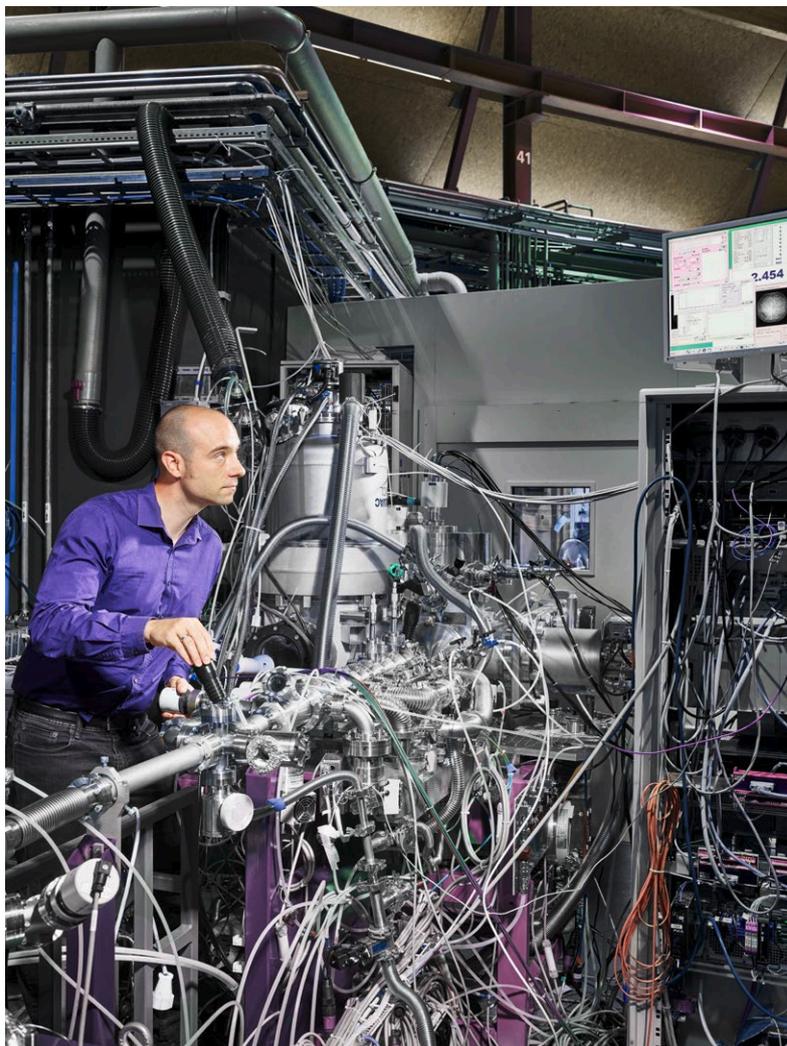


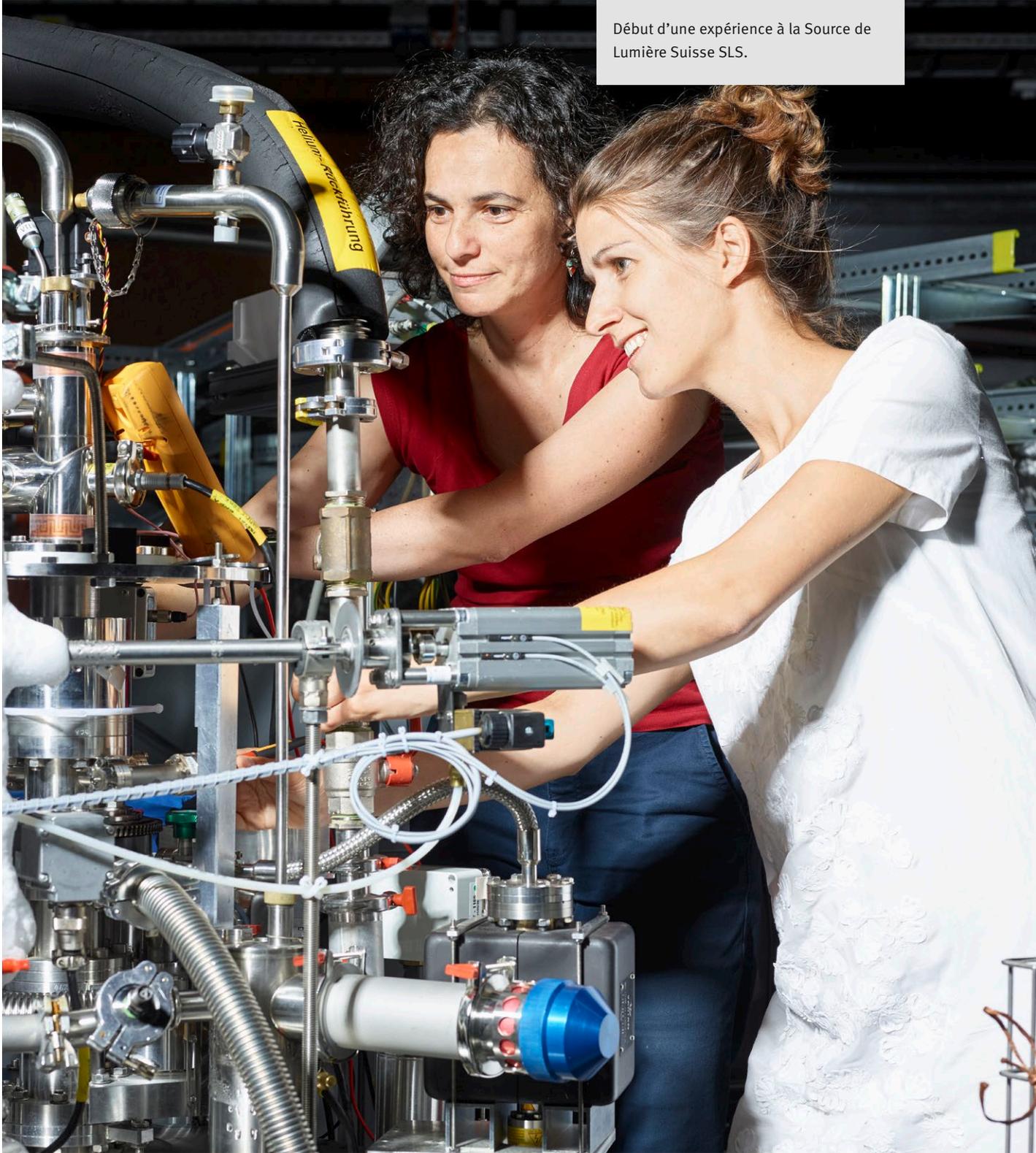
PAUL SCHERRER INSTITUT



# La science avec la lumière

Recherches à l'Institut Paul Scherrer

Début d'une expérience à la Source de Lumière Suisse SLS.



# Table des matières

- 4 La science avec la lumière en 90 secondes
- 6 Les structures de la vie
  - 6 Des signaux de réparation
  - 7 La cécité nocturne
  - 7 Un prix Nobel
- 8 L'homme et la santé
  - 8 Science du cerveau
  - 8 Des dents impeccables
- 10 Science des matériaux et ingénierie
  - 10 Fibres de carbone
  - 10 Sécurité incendies
  - 11 Des puces de silicium inégalées
- 12 Manipuler le magnétisme
  - 12 Stocker des données sur un seul atome
  - 13 Inverser des aimants avec la lumière
  - 13 Des hexagones magnétiques
- 14 Matériaux quantiques
  - 14 Observer les orbitons
  - 15 Les secrets des supraconducteurs
- 16 Energie et environnement
  - 16 Du gaz naturel issu du bois
  - 17 De meilleures batteries
  - 17 Peinture pour bateaux
- 18 Industrie et innovation
  - 18 Investir dans l'innovation
  - 18 Résoudre des problèmes de l'industrie
  - 18 Elaborer de nouvelles technologies
  - 19 Entreprises spin-off
- 20 A l'intérieur de la Source de Lumière Suisse SLS
- 22 Matière et lumière
  - 22 Les atomes sont partout
  - 23 La lumière est partout
  - 23 Expériences avec la lumière
- 24 La lumière extraordinaire de la Source de Lumière Suisse SLS
  - 25 Des électrons ultrarapides
  - 25 Electrons et lumière
  - 25 De plus en plus brillants
- 26 SwissFEL, le laser à rayons X à électrons libres suisse du PSI
  - 26 Qu'est-ce qu'un laser à rayons X à électrons libres?
  - 26 Aux frontières de la science
  - 26 Une collaboration à l'échelle mondiale
  - 27 La technologie diamant
- 28 C'est grâce à nous
- 31 Le PSI en bref
  - 31 Impressum
  - 31 Contacts

