



Sources lumineuses avancées **et Cristallographie**

Outils de découverte et d'innovation

Publié par **LAAAMP**,
"Lightsources for **A**frica, the **A**mericas, **A**sia and **M**iddle East **P**roject"

Sources lumineuses avancées et cristallographie

INTRODUCTION

Que sont les sources lumineuses avancées?

Qu'est-ce que la cristallographie?

Pourquoi s'intéresser aux sources lumineuses avancées?

Comment fonctionne une source lumineuse?

Recherche dans une installation équipée d'une source lumineuse avancée

Formation et sensibilisation

1

2

4

6

7

APPLICATIONS

Applications aux nanomatériaux

Biologie structurale

Des outils puissants pour étudier la biologie des maladies

Applications à l'énergie

Étude des matériaux en conditions extrêmes

Applications en criminalistique

Paléontologie *Recherche sur des fossiles anciens*

Archéologie *Recherche sur des matériaux anciens*

Des centres de haute technologie au service de l'industrie

8

10

12

13

14

15

16

17

L'IMPACT DES SOURCES LUMINEUSES AVANCÉES SUR LA SCIENCE
ET LA SOCIÉTÉ DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

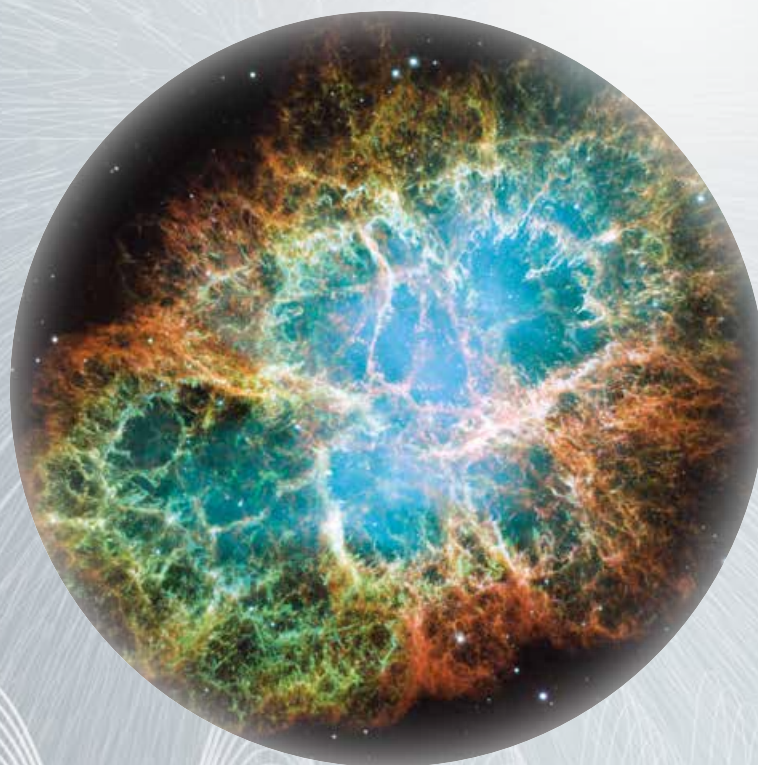
18

EMPLOIS ET CARRIÈRES DANS LES INSTALLATIONS ÉQUIPÉES
DE SOURCES LUMINEUSES AVANCÉES

20

L'AVENIR

21



© HubbleSite: gallery, release

La nébuleuse du Crabe est le vestige d'une explosion de supernova qui a été observée sur Terre en l'an 1054 de notre ère. Le crabe est à environ 6500 années-lumière de la Terre. Les électrons énergétiques issus de l'explosion suivent des trajectoires incurvées par le champ magnétique intense au cœur de la nébuleuse et émettent de la lumière synchrotron, tout comme les sources lumineuses avancées le font sur Terre.

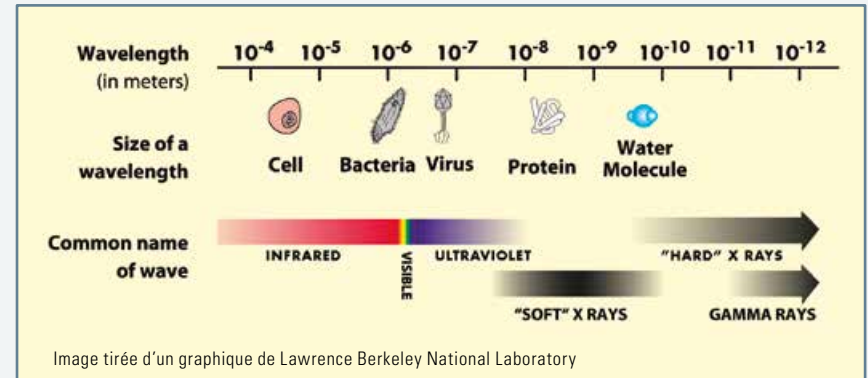
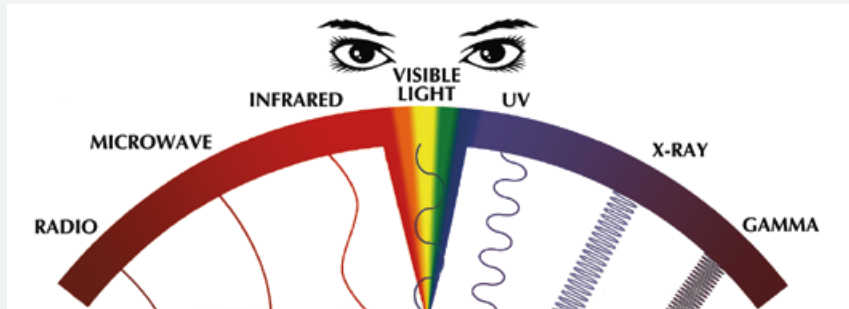
Que sont les sources lumineuses avancées ?

Qu'est-ce que la cristallographie ?

La lumière n'est pas toute visible. En science et en technologie, le mot **lumière** désigne généralement un **rayonnement** électromagnétique. Dans la plupart des longueurs d'onde, la lumière n'est pas visible.

Les sources lumineuses produisent les ondes radio, les micro-ondes, le rayonnement infrarouge, la lumière visible, le rayonnement ultraviolet, le rayonnement X et le rayonnement gamma.

Les sources lumineuses avancées sont beaucoup plus puissantes que les sources classiques, comme les ampoules électriques et les lasers traditionnels.



© Lawrence Berkeley National Laboratory

Les différentes longueurs d'onde de la lumière comparées aux tailles de divers objets. Pour voir un objet, nous avons besoin de lumière ayant une longueur d'onde égale ou inférieure à la taille de l'objet.

L'objet le plus petit que nous puissions voir en lumière visible est une bactérie. Pour voir les détails des composants d'une cellule, par exemple les protéines, nous avons besoin d'une longueur d'onde plus courte, comme celle des rayons X.

La cristallographie est la science qui examine la disposition des atomes dans les solides. Il existe une relation étroite entre la cristallographie et une grande partie des travaux réalisés dans les installations équipées de sources lumineuses avancées.

Des faisceaux de rayons X bien focalisés, générés par des installations avancées de rayonnement synchrotron, ont produit des données de diffraction à haute résolution sur les cristaux de ribosomes, nanomachines cellulaires qui traduisent le code génétique en protéines.

Ada YONATH, prix Nobel de chimie 2009

Pourquoi s'intéresser aux sources lumineuses avancées ?

OBSERVER LA MATIÈRE et décoder ses secrets sont au cœur de la quête de l'humanité pour comprendre le monde qui nous entoure. Les sources lumineuses avancées sont des outils sans pareil permettant de repousser les limites des recherches scientifiques pour l'étude de nouveaux matériaux et de la matière vivante.

En tant que centres de recherches fondamentales et appliquées, les sources lumineuses jouent un rôle clé dans la stimulation de l'innovation et le renforcement de la compétitivité industrielle.

Les **sources lumineuses avancées** sont en train de révolutionner une multitude de sciences fondamentales, appliquées et industrielles, y compris l'agriculture, l'archéologie, la biologie, la biomédecine, la chimie, la criminalistique, l'écologie, l'énergie, l'étude du patrimoine culturel, la géologie, l'ingénierie, la nanotechnologie, la paléontologie, la pharmacologie, la physique et la science des matériaux.

De nos jours, les sources lumineuses avancées sont *le* moyen ultime de caractériser les matériaux. Elles produisent sur les microstructures et

nanostructures des matériaux manufacturés des connaissances impossibles à obtenir autrement. Les industriels le savent et utilisent de plus en plus les sources lumineuses avancées à l'appui de la recherche et de l'innovation dans la mise au point de produits.

Les installations qui en sont équipées ont un impact majeur sur la formation théorique et pratique des étudiants de cycle supérieur, nos futurs scientifiques.

