, la vitesse des particules déviées étant proche de celle de la lumière, le rayonnement est beaucoup plus intense et émis dans un cône très étroit et tangent à la trajectoire, ce qui confère à la lumière synchrotron des propriétés exceptionnelles de brillance, de cohérence et même de structure temporelle et de polarisation. Mais surtout, cela facilite la concentration du faisceau récupéré dans la ligne de lumière. Le contrôle de l'énergie à laquelle sont accélérés les électrons est donc primordial pour assurer une bonne qualité de lumière synchrotron. D'autant plus que le flux du rayonnement synchrotron - qui est le nombre de photons émis par seconde - est proportionnel à l'énergie et à l'intensité du faisceau d'électrons.

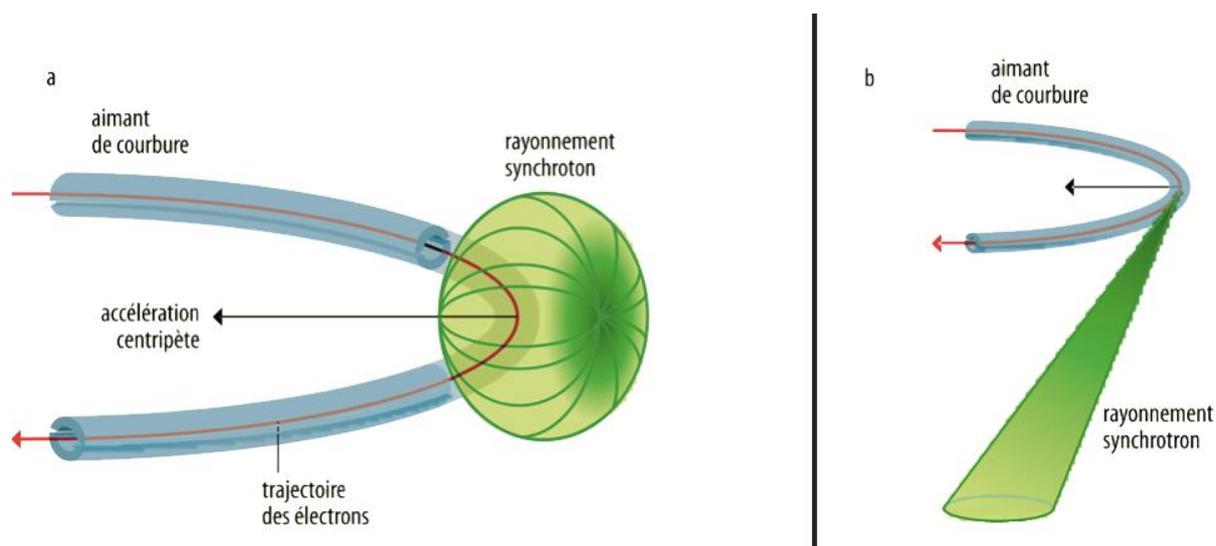


Figure 4 : Génération de la lumière synchrotron au niveau des aimants de courbure pour des particules avec une vitesse (a) très inférieure à celle de la lumière (b) proche de celle de la lumière [4]

En plus des aimants de courbures, il y a d'autres modules répartis le long du parcours de l'anneau de stockage :

- Des cavités radiofréquences sont placées afin de venir compenser l'énergie perdue par les paquets d'électrons lors de leurs virages. Ces modules comprennent un champ électromagnétique oscillant afin de permettre la ré-accélération des électrons pour donner au faisceau la bonne énergie.
- Des aimants de focalisation du même type que ceux présents dans le linac sont placés le long de l'anneau de stockage afin de venir reconcentrer le faisceau. Ces lentilles magnétiques aussi appelées quadripôles servent à maintenir les électrons ensemble autour d'une trajectoire théorique. À l'aide de capteurs présents le long du parcours, le pilotage des quadripôles est donc asservi pour corriger en temps réel de potentiels écarts du faisceau par rapport à la position centrée.
- D'autres lentilles magnétiques peuvent être insérées le long du parcours comme les sextupôles qui corrigent les aberrations chromatiques et géométriques du faisceau pour lui permettre de conserver une durée de vie suffisante c'est-à-dire s'assurer que le courant synchrotron ne diminue pas trop entre deux renouvellements d'électrons (aussi appelés remplissages).
- Les éléments d'insertions (ondulateurs ou wigglers) sont composés de petits aimants avec une alternance de polarité dans le but de faire zigzaguer les électrons et de faire apparaître des phénomènes d'interférences constructives. Ainsi, la cohérence du faisceau va être nettement augmentée pour avoir un ordre de grandeur comparable à celle des lasers. Comparés aux faisceaux issus des aimants de courbure, ceux issus des ondateurs sont plus intenses d'un facteur 10^6 (un million).