## Photo de couverture

A la Source de Lumière Suisse SLS, des chercheurs sondent les matériaux avec des faisceaux extrêmement brillants de rayons X et de lumière ultraviolette pour étudier des structures un million de fois plus petites qu'un grain de sable. Ils peuvent discerner comment les atomes et les molécules sont connectés et observer en temps réel comment ces connexions évoluent.

# La science avec la lumière en 90 secondes

La Source de Lumière Suisse SLS de l'Institut Paul Scherrer PSI est un «supermicroscope» capable de révéler des détails un million fois plus petits qu'un grain de sable.

La SLS produit des faisceaux ultrafins de rayons X et de lumière ultraviolette d'une extrême brillance. Utilisés pour comprendre comment l'aspect extérieur d'objets et leur comportement sont liés à ce qui se trouve à l'intérieur, ces faisceaux peuvent révéler comment les atomes et les molécules qui les composent sont connectés et ce qu'ils font.

En médecine, les rayons X sont utilisés depuis plus d'un siècle pour voir l'intérieur du corps. Les médecins et les dentistes s'en servent couramment pour repérer les fractures, prendre des images de tumeurs et vérifier l'état de la dentition.

Mais pour conduire des recherches à la pointe des sciences et des techniques, un appareil de radiologie médicale n'est pas assez puissant. Il faut une machine beaucoup plus avancée. Telle est la raison de la construction de la Source de Lumière Suisse SLS.

Les faisceaux de rayons X produits par la SLS sont un milliard de fois plus brillants que ceux d'un appareil de radiologie médicale. Dotés d'autres qualités uniques, ils rendent possibles des milliers de mesures très précises et très détaillées en quelques secondes seulement.

En 2016, une nouvelle source de rayons X a été mise en service à l'Institut Paul Scherrer PSI: le SwissFEL, un laser à rayons X à électrons libres, complémentaire de la SLS, grâce auquel l'étude de processus extrêmement rapides deviendra de la routine.

Le PSI est le plus grand institut de recherche suisse en sciences naturelles et sciences de l'ingénierie. Chaque année,

plus de 2500 scientifiques y viennent de Suisse et du monde entier, pour faire des expériences sur ses grandes installations de recherche scientifique de classe mondiale.

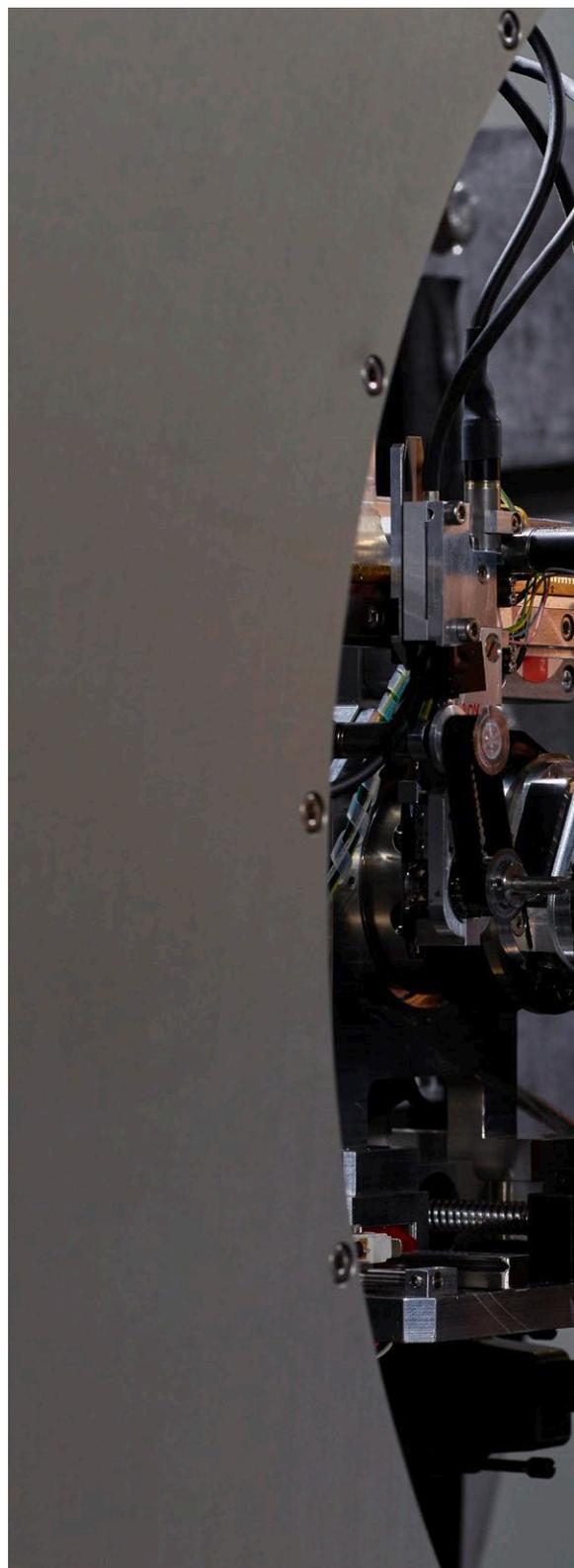
L'institut héberge également deux autres grandes installations de recherche: la Source de Neutrons de Spallation Suisse SINQ et la Source de Muons Suisse  $\mu$ S.