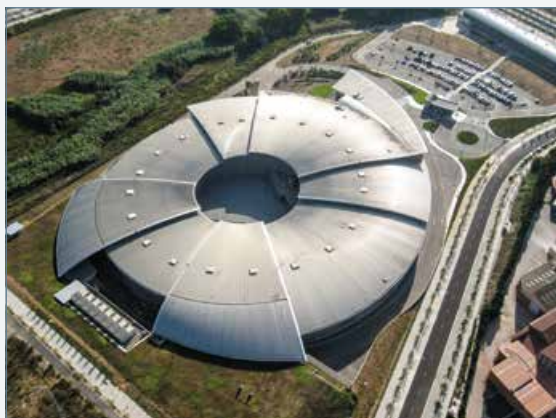


Photo : ALBA

ALBA, installation de lumière synchrotron située près de Barcelone, permet de visualiser la structure atomique de la matière et d'étudier ses propriétés.

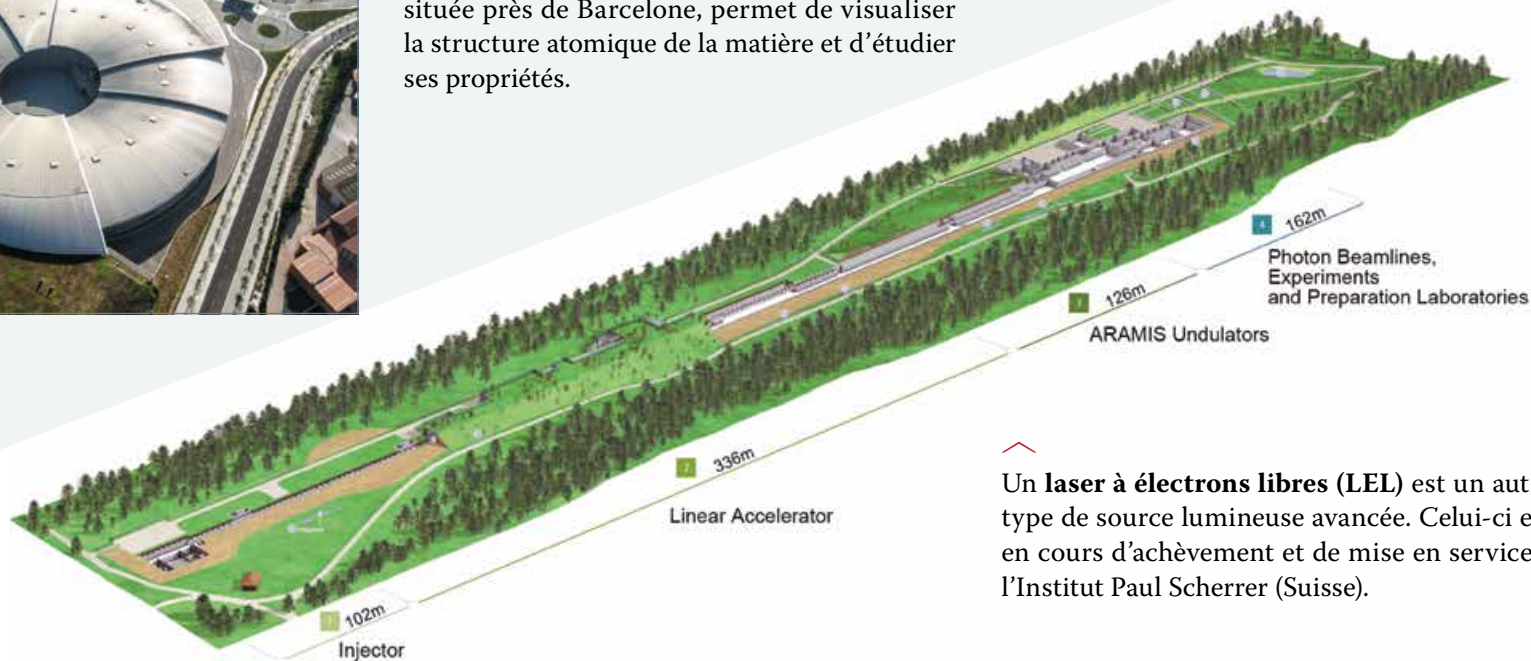
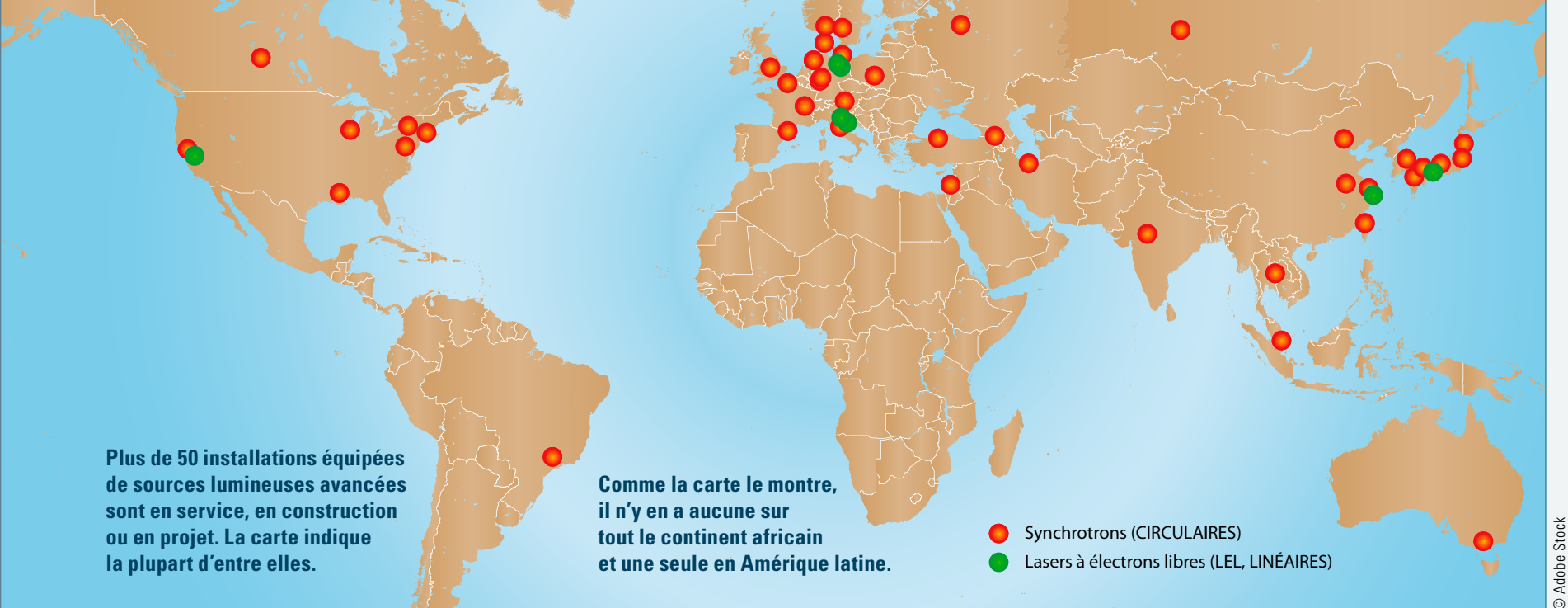


Image : Hans Braun, PSI

Un **laser à électrons libres (LEL)** est un autre type de source lumineuse avancée. Celui-ci est en cours d'achèvement et de mise en service à l'Institut Paul Scherrer (Suisse).



© Adobe Stock

Les sources lumineuses avancées sont essentielles aux recherches de pointe dans de nombreuses disciplines et activités industrielles – répondant parfois aux besoins scientifiques, commerciaux et éducatifs actuels d'un pays ou d'une région. Des milliers d'étudiants de cycle supérieur en biologie, chimie, écologie, médecine et sciences des matériaux et dans d'autres disciplines ont

fait des recherches de classe internationale pour leurs thèses de doctorat dans des installations équipées de sources lumineuses dans le monde entier. Rendre une telle ressource disponible a été une motivation majeure dans beaucoup de pays ayant entrepris de se doter de telles sources au milieu des années 1980.



Photo : Brookhaven National Laboratory

POUR EN SAVOIR PLUS

<http://lightsources.org>



Le NSLSII (source nationale de lumière synchrotron) au Brookhaven National Laboratory (États-Unis) est l'une des plus récentes et des plus brillantes sources lumineuses au monde, et compte jusqu'à 6 000 utilisateurs par an.

Comment fonctionne une source lumineuse ?

L'ACCÉLÉRATION est un changement de vitesse ou de direction d'un mouvement. Quand elles sont accélérées, toutes les particules chargées électriquement émettent un rayonnement, que nous appelons « lumière ».

Quand ils sont accélérés, les protons et les électrons peuvent émettre de la lumière. Mais les électrons en émettent considérablement plus que les protons. C'est pourquoi toutes les sources lumineuses avancées utilisent des électrons.

Il existe deux types principaux de sources lumineuses avancées : les sources **circulaires**, anneaux de stockage d'électrons appelés « synchrotrons », et les sources **linéaires**, lasers à électrons libres (LEL). Chaque installation de rayonnement synchrotron est différente et a des capacités différentes. En général, toutefois, l'installation est comme une chaîne composée de maillons.