Comme précisé précédemment, le parcours des électrons au sein du synchrotron se fait sous ultravide ; ainsi, pour assurer une pression uniforme le long du parcours entre deux pompes à vide, un matériau spécifique NEG (Non Evaporating Getter) peut être utilisé pour recouvrir les parois du circuit que parcourt le faisceau. Un tel matériau va absorber les particules de gaz restantes le long du parcours et ainsi améliorer la qualité du vide. Dans certains cas, par exemple pour le synchrotron suédois MAX IV, le choix du matériau NEG permet même de se passer de pompes à vide.

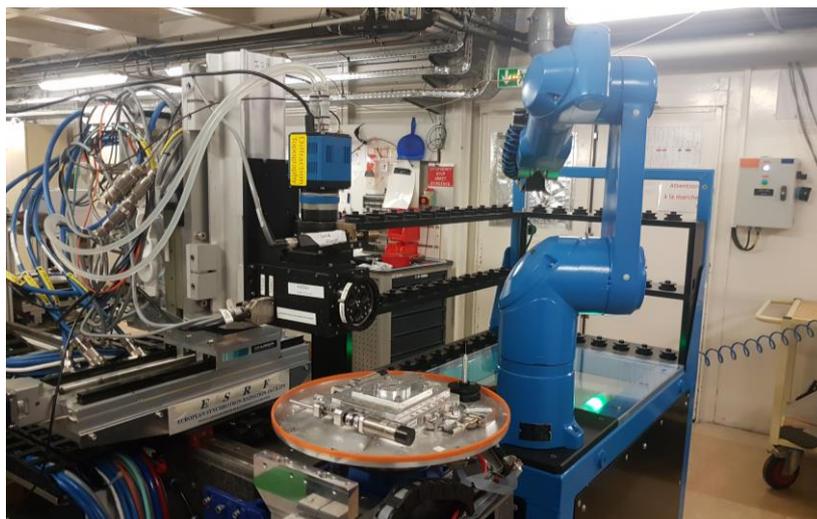
2.4 - Exploitation du rayonnement synchrotron

À la sortie de l'aimant de courbure ou de l'élément d'insertion, la lumière synchrotron est transportée par une portion de circuit, appelée tête de ligne, qui va l'amener jusqu'à la ligne de lumière. Les lignes de lumières sont les zones où la lumière synchrotron va pouvoir être adaptée et mise en forme pour les chercheurs ; chaque synchrotron en comporte des dizaines qui ont chacune leur propre équipe et leurs propres instruments de pointe. Elles peuvent être chacune réservée à un thème ou une technique particulière (science des matériaux, biomédecine, micro-tomographie, diffraction par rayon X, cryo-microscopie électronique, etc.). À titre d'exemple, on peut noter qu'il y a 44 lignes de lumières à l'ESRF et 29 lignes sont ouvertes sur les 43 emplacements disponibles du synchrotron SOLEIL.

La lumière synchrotron est travaillée avant d'être utilisée par les chercheurs puisqu'un ensemble d'éléments optiques (lentilles magnétiques, miroirs, fentes, filtres, monochromateurs, etc.) est disponible pour venir régler les caractéristiques du faisceau comme sa taille ou sa divergence mais aussi pour sélectionner la gamme de longueurs d'ondes à laquelle les chercheurs souhaitent travailler. En effet, plusieurs énergies de faisceau sont disponibles en sortie d'anneau de stockage, il faut donc pouvoir choisir la gamme de longueurs d'ondes adaptée aux spécificités des différentes expériences. Cette adaptation du faisceau est réalisée dans la première partie des lignes de lumières : la cabine optique.