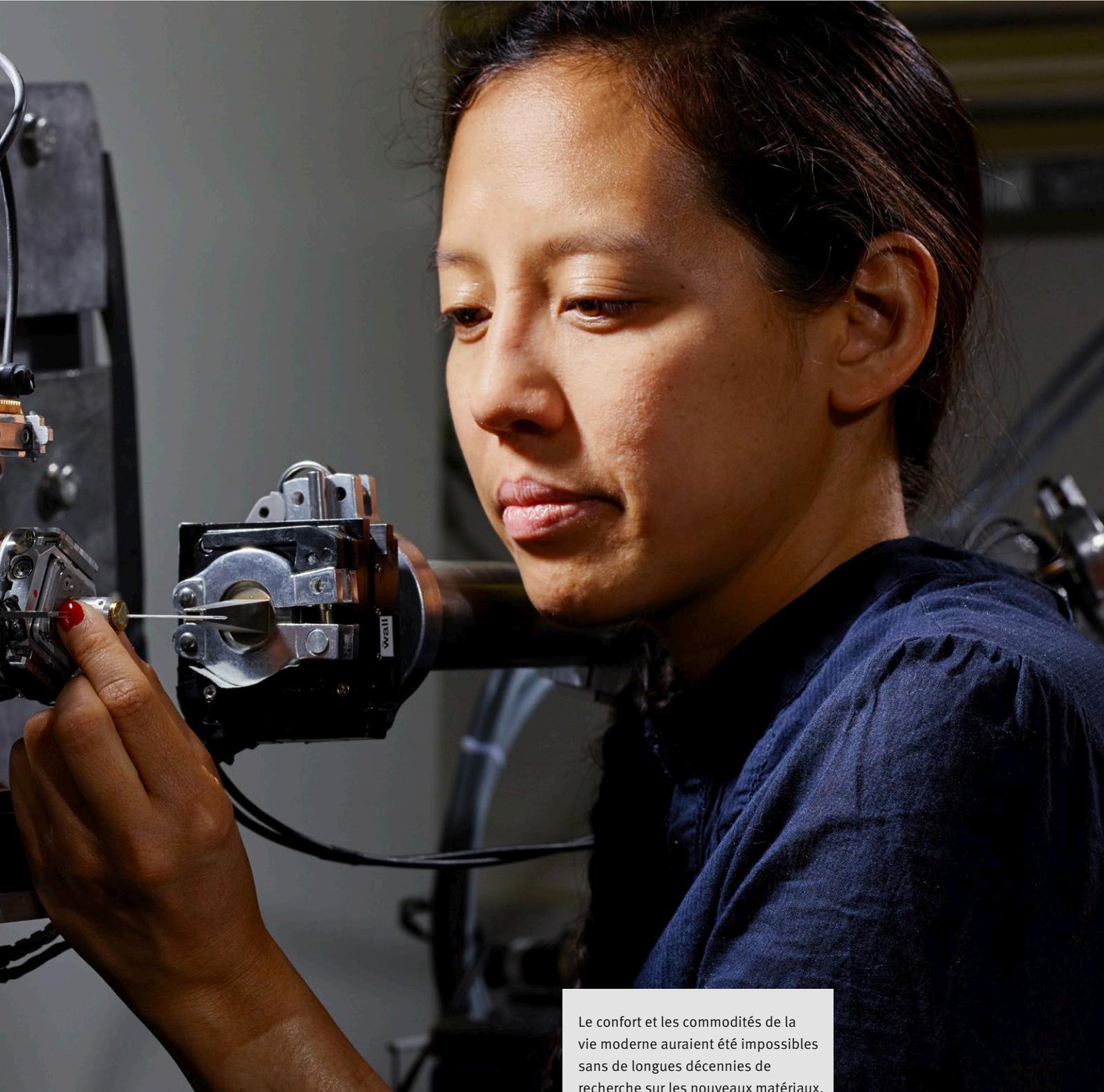
## Innovation et découverte

Les expériences conduites à la Source de Lumière Suisse SLS sont essentielles pour l'avancement de la science et la résolution de problèmes de l'industrie. Elles aident à trouver des réponses aux problèmes qui se posent aujourd'hui dans les domaines de la médecine, de la fourniture d'énergie, de l'environnement et des matériaux pour les nouvelles technologies.

Les impulsions laser ultrabrèves de rayons X du SwissFEL permettront d'effectuer des expériences d'un type entièrement nouveau – en biologie, en chimie, en physique et en science des matériaux. Exploités en synergie, la SLS et le SwissFEL garantiront à la science et à l'ingénierie suisses de rester à la pointe de l'innovation et de la découverte pendant de longues années.

Pour en savoir plus sur les recherches conduites au PSI avec ses faisceaux ultrabrillants de rayons X et de lumière ultraviolette, veuillez lire les pages qui suivent.





Le confort et les commodités de la vie moderne auraient été impossibles sans de longues décennies de recherche sur les nouveaux matériaux.

# Les structures de la vie

La médecine moderne a découvert que la vie repose sur une incroyable variété d'activités moléculaires – fabriquant des cellules, détruisant des infections, réparant des dommages. Cependant, malgré d'énormes progrès, il y a encore beaucoup à apprendre pour combattre la maladie.