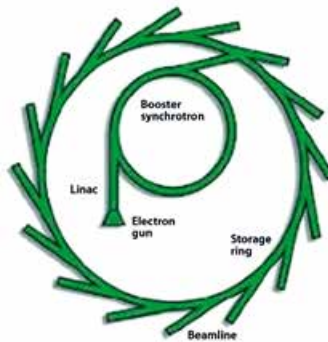
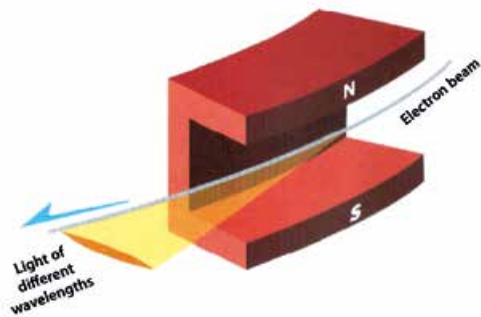
Chaque maillon de la chaîne accélère davantage les électrons et les injecte dans le maillon suivant. Les détails ci-dessous concernent l'anneau d'énergie moyenne Diamond.

SOURCES CIRCULAIRES.

Quand un faisceau d'électrons passe entre les pôles nord et sud d'un aimant, sa trajectoire s'incurve. Il change de direction et émet de la lumière. Les électrons peuvent être stockés et circuler dans un anneau

pour des durées allant jusqu'à une journée. En tournant, les électrons émettent un rayonnement électromagnétique, tant dans le visible que dans l'invisible, des très grandes longueurs d'onde (infrarouge) aux très courtes (rayons X).

Comme le rayonnement est émis tangentiellement à l'anneau, de nombreuses lignes de faisceaux peuvent être construites, et les scientifiques peuvent recueillir des données simultanément.



Le schéma montre les particularités de la source de lumière Diamond, installation nationale de rayonnement synchrotron située sur le Harwell Science and Innovation Campus, dans l'Oxfordshire (Royaume-Uni).



Canon à électrons. Les électrons « s'évaporent » à partir d'une surface chaude et sont accélérés jusqu'à une énergie de 90 000 électronvolts (90 keV). Un **linac** (accélérateur linéaire) est le premier de trois accélérateurs de particules de cette chaîne ; les électrons sont accélérés de 90 keV à 100 millions d'électronvolts (100 MeV). **Booster.** Des aimants courbent le faisceau d'électrons autour d'un cercle, et une source de radiofréquences les accélère jusqu'à 3 milliards d'électronvolts (3 GeV) avant qu'ils ne soient transférés dans l'anneau de stockage. L'**anneau de stockage** est composé de sections droites jointes par des angles pour former une boucle fermée d'environ 600 m de circonférence. Il reçoit toutes les dix minutes un nouveau paquet d'électrons. Dans certaines installations, il est rechargé à intervalles de quelques heures. Des **lignes de faisceaux** fonctionnant simultanément transportent de la lumière à différentes longueurs d'onde vers les utilisateurs.

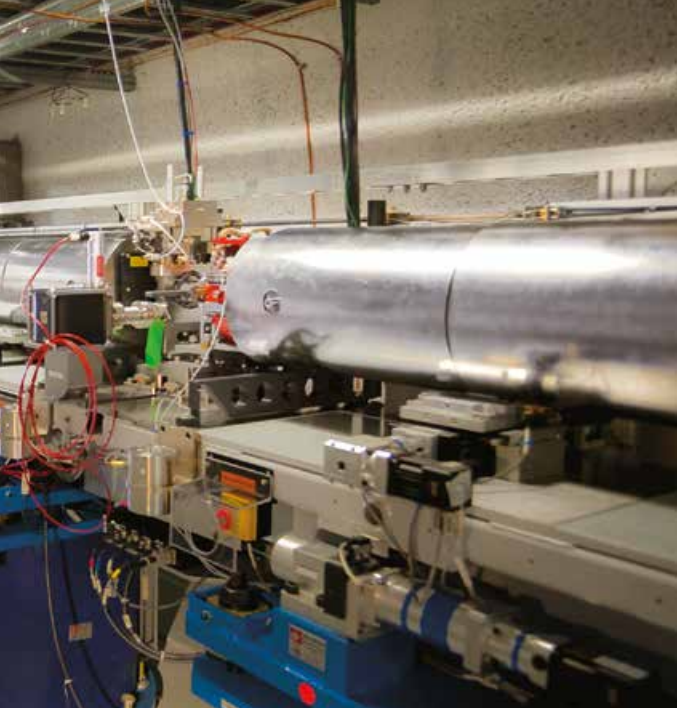


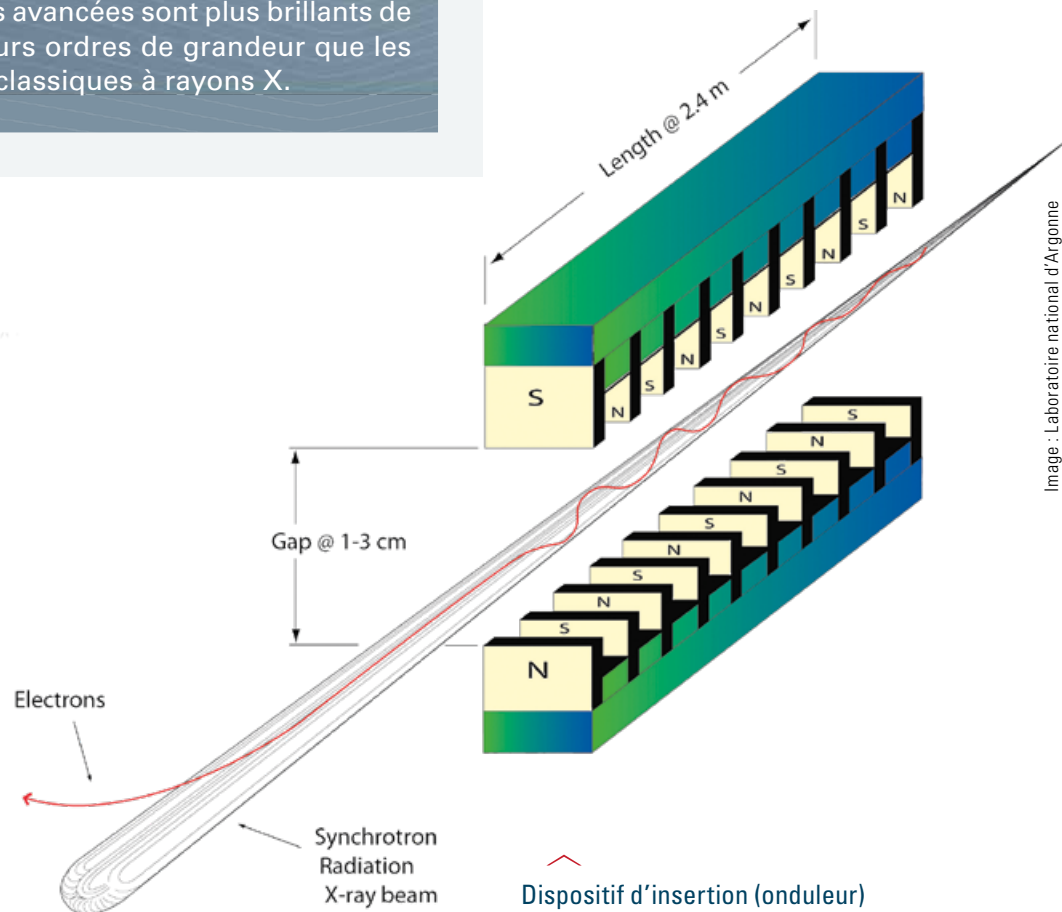
Photo : SLAC National Accelerator Laboratory

Brillance

Quand on compare des sources lumineuses, une mesure majeure de la qualité, appelée « brillance », tient compte du nombre de photons produits par seconde, de la vitesse à laquelle le faisceau s'élargit, de la taille du faisceau et de l'étalement du faisceau en fréquences ou en longueurs d'onde. Les faisceaux de rayons X provenant de sources lumineuses avancées sont plus brillants de plusieurs ordres de grandeur que les tubes classiques à rayons X.

Le LCLS, l'accélérateur linéaire source de lumière cohérente de l'installation nationale d'accélérateur du SLAC à l'université Stanford (Californie), est l'un des premiers lasers linéaires à électrons libres au monde.

SOURCES LINÉAIRES. Produire de la lumière à partir de faisceaux d'électrons. Les lasers classiques produisent leur lumière extrêmement utile en secouant les électrons liés dans les atomes. Les lasers à électrons libres alimentés par accélérateur (LEL) produisent de la lumière en utilisant des aimants appelés onduleurs pour secouer les électrons qui sont libérés des atomes. Les impulsions d'un LEL sont mille fois plus courtes que celles d'un anneau de stockage et beaucoup plus intenses. Cela a ouvert de nouvelles et passionnantes possibilités de recherches dans de nombreux domaines différents. Un inconvénient des LEL est le nombre comparativement limité des lignes de faisceaux pouvant être exploitées simultanément.