Une fois que la lumière synchrotron a les caractéristiques nécessaires à l'expérience, elle continue à se propager dans la cabine d'expérience où l'échantillon à étudier est positionné. Les tailles caractéristiques d'échantillons sont généralement inférieures au millimètre. Dans cette cabine, des détecteurs sont placés afin d'enregistrer les données générées par l'interaction entre l'échantillon et les rayons X.

Toutes ces données sont récupérées dans la cabine de contrôle qui sert de poste de pilotage aux scientifiques mais qui est aussi une sécurité pour les protéger de la dose radiative produite par les rayons X pendant les expériences (la dose radiative est l'énergie déposée par unité de masse par un rayonnement ionisant qui est cancérigène si trop subi). Pour certaines lignes de lumière de certains synchrotrons, il est même devenu possible de piloter les manipulations à distance depuis son laboratoire d'origine, avec notamment la mise en place de robots changeur d'échantillons (Figure 5).



Figures 5 : Robot changeur d'échantillon de la ligne de lumière spécialisée en tomographie au synchrotron européen ESRF [5].

3 – Équipements synchrotrons à travers le monde

L'ensemble des techniques expérimentales permises par la technologie synchrotron a provoqué grâce à leurs caractéristiques inédites un véritable développement de ce type de grands instruments. Ainsi, au cours des dernières décennies, de nombreux équipements synchrotrons ont été mis en route à travers le monde. Leurs différences résident notamment dans la puissance que chacun peut développer mais aussi dans certains détails de conception.

- Le plus grand accélérateur de particule au monde est le Large Hadron Collider (LHC) du Conseil européen pour la recherche nucléaire - le CERN - qui est situé dans la région de Genève (Suisse) et qui fait environ 27 kilomètres de circonférence. Cependant ce synchrotron à protons ne permet plus d'accélérer des électrons (contrairement à ces versions précédentes) pour ne se focaliser que sur l'étude de particules comme les protons en produisant et étudiant leurs collisions. Dans ce but, il permet alors d'accélérer de telles particules jusqu'à une énergie de 7 TeV.

Concernant les sources de lumière synchrotron, les équipements existants sont moins imposants que le LHC mais restent toutefois des projets extrêmement ambitieux scientifiquement et chers. Il en existe une cinquantaine à travers le monde [6] dont les plus importants sont brièvement décrits ci-dessous.

- Le Synchrotron Européen ou European Synchrotron Radiation Facility - ESRF - (représenté en Figure 1) est issu d'un co-financement entre 22 pays et est situé à Grenoble (France). Cet équipement de 844m de circonférence et d'énergie d'utilisation de 6 GeV constitue un des synchrotrons les plus performants notamment depuis son programme de modernisation (nommé Extremely Brilliant Source - EBS) d'une vingtaine de mois qui s'est achevé début 2020. En raison du nombre important de pays et d'organismes à l'origine de la construction de cet équipement, les études menées à l'ESRF couvrent un vaste nombre de disciplines pouvant aller de l'archéologie aux sciences des matériaux en passant par la géologie et la médecine.

- Le synchrotron états-unien Advanced Photon Source (APS) situé à Argonne près de Chicago est plus grand que l'ESRF - 1.1 km de circonférence pour 7 GeV d'énergie d'utilisation - et est très employé dans les domaines des sciences des matériaux et de la biologie mais aussi de la physique, la chimie, l'écologie ou les sciences de la Terre (Figure 6).



Figures 6 : les synchrotrons états-unien Advanced Photon Source à g. [7] et japonais Spring-8 à d. [8]

- Avec l'ESRF et l'APS, le troisième synchrotron qui constitue le gratin mondial des synchrotrons dits de troisième génération - les plus développés - est le synchrotron japonais Spring-8 situé dans la préfecture d'Hyōgo et dont l'anneau de stockage fait 1.4 km pour pouvoir stocker un faisceau d'électrons de 8 GeV (Figure 6).