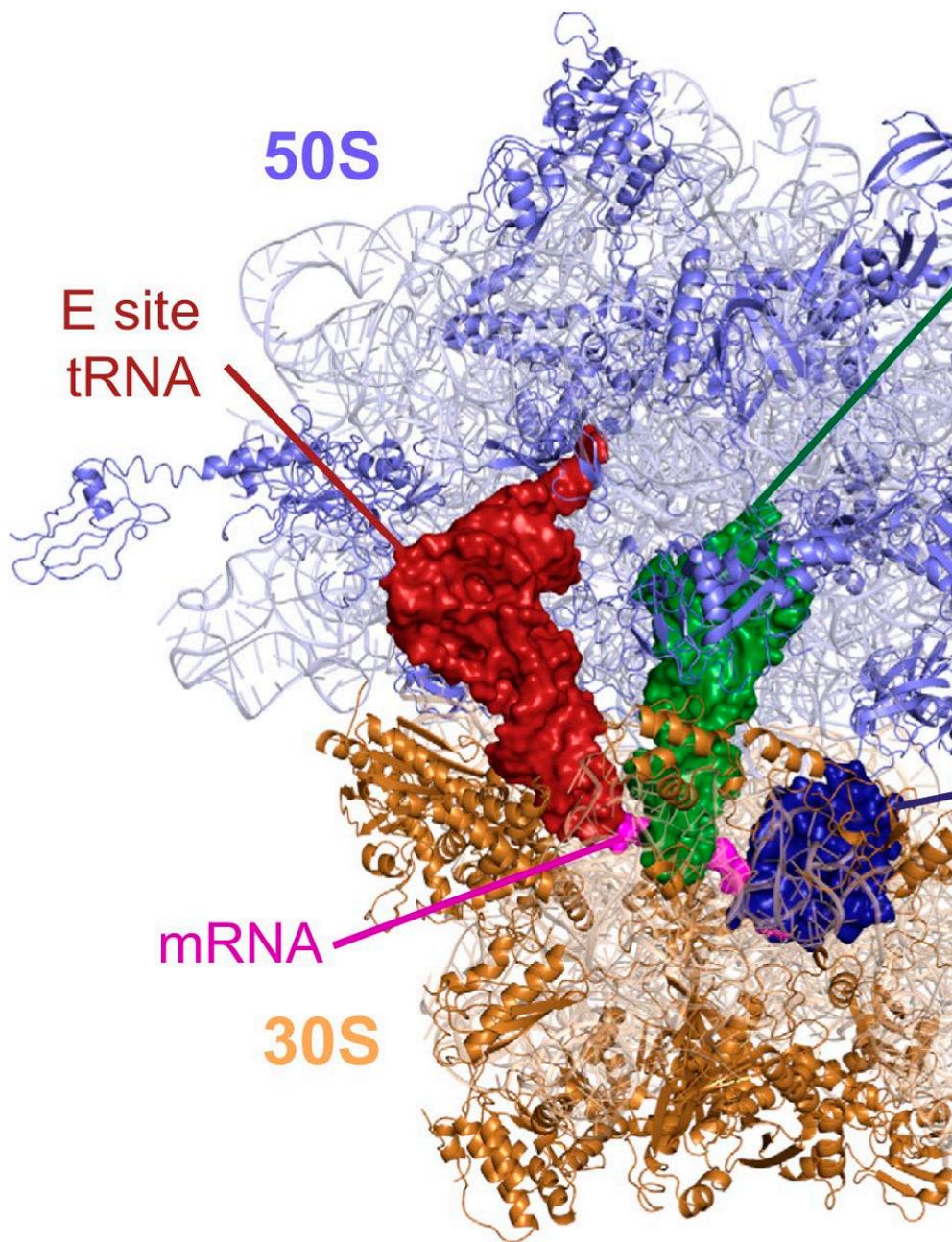
## Des signaux de réparation

Des études par rayons X, conduites à la Source de Lumière Suisse SLS, rendent possibles des médicaments conçus pour réparer les vaisseaux sanguins défaillants ou pour limiter la croissance de tumeurs.

Une coupure au doigt endommage les vaisseaux sanguins et réduit l'alimentation en oxygène des tissus avoisinants. Les cellules entourant la coupure appellent alors à l'aide en libérant une molécule de signalisation appelée facteur de croissance, qui diffuse dans le tissu depuis la coupure. Quand d'autres cellules reçoivent ce signal, elles se mettent à fabriquer de nouvelles cellules ainsi que des vaisseaux pour réparer le dommage. Il existe de nombreux types de facteur de croissance, chacun d'eux très spécialisé dans la croissance de cellules d'un genre particulier – par exemple, de la peau, des nerfs, des vaisseaux sanguins ou bien encore des vaisseaux lymphatiques.

Pour activer une cellule cible et déclencher la fabrication de nouvelles cellules, chaque facteur de croissance moléculaire doit être aligné sur un récepteur moléculaire spécifique présent à la surface de la cellule cible. Ceci requiert un positionnement et une orientation corrects des structures moléculaires du facteur de croissance et du récepteur, ceux-ci étant constitués de milliers d'atomes.