Un **onduleur** est un « dispositif d'insertion » car il est « inséré » dans la trajectoire de l'accélérateur. Il est utilisé dans des sources lumineuses avancées aussi bien circulaires que linéaires et se compose d'une structure magnétique périodique dont l'orientation des pôles nord et sud des aimants alterne. L'onduleur stimule une émission de rayonnement synchrotron hautement brillant dirigé vers l'avant en contraignant un faisceau de particules chargées à onduler (accélérations) quand il passe dans le dispositif.

Recherche dans une installation équipée d'une source lumineuse avancée

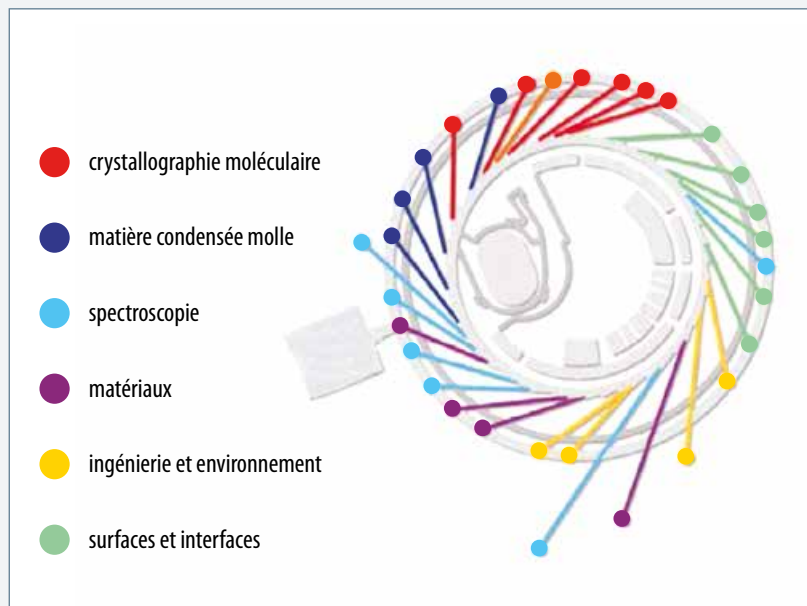


Diagramme de la source de lumière Diamond (Royaume-Uni), précisant les domaines de recherche typiques pour chaque faisceau.

Lignes de faisceaux dans le hall d'expérimentation de la fabrique de photons KEK, au Japon. >

L'ambiance de travail aux frontières de la science et de la technologie

Une équipe de scientifiques, habituellement d'une université, mais parfois d'une compagnie ou d'un laboratoire public, et travaillant souvent en collaboration avec plusieurs organismes, émettent une proposition. Ils décrivent l'étude, spécifient les lignes de faisceaux qu'ils souhaitent utiliser et le temps de faisceau (en heures) dont ils ont besoin. Un comité désigné par le directeur de l'installation choisit les propositions les plus intéressantes scientifiquement, normalement sans tenir compte de l'organisme ou du pays.

L'équipe est souvent dirigée par un professeur et composée de scientifiques de niveau postdoctoral et de doctorants. La plupart des installations disposent d'un hébergement, d'une cafétéria, d'une bibliothèque et d'un centre informatique. Ce sont des centres de formation théorique et pratique sans pareil et les interactions entre les groupes font partie de l'expérience.



Crédit photo : Hitoshi Abe, KEK

Formation et sensibilisation

L'UN DES PROGRAMMES de sensibilisation les plus réussis est le programme OpenLab de l'Union internationale de cristallographie (UIC) et de l'UNESCO. Il s'agit d'un réseau de laboratoires de cristallographie de divers pays, principalement d'Afrique, d'Amérique centrale et du Sud et d'Asie du Sud dont l'objectif est de permettre l'accès aux connaissances acquises grâce à la cristallographie dans le monde entier. Les fonds du LAAAMP servent aussi à financer d'autres OpenLabs.



Photo : Peter Strickland, UIC



Photo : Peter Strickland, UIC

OpenLab UIC-UNESCO, Rabat (Maroc), mai 2014.

Cet OpenLab a été organisé selon la formule du laboratoire mobile : un diffractomètre portable a été déplacé en divers endroits du pays (Rabat, El Jadida et Agadir). Il a été utilisé à chaque étape pour un cours de cristallographie comprenant des leçons sur l'emploi de l'instrument et du logiciel associé.

POUR EN APPRENDRE D'AVANTAGE

<http://iucr.org>



OpenLab UIC-UNESCO en Uruguay, juillet 2014.

Des étudiants près du microscope préparent des cristaux pour une mesure de diffraction des rayons X, tandis que d'autres dans la salle analysent les données d'une expérience précédente.

Applications aux nanomatériaux

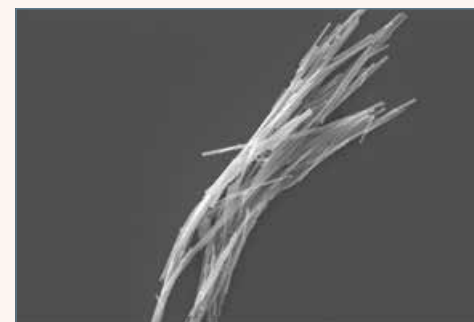
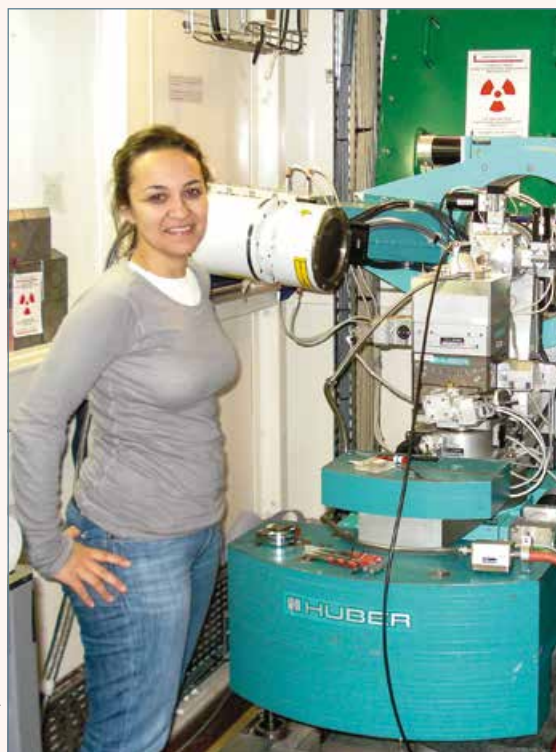
NANO est un préfixe indiquant le milliardième. Un nanomètre (**nm**) est un milliardième de mètre. Une nanoseconde (**nsec**) est un milliardième de seconde. Un moyen pratique pour mémoriser la durée d'une nanoseconde est de se souvenir qu'un signal se déplaçant dans un fil ou un morceau de fibre optique de 30 cm de long met environ une nanoseconde pour aller d'un bout à l'autre.

Les molécules de protéines ont une taille de quelques nanomètres (page 1) et les rayons X mous de sources lumineuses avancées ont des

longueurs d'onde de quelques nanomètres, correspondance idéale pour des études fondamentales sur les molécules de protéines.

Nanotechnologie et nanomatériaux sont des termes généraux désignant la conception et la création de matériaux basés sur des structures à nanoéchelle, généralement de 100 nanomètres ou moins. Ils comprennent des dispositifs et des systèmes obtenus en manipulant un par un des atomes ou des molécules, ainsi que des matériaux contenant de très petites structures. Les nanomatériaux peuvent avoir des propriétés

physiques ou chimiques différentes de celles des mêmes matériaux à l'état brut. Le nombre de produits issus de la nanotechnologie ou contenant des nanomatériaux ne cesse d'augmenter. Les domaines d'application actuels comprennent les soins de santé (administration ciblée de médicaments, médecine régénérative et diagnostic), l'électronique, les cosmétiques, les textiles, la technologie de l'information et la protection de l'environnement. On trouve des nanomatériaux dans toute une gamme de produits, y compris l'emballage des aliments, les pansements et les compléments alimentaires.



Images de nanofils : Ö. Öztürk

Özgül Öztürk procédant à des mesures de diffraction des rayons X pour étudier l'effet du dopage de nanofils de semi-conducteurs. Les travaux ont été réalisés à l'Installation européenne de rayonnement synchrotron, à Grenoble. M^{me} Öztürk préside le Comité régional du Moyen-Orient du LAAAMP, ainsi que le Comité des utilisateurs du SESAME.



Crédit photo : Elettra Sincrotrone

L'Elettra Sincrotrone de Trieste (Italie) est un centre international de recherche au service de la science et de l'industrie. Il accueille deux sources lumineuses avancées : FERMI (laser à électrons libres) et Elettra (anneau de stockage). La lumière produite est transférée à plus de 30 postes d'expérimentation spécialisés dans de nombreux domaines, dont la chimie, la microscopie, la science des matériaux, l'électronique et la technologie de l'information.

L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et Elettra ont construit et exploitent ensemble une ligne de faisceaux et le poste final pour la spectroscopie de fluorescence X. Ces installations offrent des possibilités de recherche et de formation avancée pour les scientifiques de pays en développement, et créent des liens entre ceux-ci et les équipes de recherche existantes.