- De nombreux autres équipements occupent également une place importante dans le paysage scientifique européen ou mondial (Figures 7) comme le synchrotron britannique Diamond Light Source situé dans l'Oxfordshire avec ses 3 GeV d'énergie nominale et ses 562 m de circonférence ou le synchrotron allemand PETRA III situé vers Hambourg qui peut monter à 6 GeV avec ses 2.3 km de circonférence. En France, les 2.75 GeV d'énergie nominale de l'équipement SOLEIL (354 m de circonférence) à Orsay, en région parisienne sont très utilisés par la recherche nationale. On peut aussi citer le synchrotron canadien de troisième génération - le Canadian Light Source situé à Saskatoon (2.9 GeV pour 147 m de circonférence) ; le plus gros accélérateur de particule de l'hémisphère sud - le synchrotron australien - situé vers Melbourne (3 GeV pour 216 m de circonférence) ; les quelques synchrotrons chinois ou même ALBA, le synchrotron catalan situé près de Barcelone (3 GeV pour 270 m de circonférence).



Figures 7 : Diamond Light Source, le synchrotron britannique en haut à gauche [9], le synchrotron australien en haut à droite [10], SOLEIL, le synchrotron français au milieu à gauche [11], ALBA, le synchrotron espagnol au milieu à droite [12] et le Canadian Light Source en bas [13].

Enfin, il est intéressant de mentionner l'accélérateur linéaire de l'Université de Stanford situé vers San Francisco, qui fait plus de 3 km de long et qui permet de produire des électrons de 8 GeV d'énergie dans un but de génération de rayons X durs très brillants (Figure 8).



Figure 8 : Vue aérienne de l'accélérateur linéaire de 3 km de long de l'Université de Stanford [14].

4 – Exemples d'utilisation

La technologie synchrotron décrite précédemment constitue une avancée considérable dans le domaine de la recherche scientifique notamment grâce à la possibilité d'avoir accès à des rayonnements d'une qualité jusque-là inédite. Ainsi, de nombreuses techniques scientifiques ont pu être développées à partir de ces équipements de pointe. L'utilisation d'un spectre pouvant aller des rayons X à l'infrarouge de très bonne qualité ouvre des portes à des techniques d'imagerie (radiographie, micro-tomographie) et des techniques structurales (spectroscopie, diffraction, diffusion).

En effet, lorsque la matière est soumise à un faisceau électromagnétique, l'énergie réémise sous forme de rayons X secondaires, celle non-absorbée (dont on déduit l'absorption de l'échantillon) ou même la fluorescence générée peuvent être captées et analysées afin de déterminer la composition de l'échantillon étudié. Ces méthodes sont des approches différentes de la spectroscopie appelées respectivement spectroscopies d'émission, d'absorption et de fluorescence. Elles sont très utilisées dans la science des matériaux notamment mais trouvent également de nombreuses applications dans d'autres domaines.

La micro-tomographie est également une technique d'imagerie très employée en science des matériaux qui est transcendée grâce au rayonnement synchrotron (résolution, vitesse d'acquisition, contraste de phase, etc.). Elle est la déclinaison à l'échelle microscopique, voire nanométrique sur certaines lignes de lumière, de la tomographie (scanner médical) qui consiste à la reconstitution en trois dimensions de la microstructure interne d'un échantillon à partir d'un jeu de radiographies prises à différents angles autour de l'objet.

La diffraction et la diffusion de rayons X sont aussi utilisées pour caractériser la composition de certains matériaux en analysant comment des rayons X sont renvoyés, sans perdre d'énergie, par l'échantillon.

De nombreux sujets scientifiques ont été explorés grâce à l'usage de ces méthodes pouvant être appliquées aussi bien aux recherches fondamentale et appliquée qu'à la recherche industrielle.

- Par exemple, en biologie, la cristallographie par rayons X (autre nom de la diffraction aux rayons X) est fréquemment utilisée pour étudier l'organisation atomique des protéines mais trouve aussi des applications dans la médecine pour la conception de médicaments. Aussi, différentes techniques d'imagerie innovantes proposées par les techniques synchrotron permettent de mettre au point de nouvelles thérapies, notamment dans la lutte contre les cancers, en plus de faire évoluer les techniques actuelles d'imagerie médicale. Il existe un vaste nombre de travaux de recherche en médecine effectués grâce à l'utilisation d'un rayonnement synchrotron comme certaines études sur le mode d'infection du SIDA réalisées par des équipes britanniques, l'analyse de la résistance du parasite responsable de la malaria effectuée à l'ESRF en 2018 ou encore la caractérisation moléculaire du virus Covid-19 réalisée en 2020 au synchrotron australien.