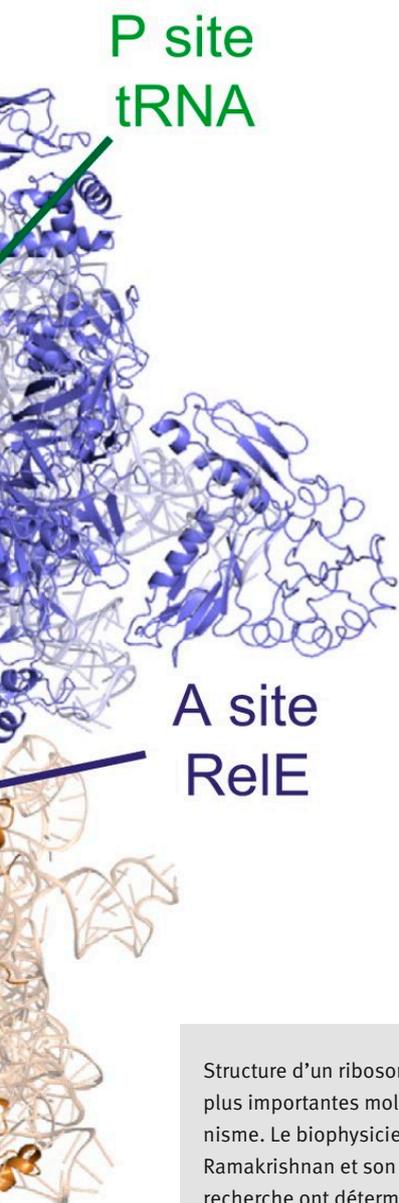
La cartographie et l'analyse de ces structures moléculaires sont incroyablement complexes. Elles ne peuvent être réalisées qu'avec les instruments à rayons X



de pointe disponibles à la Source de Lumière Suisse SLS.

Des expériences récentes ont permis de déterminer la structure exacte d'un facteur de croissance et d'un récepteur responsables de la croissance et de la réparation de vaisseaux sanguins et de vaisseaux lymphatiques.

Grâce à ces nouvelles connaissances, on peut élaborer une nouvelle génération de médicaments permettant de limiter la croissance de tumeurs dans le corps, en bloquant l'activité de facteurs de croissance spécifiques impliqués dans la fabrication de vaisseaux afin de supprimer l'irrigation sanguine.



Structure d'un ribosome, une des plus importantes molécules de l'organisme. Le biophysicien Venkatraman Ramakrishnan et son groupe de recherche ont déterminé la position de plusieurs centaines de milliers d'atomes de cette gigantesque molécule. Les expériences conduites à cette fin ont été effectuées entre autres à la Source de Lumière Suisse SLS. Ces travaux ont valu à Ramakrishnan – corécepteur avec deux autres chercheurs – le prix Nobel de chimie de 2009.

## La cécité nocturne

La vision nocturne repose sur une molécule photosensible présente dans la rétine, appelée rhodopsine. Des recherches conduites à l'Institut Paul Scherrer PSI visent à comprendre comment des défauts génétiques affectent la rhodopsine et sont ainsi la cause de pathologies telles que la cécité nocturne congénitale.

La rhodopsine est une molécule protéique extrêmement sensible à la lumière, utilisée dans la vision nocturne. Elle appartient à une grande famille de protéines appelées récepteurs couplés aux protéines G.

La fonction de ces molécules, présentes dans la paroi membraneuse de la cellule, est de détecter les modifications qui se produisent à l'extérieur de celle-ci et de transférer le signal vers l'intérieur. Quand la lumière frappe la rhodopsine, sa forme change, ce qui déclenche une cascade de signaux qui parviennent au cerveau. Grâce à la Source de Lumière Suisse SLS, des chercheurs du PSI ont été capables de prendre des images de la rhodopsine dans son état photoactivé celui-ci possédant une durée de vie extrêmement brève. Ils disposent ainsi d'une image précise de la première étape du processus de la vision.

Ces expériences ont permis de montrer que la cécité nocturne est directement liée à un défaut structurel de la rhodopsine, ayant pour effet qu'elle se trouve activée en permanence, même lorsqu'elle ne reçoit pas de lumière. Le système visuel est désensibilisé, car il s'efforce d'ignorer la sensation de perception d'une faible lumière constante.

Comprendre la cause moléculaire d'une affection ouvre la voie à des médecines ciblées de façon plus précise. Même si cette démarche ne permet pas de soigner la cécité nocturne, elle peut empêcher

l'évolution de la pathologie liée, la rétinite pigmentaire, vers une grave perte de vision diurne.

## Un prix Nobel

Venkatraman Ramakrishnan, du Laboratoire MRC de Biologie Moléculaire de Cambridge, Royaume-Uni, est l'un des récipiendaires du prix Nobel de chimie de 2009. Cette distinction a récompensé ses travaux sur la détermination de la structure du ribosome, une des plus grandes et des plus importantes molécules de la cellule. Certaines des données utilisées à cette fin ont été collectées par les instruments à rayons X de pointe disponibles à la Source de Lumière Suisse SLS.