L'invention et le développement des LEL ont ouvert de nouveaux horizons formidables pour la recherche fondamentale. La durée extrêmement courte des impulsions des LEL, qui n'est que de 30 femtosecondes (une femtoseconde est égale à un millionième de nanoseconde !) permet de filmer les processus moléculaires fondamentaux à mesure qu'ils se produisent.

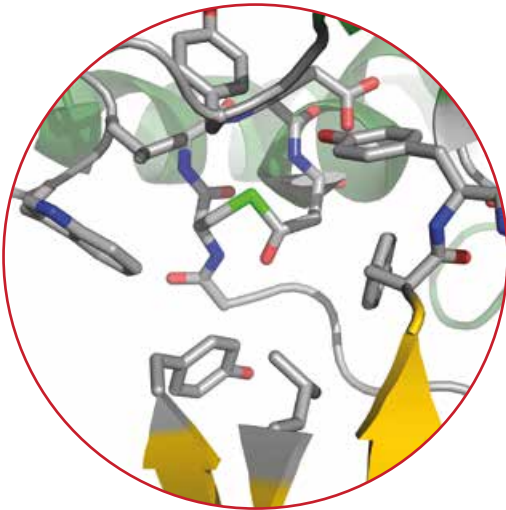
La photosynthèse induite par la lumière solaire est la source d'énergie de toutes les plantes vertes. L'accélérateur linéaire source de lumière cohérente (LCLS) de l'université Stanford a produit un « film moléculaire » d'un complexe moléculaire bactérien qui catalyse la photosynthèse en décomposant l'eau en hydrogène et oxygène. Une compréhension plus complète de la photosynthèse permettrait d'élaborer de meilleures cellules solaires et de faire avancer la recherche sur la photosynthèse artificielle.

Biologie structurale

Des outils puissants pour étudier la biologie des maladies

PALUDISME

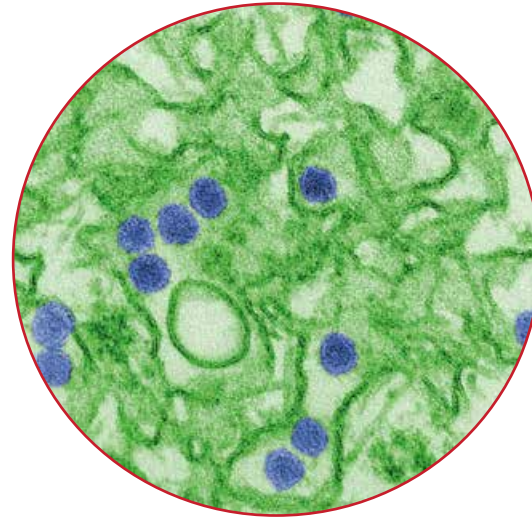
GRÂCE à la source avancée de photons du Laboratoire national d'Argonne, des chercheurs du Southwestern Medical Center de l'université du Texas contribuent à lutter contre le paludisme, maladie qui tue des millions de personnes. Ils étudient comment une protéine du système immunitaire du moustique agit contre le parasite qui provoque le paludisme.



Remerciements à Richard Baxter et Johann Deisenhofer pour l'image

ZIKA

LE VIRUS Zika, devenu un fléau mondial, est propagé par les moustiques Aedes, actifs durant la journée. Ci-dessous, une image colorisée numériquement de particules du virus Zika (en bleu) d'environ 40 nm de diamètre. Des scientifiques du Laboratoire brésilien de lumière synchrotron cherchent des méthodes de lutte contre le virus.



Crédit photo : Centres pour le contrôle et la prévention des maladies, Département de la santé et des services humains des États-Unis



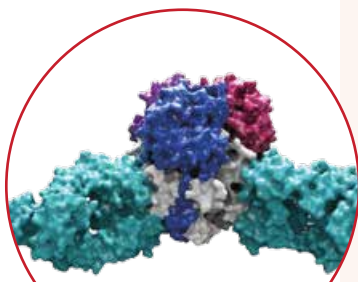
Crédit photo : Source de rayonnement synchrotron,
Laboratoire national de Brookhaven

VIH/SIDA

Dans le monde, quelque 35 millions de personnes vivent avec le VIH, qui s'adapte et mute en permanence, mettant les chercheurs au défi. Grâce à des images du VIH et de ses protéines constituantes, obtenues avec une source de lumière claire, des scientifiques étudient comment l'organisme peut combattre le virus, l'objectif ultime étant de produire des antiviraux plus efficaces.

LASSA

La persévérance dans la lutte contre le virus Lassa, qui est mortel, porte ses fruits à la source de rayonnement synchrotron de Stanford. Les recherches ont révélé la toute première image de sa protéine virale insaisissable. Un anticorps provenant d'un survivant humain (bleu clair ou turquoise) est en train de désactiver la protéine de surface du virus Lassa. Les travaux montrent comment concevoir des stratégies de vaccination pour provoquer des réponses immunitaires de protection.



Crédit photo :
Ollmann Sapphire Laboratory,
Scripps Research Institute

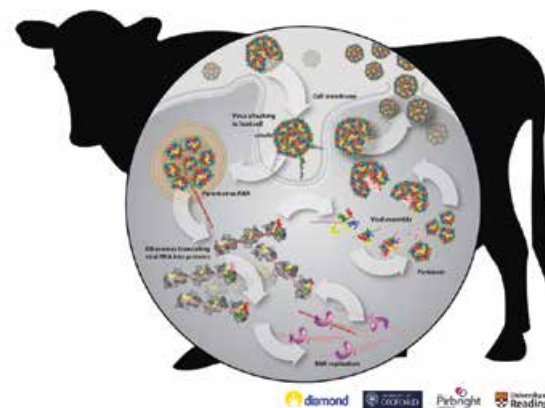
FIÈVRE EBOLA



La maladie causée par le virus Ebola, fièvre hémorragique virale touchant l'homme ou l'animal, se propage par contact direct avec les fluides organiques d'un sujet contaminé. L'épidémie la plus importante s'est produite en Afrique de l'Ouest de décembre 2013 à janvier 2016. La fin de l'urgence a été déclarée en mars 2016. Une autre flambée a démarré en mai 2017 en République démocratique du Congo, sur le continent africain. Grâce aux données obtenues avec des sources lumineuses avancées, les scientifiques vaincront la fièvre Ebola.

Source : PureLife Pulse.
PureLife Pulse est un fabricant de produits de santé et de sûreté

Fièvre aphteuse



Crédit photo : Source de lumière Diamond

LES SCIENTIFIQUES de la source de lumière Diamond et de l'université d'Oxford ont produit un vaccin contre la fièvre aphteuse, qui est due à un virus. L'épidémie de 2001 au Royaume-Uni a causé la mort de plus de 7 millions d'animaux. La fièvre aphteuse reste l'une des maladies du bétail les plus dévastatrices économiquement au monde. Elle est endémique en Afrique centrale et dans certaines parties du Moyen-Orient et d'Asie. L'image illustre le cycle de vie du virus.

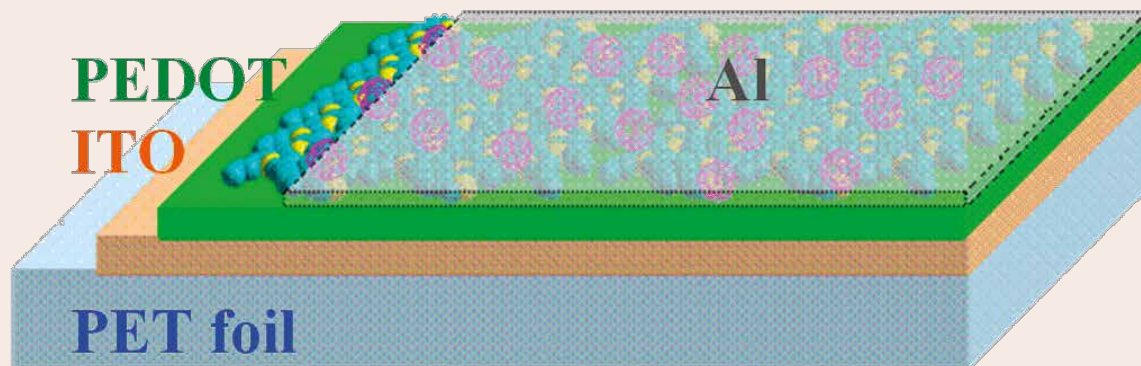
Applications à l'énergie

LE MONDE MODERNE consomme des quantités toujours plus grandes d'énergie. Les réserves actuelles de combustibles fossiles sont limitées. L'un des plus grands défis du XXI^e siècle est de fournir à la population mondiale l'énergie dont elle a besoin sans trop augmenter la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Une part importante devra provenir des cellules solaires tirant parti de la lumière dont le Soleil inonde notre planète. Les cellules photovoltaïques organiques sont très prometteuses pour la mise au point de panneaux solaires légers et d'un bon rapport coût-efficacité.

Le développement de sources d'énergie nouvelles et l'amélioration de l'efficacité et de l'exploitation des systèmes existants nécessitent une compréhension détaillée de la structure et du comportement au niveau microscopique fondamental. C'est un domaine où les faisceaux de rayons X puissants d'une source de rayonnement synchrotron jouent un rôle majeur.