- En sciences de la Terre, les rayons X synchrotron ont permis de reproduire les conditions extrêmes de pression et de température qui règnent au cœur de la chambre d'un volcan ainsi qu'au centre de la Terre. Pour cela des échantillons de fer, par exemple, sont bombardés de rayons X afin de monter à des millions d'atmosphères et quelques milliers de degrés.

- Comme décrit plus haut, les techniques synchrotron d'imagerie à l'échelle moléculaire sont particulièrement adaptées à la science des matériaux car elles permettent de faciliter la recherche pour une grande variété de matériaux comme les alliages métalliques, les semi-

conducteurs, les polymères, les fibres optiques, etc. La conception de nouveaux matériaux est très en vogue dans le milieu des recherches liées au synchrotron.

- Toutes les nanosciences sont également très friandes d'études synchrotrons étant donné la taille caractéristique des phénomènes étudiés comme par exemple pour la conception de LED par nano-fils (besoin de résolution spatiale). Plus généralement, les sujets industriels sont aussi très présents dans le monde du synchrotron comme les études sur le fonctionnement de batteries lithium-ion, la toxicité de certains polluants, le stockage de l'hydrogène, etc.

- Enfin, des thèmes plus originaux comme l'archéologie ou l'histoire de l'art sont aussi abordés par certaines études utilisant la technologie synchrotron. En effet, les rayons X permettent d'étudier les vestiges et les fossiles. Ces techniques d'imagerie non-destructives ont par exemple été employées pour analyser la technique de peinture utilisée par Léonard de Vinci appelée sfumato, la pâte à modeler utilisée par Auguste Rodin ou encore la technique employée par Rembrandt pour donner du relief à ses toiles. Certaines enquêtes policières sont aussi amenées à employer ce type d'imagerie synchrotron.

Comme décrit dans ce paragraphe, les utilisations de la technologie issue du rayonnement synchrotron sont très variées. Puisque la plupart des accélérateurs de particules de type synchrotron sont financés en partenariat par différents organismes, les équipes de recherches qui souhaitent avoir accès à ces installations doivent pour la plupart soumettre des projets à un comité d'attribution qui va, après examen des dossiers, répartir le temps de faisceau entre les projets sélectionnés. À noter qu'il existe aussi des contrats qui peuvent garantir un temps de faisceau régulier à certains organismes ; tout comme il est possible d'acheter du temps de faisceau pour généralement quelques milliers d'euros par journée d'utilisation, ce qui est un recours souvent utilisé par les entreprises privées pour réaliser des études (secteur automobile, pétrochimie, pharmaceutique, etc.).

Ces grands instruments que sont les synchrotrons permettent l'accès à des techniques de pointe, ils ont donc une place de plus en plus cruciale dans le paysage scientifique international.

Références :

[1]: <https://www.esrf.eu/>

[2]: http://www.sciences.univ-nantes.fr/sites/genevieve_tulloue/Meca/Charges/cyclotron.html

[3]: <https://www.esrf.eu/about/information-material/brochures>

[4]: <https://www.universalis.fr/encyclopedie/rayonnement-synchrotron/2-le-principe-du-synchrotron/>

[5]: Documentation ESRF

[6]: <https://lightsources.org/lightsources-of-the-world/>

[7]: <https://www.aps.anl.gov>

[8]: <https://www.cornell.edu>

[9]: <https://www.diamond.ac.uk/>

[10]: <https://rsv.org.au/events/australian-synchrotron/>

[11]: <https://www.synchrotron-soleil.fr/fr>

[12]: <https://www.albasynchrotron.es/en>

[13]: <https://lightsources.org/lightsources-of-the-world/americas/canadian-light-source-cls/>

[14]: https://en.wikipedia.org/wiki/SLAC_National_Accelerator_Laboratory

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>