Les recherches menées dans de nombreuses installations équipées de sources lumineuses visent à comprendre et améliorer les matériaux multicouches qui composent une cellule solaire

organique. L'une de ces installations est le Centre de recherches moléculaires de l'université de Porto Rico, qui conduit les activités du LAAAMP en vue du progrès des sources lumineuses et de la cristallographie dans les Caraïbes.



Source : Kivirus, version anglaise de Wikipédia

Une cellule solaire organique ou une cellule solaire plastique fait appel à l'électronique organique, branche de l'électronique qui s'intéresse aux polymères organiques conducteurs ou aux petites molécules organiques pour l'absorption de la lumière et le transport de charges afin de produire de l'électricité à partir de la lumière solaire grâce à l'effet photovoltaïque.

Les symboles sur le diagramme sont des abréviations désignant les composés utilisés. Les avantages sont la souplesse et le faible coût. Les sources lumineuses avancées servent dans une partie des activités de mise au point de panneaux solaires.



© Shawn Hempel – stock.adobe.com

Les grandes batteries de panneaux solaires sont de plus en plus courantes

Étude des matériaux dans des conditions extrêmes

L'ÉTUDE des effets de la pression et de la température sur les propriétés des matériaux est fondamentale. Elle concerne de nombreux problèmes relatifs à la physique et à la chimie de la matière condensée, aux sciences de la Terre et des planètes, et à la science et à la technologie des matériaux.

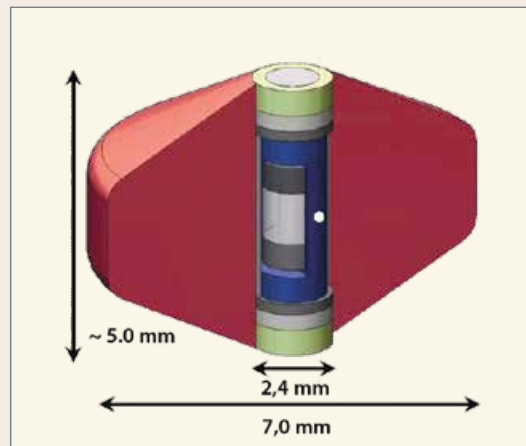
En particulier, la recherche sur les hautes pressions et les hautes températures est d'une importance capitale dans l'étude de la composition, de l'état thermique et des propriétés de l'intérieur de la Terre et des autres planètes. Les roches et les matériaux potentiels du manteau sont soumis à des conditions de pression et de température appropriées et leurs propriétés sont mesurées. Ces données, couplées aux observations géophysiques et géochimiques, sont indispensables pour comprendre et modéliser l'intérieur des planètes.

Le rayonnement synchrotron puissant peut traverser les parois hautement absorbantes des cuves sous pression dans lesquelles se trouvent les échantillons.

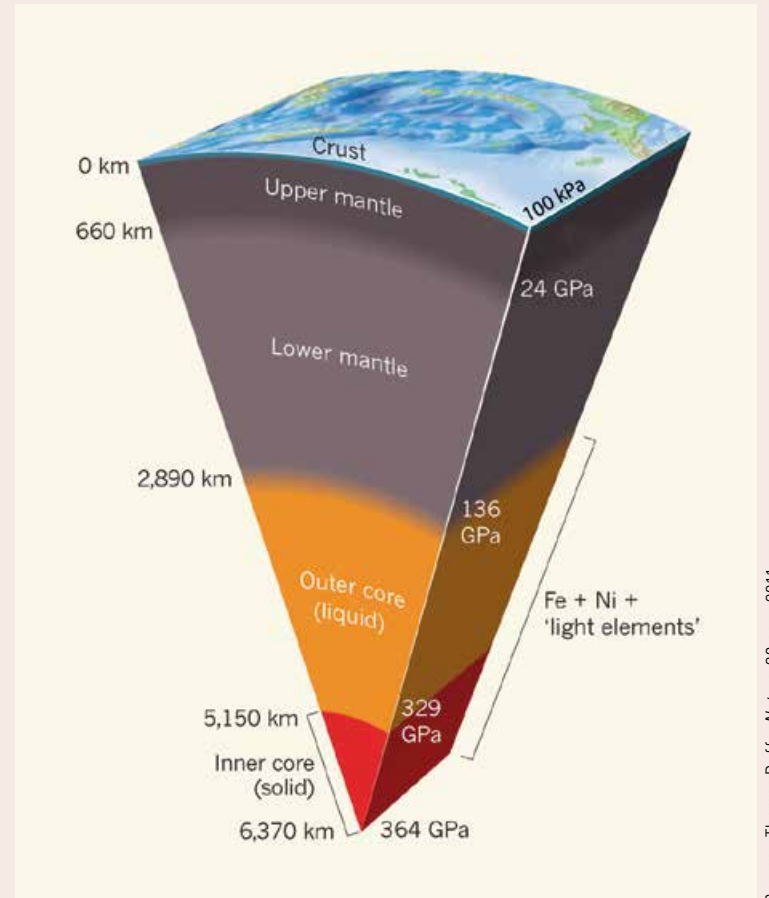
En outre, les faisceaux à haute brillance sont idéaux pour les focalisations microscopiques nécessaires pour sonder les très petits échantillons requis pour les études sous haute pression.

Certaines de ces études ont été menées par une équipe de l'université de Johannesburg à l'aide des faisceaux de l'ESRF, l'Installation européenne de rayonnement synchrotron située à Grenoble (France). En 2013, l'Afrique du Sud est devenue membre associé scientifique de l'ESRF.

Cellule mécanique pour
l'exposition de matériaux sous
haute pression au faisceau



Source : M. van Kan Parker et al., *Nature Geosci.* 5, 186 (2012) (ESRF)



Coupe de l'intérieur de la Terre. Le manteau inférieur s'étend d'une profondeur de 660 km à une profondeur de 2 800 km. Les pressions sont exprimées en GPa (gigapascal; un GPa est égal à environ 10000 fois la pression atmosphérique au niveau de la mer).

Applications en criminalistique

LE RAYONNEMENT SYNCHROTRON est un outil pour étudier les preuves à l'état de traces : verre, résidus de poudre d'arme à feu, pigments et échantillons biologiques comme les poils humains. L'imagerie peut être réalisée à hautes résolution et sensibilité. L'ajustement de l'énergie permet une identification et une description chimiques

puissantes grâce à la spectroscopie d'absorption des rayons X. Ces techniques sont particulièrement adaptées aux échantillons de petite taille.

Analyse de poils. Des traces d'éléments sanguins s'incorporent aux cellules des poils durant leur croissance dans le bulbe pileux. À mesure que

le poil pousse, chaque segment se déplace vers l'extérieur, ce qui donne une chronologie des concentrations sanguines de l'individu. Par exemple, les poils peuvent nous renseigner sur les apports alimentaires, l'exposition aux polluants, les effets des maladies et les profils d'ingestion de médicaments, y compris de produits dopants.

BULLETIN DES SOURCES LUMINEUSES AVANCÉES

ÉDITION INTERNATIONALE 2018

RETOUR SUR DES CRIMES NOUVEAUX ET ANCIENS. PROGRÈS DE L'IDENTIFICATION DE CONTAMINANTS ENVIRONNEMENTAUX



D'où vient la contamination de nos corps par le mercure ?

Le mercure, neurotoxine puissante, peut s'accumuler pendant des années. Une équipe internationale, dont l'Installation européenne de rayonnement synchrotron de Grenoble, a élaboré de nouveaux moyens de trouver la source du mercure dans les poils humains.

D'où provenait l'arsenic qui a tué quatre personnes au Japon en 1988 ?

La fluorescence X à l'aide de faisceaux à Spring-8 et KEK au Japon a permis de jeter une lumière nouvelle sur ce fameux cas de personnes empoisonnées pour avoir mangé du curry contaminé par de l'arsenic. Le meurtrier a été condamné à mort.



Comment Phar Lap, le fameux cheval de course australien, est-il mort en 1932 ?



Phar Lap est mort soudainement dans des circonstances suspectes. L'analyse de ses poils au synchrotron australien a d'abord suggéré un meurtre par empoisonnement à l'arsenic, qui a fait les gros titres de la presse mondiale, mais une analyse ultérieure a prouvé que le cheval était mort d'une colique.

Agnès Sorel, première maîtresse royale officielle de France, a-t-elle été empoisonnée ?

L'ESRF a remonté le temps pour étudier la mort soudaine de la belle maîtresse du roi Charles VII au ^{xv}e siècle. L'analyse des cheveux montre des niveaux incroyablement élevés de mercure.



Que sont les points blancs sur le fameux tableau de Munch « Le Cri » ?



S'agit-il de fientes d'oiseaux ? Une analyse à l'aide de PETRA III, la source lumineuse avancée de Hambourg, a écarté cette hypothèse et confirmé qu'il s'agissait de cire d'abeille servant à fixer la peinture écaillée.

Paléontologie *Recherche sur des fossiles anciens*



© ESRF/P. Jayet

Crâne d'un dinosaure à crocs de 200 millions d'années. Le fossile a été radiographié à l'ESRF à l'aide d'un faisceau 100 milliards de fois plus puissant que ceux utilisés dans les hôpitaux. Cela a permis aux chercheurs de l'Institut d'étude de l'évolution de l'université du Witwatersrand (Afrique du Sud) de le regarder « à l'intérieur » pour la toute première fois.

L'ESRF est un partenariat de 22 pays, dont 13 membres et 9 associés scientifiques. Il n'est pas limité aux pays européens, et l'Afrique du Sud est son associé le plus récent.

Paléontologie

Les paléontologues utilisent les fossiles pour étudier la vie à travers les temps géologiques. Ils recueillent, observent, décrivent et classent les fossiles animaux et végétaux. Ils utilisent ceux-ci pour en

apprendre davantage sur ce à quoi la Terre ressemblait dans le passé et l'évolution de l'environnement dans le temps. Les fossiles nous aident à comprendre l'évolution des espèces. D'importantes recherches en paléontologie sont menées grâce aux sources lumineuses avancées.



© V. Fernandez et al., PLoS ONE 10 (7): e0128610 (2014) (ESRF)

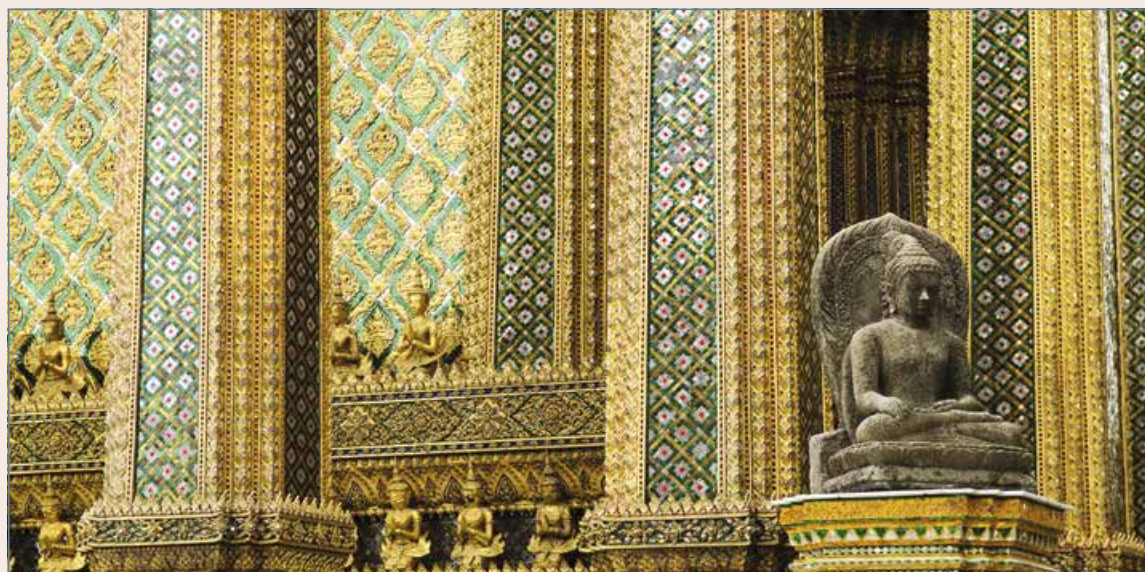
Intérieur d'un œuf fossilisé d'un centimètre de long. Les œufs ont été découverts dans le Nord-Est de la Thaïlande et ont 125 millions d'années. Grâce à l'utilisation de l'imagerie par microtomographie dans l'étude de squelettes d'embryons cachés dans les œufs, les chercheurs connaissent désormais la véritable identité de l'animal qui les a pondus : un lézard anguimorphe, espèce qui comprend les dragons de Komodo.

Archéologie *Recherche sur des matériaux anciens*

Dentition d'un enfant néanderthalien reconstituée virtuellement. L'histologie virtuelle par synchrotron révèle de précises informations sur la poussée dentaire, données enregistrées sous forme de minuscules traces de croissance à l'intérieur des dents.



© Paul Tafforeau et Tanya Smith (ESRF)



© Adobe Stock / jack malipan photography

Restauré en 1831, le **Temple du Bouddha d'émeraude** a été redécoré de délicats motifs composés de très fins miroirs de verre coloré. Les miroirs ressemblent davantage à des gemmes naturelles que les miroirs ordinaires. Malheureusement, cet art raffiné de la décoration par miroirs a disparu pendant près de 150 ans. L'objectif de l'exposition des miroirs de verre au faisceau de lumière synchrotron de l'Institut thaïlandais de recherche était de quantifier leur composition chimique et les métaux à l'état de traces pour permettre de restaurer leur magnificence passée.

Archéologie

L'archéologie est l'étude de l'activité humaine grâce à la récupération et à l'analyse du patrimoine matériel. Elle s'appuie sur les artefacts, l'architecture, les éléments biologiques et les paysages culturels. Les archéologues étudient la préhistoire et l'histoire humaines, de l'élaboration des premiers outils de

pierre à Lomekwi, en Afrique de l'Est, il y a 3,3 millions d'années jusqu'aux décennies récentes. L'archéologie est un domaine distinct de la paléontologie. Elle est particulièrement utile dans la connaissance de sociétés préhistoriques dont il n'existe pas de traces écrites. D'importantes recherches en archéologie sont menées grâce aux sources lumineuses avancées.



Référence : W. Klysubon *et al.*, "Characterization of the Ancient Decorative Mirrors from the Grand Palace Bangkok by SR-Based techniques", Trends of Synchrotron Radiation Applications in Cultural Heritage, Forensics and Materials Science, IAEA TECDOC, No. 1803, p. 86-92, 2016.

Des centres de haute technologie au service de l'industrie

LES STRUCTURES microscopiques et nanoscopiques des matériaux sont directement liées à leurs propriétés à l'échelle macroscopique et à leur optimisation dans les processus modernes de fabrication et de recyclage.

L'un des principaux utilisateurs d'installations équipées de sources lumineuses avancées est l'industrie pharmaceutique, qui souhaite connaître la structure tridimensionnelle des protéines cibles et des complexes de protéines.

L'Herceptine, utilisée dans le traitement du cancer du sein à un stade avancé, a bénéficié d'expérimentations en synchrotron. Grâce à la lumière synchrotron dans l'infrarouge, des recherches de pointe sont en cours pour élaborer de nouvelles thérapies contre le cancer qui puissent être adaptées à chaque patient.



© Mark Thomas / SPL / Cosmos



Crédit photo : Hester Esna du Plessis

Duminsani Kama ajuste un microcristal devant être irradié par une puissante impulsion de laser de courte durée. Il travaille dans la « trappe » de la ligne de faisceau ID09 de l'ESRF et porte des lunettes de protection spéciales. Après activation photochimique du catalyseur, le retour à l'équilibre sera étudié par radiocristallographie.



Photo : ESRF

Hester Esna du Plessis est en train de mener une expérience de diffraction des rayons X à haute résolution pour la caractérisation de catalyseurs.

L'impact des sources lumineuses avancées sur la science et la société dans les pays en développement

LE BRÉSIL est un modèle pour la création d'une installation de rayonnement synchrotron dans un pays en développement. Il a conçu sa première source de rayonnement synchrotron, appelée UVX, en 1985, et l'a mise en service en 1997. Initialement, il a été difficile de convaincre les principaux partenaires des avantages d'avoir une telle installation dans son propre pays. Au début, les chercheurs ne soumettaient que peu de propositions, mais leur nombre a grandement et rapidement. Le Brésil est désormais reconnu au plan international pour la qualité de sa recherche, particulièrement en biologie structurale, et construit actuellement une nouvelle source lumineuse, appelée Sirius.

Des expériences similaires en Corée du Sud et à Taïwan ont conduit chacun de ces pays à investir des millions de dollars dans de nouvelles sources lumineuses. Ce sont là des exemples de la façon dont des centres de recherche scientifique d'excellence peuvent améliorer les possibilités qui s'offrent aux scientifiques et aux entreprises privées locaux. Des douzaines de scientifiques qui avaient quitté leur pays en milieu de carrière y sont retournés quand ils ont compris qu'ils pouvaient y mener des recherches de classe internationale grâce à des sources lumineuses avancées.

UVX >



Crédit photo : LNLS/CNPEM

SIRIUS >



Crédit photo : LNLS/CNPEM



SESAME : Le Centre international de rayonnement synchrotron pour les sciences expérimentales et appliquées au Moyen-Orient est une installation équipée d'une source lumineuse avancée située à Allan (Jordanie), près de la capitale, Amman, établie sous les auspices de l'UNESCO et fortement inspirée du CERN. Ce synchrotron de pointe est au service d'un large éventail de disciplines, dont la biologie et la médecine, la science des matériaux, la physique, la chimie et l'archéologie.

Il est entré en service en 2017. Les pays participants sont les suivants : Autorité palestinienne, Chypre, Égypte, Iran, Israël, Jordanie, Pakistan et Turquie.

L'Union européenne soutient activement le **SESAME** au titre de ses programmes-cadres de recherche avec des projets comme CESSAMag* et OPEN SESAME**.



© SESAME

L'AIEA a appuyé le développement du **SESAME** dans le cadre de son programme de coopération technique, en assurant par exemple la formation de personnels et en fournissant des experts pour le projet, ainsi que du matériel d'irradiation.

Le **SESAME** participe à la création de potentialités et à l'instauration de la paix grâce à la science et représente un projet modèle pour d'autres régions. Des scientifiques de divers pays travaillent ensemble pour faire progresser les connaissances humaines.

* Appui CERN-CE pour les aimants du SESAME.

** Appuyé par le programme européen Horizon 2020, le projet OPEN SESAME assure la formation des personnels et le renforcement des possibilités d'utilisation optimale d'une installation moderne équipée d'une source lumineuse pour les chercheurs au Moyen-Orient.



© SESAME

Emplois et carrières dans les installations équipées de sources lumineuses avancées

LA CONCEPTION, la construction, la maintenance, l'exploitation et l'utilisation de ces machines complexes requiert une très vaste gamme de compétences scientifiques, techniques et industrielles. Il existe des possibilités de carrière tant dans ces installations elles-mêmes qu'auprès des nombreux groupes d'utilisateurs scientifiques qui y font des expériences. Ce sont des centres uniques de formation pour

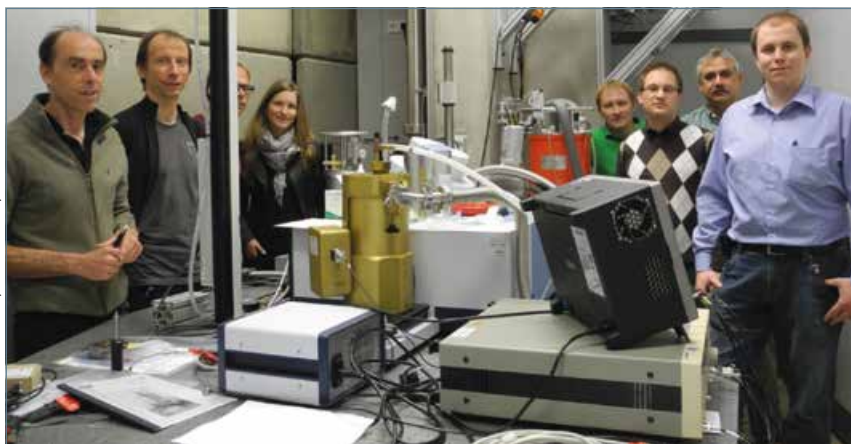
les jeunes techniciens, ingénieurs et scientifiques. S'y rencontrent des chercheurs de différents pays, universités et organismes qui étudient dans des disciplines diverses. Ils y lient des amitiés. Les rencontres, et c'est là l'intérêt de travailler dans une telle installation, se font dans la cafétéria, la bibliothèque, le centre informatique ou lors des présentations de résultats scientifiques.

Angela Lieverse, bioarchéologue à l'université de la Saskatchewan, mène des recherches sur un crâne rare de l'âge du bronze au Centre canadien de rayonnement synchrotron. >

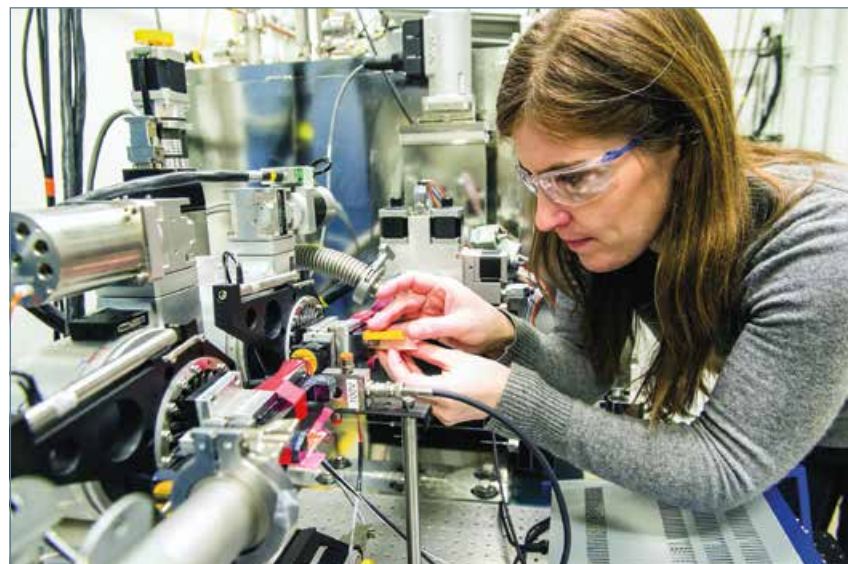


Credit photo : Centre canadien de rayonnement synchrotron

Photo : Centre de rayonnement synchrotron, Dortmund



Installation d'un système térahertz à bande étroite dans le cadre d'un programme d'amélioration de l'accélérateur par une équipe de scientifiques, de techniciens et d'ingénieurs à DELTA, la source lumineuse avancée de Dortmund (Allemagne).

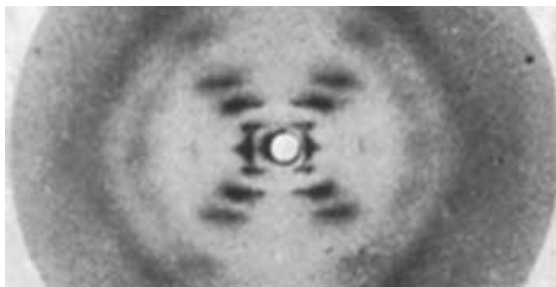


Credit photo : Laboratoire national d'Argonne

Mary Upton (Division du rayonnement X, Source de photons avancée, Laboratoire national d'Argonne) alignant un monochromateur à haute résolution pour préparer une expérience de diffusion X inélastique résonnante.

L'avenir

AU NIVEAU INTERNATIONAL, les chercheurs collaborent pour construire des sources toujours plus intenses afin de répondre aux questions les plus difficiles en sciences du vivant et de la matière condensée. Les rayons X ont permis à Rosalind Franklin de découvrir la structure en double hélice de l'ADN et de révolutionner la biologie. Il a probablement fallu à Franklin des semaines pour découvrir cette structure à l'aide de tubes à rayons X classiques en 1952. Aujourd'hui, on le fait en quelques secondes. Afin de comprendre et de résoudre les problèmes de santé associés aux milliers de protéines, il faut déterminer la structure détaillée de ces protéines. C'est le travail principal des sources lumineuses, qui servent à étudier les virus. Les problèmes et préoccupations touchant la biomédecine, l'environnement et le patrimoine humain sont d'ordre local, raison pour laquelle on a besoin de tant de sources lumineuses. Bien qu'il en existe plus de 50 et qu'il y ait des centaines de lignes de faisceaux, le nombre des utilisateurs ayant besoin de ces sources pour leurs recherches fondamentales, appliquées et industrielles, a augmenté plus rapidement. Il faut souvent attendre des mois ou des années pour y avoir accès, raison pour laquelle davantage de sources lumineuses sont nécessaires, notamment dans les pays en développement.



< Structure de l'ADN en diffraction X par Rosalind Franklin en 1952.

Ces nouvelles initiatives devront relever des défis. Mais elles partagent avec le SESAME les objectifs de renforcement des capacités régionales et de promotion de la compréhension, de l'amitié et de la paix, rassemblant des scientifiques de divers pays et appartenances ethniques pour produire une science de classe mondiale.

Sekazi K. MTINGWA
et Herman WINICK,
« SESAME and beyond »,
Editorial, *Science Magazine*, May 20, 2017



Laboratoire MAX IV, synchrotron suédois inauguré en 2016.



La source de photons de haute énergie qui sera construite en Chine.

Crédit photo : Roger Erikson

Remerciements au professeur Qing Qin et au docteur Zhe Duan

Sources lumineuses avancées et cristallographie

Outils de découverte et d'innovation



Publié par **LAAAMP** (Lightsources for **A**frica, **A**sia, the **A**mericas and **M**iddle East **P**roject),
an International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP) and International Union of Crystallography (IUCr) project
funded by the International Science Council (ISC)

Pour en savoir plus sur LAAAMP

<http://laaamp.iucr.org>



SOUTIENS SUPPLÉMENTAIRES



L'IAEA est le centre mondial de coopération
dans le domaine nucléaire et cherche
à promouvoir l'utilisation sûre,
sécurisée et pacifique
de la technologie
nucléaire.



OPEN SESAME est appuyé
par le programme de recherche
et d'innovation H2020
de l'Union européenne au titre
de l'accord de subvention
n° 730943.

Éditeur : Ernest Malamud, Fermilab et université du Nevada, Reno

L'éditeur remercie les nombreuses personnes qui ont contribué à la production de cette brochure, dont la liste figure à l'adresse <http://laaamp.iucr.org/tasks/brochure>

Maquette : Atelier Christian Millet, Paris

Premier tirage : décembre 2017. Deuxième tirage : juillet 2018.

Révision : mars 2019.