Les ribosomes sont des structures complexes présentes en de multiples exemplaires dans chaque cellule. Ils traduisent l'information génétique en des dizaines de milliers de protéines différentes qui commandent l'activité des organismes vivants.

Pour résoudre leur structure, il a fallu déterminer la position de chacun des centaines de milliers d'atomes qui les constituent. C'est une des cartes de résolution structurale les plus complexes jamais établies.

Ces expériences ont été cruciales pour comprendre comment les ribosomes fonctionnent, ainsi que la différence entre les ribosomes bactériens et les ribosomes humains.

A noter aussi, une application pratique. Beaucoup d'antibiotiques modernes agissent en bloquant l'activité de ribosomes bactériens sans affecter les ribosomes humains. Ainsi, des infections sont soignées en tuant ou en inhibant des bactéries de façon sélective.

# L'homme et la santé

**De nouvelles techniques d'imagerie mises au point à la Source de Lumière Suisse SLS révèlent des détails extraordinaires et aident les scientifiques à comprendre des pathologies très diverses.**

## Science du cerveau

**Des dommages à la myéline, la gaine protectrice des fibres du système nerveux, peuvent conduire à des pathologies telles que la sclérose en plaques. Une nouvelle méthode d'imagerie mise au point à la Source de Lumière Suisse SLS permet de prendre des images de la gaine de myéline de neurones du tissu cérébral animal avec des détails extrêmement fins.**

Le système nerveux comprend des millions de neurones (cellules nerveuses) hautement spécialisés dans le transport de messages d'une partie du corps vers une autre. Chaque neurone est formé d'un corps et de fibres nerveuses dont la longueur peut varier de quelques millimètres à plus d'un mètre. Le nerf sciatique, la plus longue fibre nerveuse du corps humain, connecte la base de la moelle épinière au gros orteil.

La plupart des neurones ont une gaine de myéline, un bon isolant qui permet aux signaux électriques de se propager le long des fibres nerveuses à des vitesses atteignant 400 km/heure. Chez les personnes atteintes de sclérose en plaque, la gaine de myéline est endommagée; les messages issus du cerveau sont mal transmis, voire pas du tout. Il se produit une sorte de court-circuit, comme avec un fil électrique dont l'isolant est endommagé. On ignore la cause de la sclérose en plaques. Généralement, l'affection est bénigne,

mais certaines personnes perdent la capacité d'écrire, de parler ou de marcher.

Une nouvelle technique d'imagerie tridimensionnelle mise en œuvre à la Source de Lumière Suisse SLS permet d'étudier le rôle de la myéline dans des cerveaux de rat à l'échelle moléculaire. Les images tridimensionnelles sont prises de façon non invasive, sans inciser le cerveau – un avantage considérable par rapport aux méthodes d'observation classiques.

Pour créer l'image tridimensionnelle, le cerveau du rat est lentement tourné. Des images par rayons X sont prises à de petits intervalles. Les 800 000 images obtenues sont combinées par un logiciel spécialement conçu, destiné à donner une vue d'ensemble de la concentration et de l'épaisseur de la myéline dans les différentes parties du cerveau.

Les résultats montrent que la plus forte concentration de myéline s'observe au niveau du faisceau de fibres nerveuses qui connectent les hémisphères droit et gauche du cerveau. Cette nouvelle méthode d'imagerie rend possible l'étude de la façon dont la myéline se modifie selon le type d'affection.

## Des dents impeccables

**L'abus de sucreries et un brossage insuffisant peuvent entraîner la formation de douloureuses cavités dentaires – nécessitant l'intervention du dentiste pour la pose de plombages. Des études par rayons X de la structure moléculaire de dents saines et de dents atteintes, suggèrent que de nouveaux types de produits de remplissage pourraient être élaborés, beaucoup plus durables que les traitements actuels.**

L'émail dentaire est la substance la plus dure du corps humain. Nos dents sont protégées par une couche extérieure d'émail très résistante recouvrant une couche de dentine un peu moins dure. A la différence d'autres tissus durs du corps tels que l'os, l'émail ne peut pas se réparer de lui-même après un dommage. Nos dents ont besoin de l'aide d'un dentiste pour se refaire une santé.

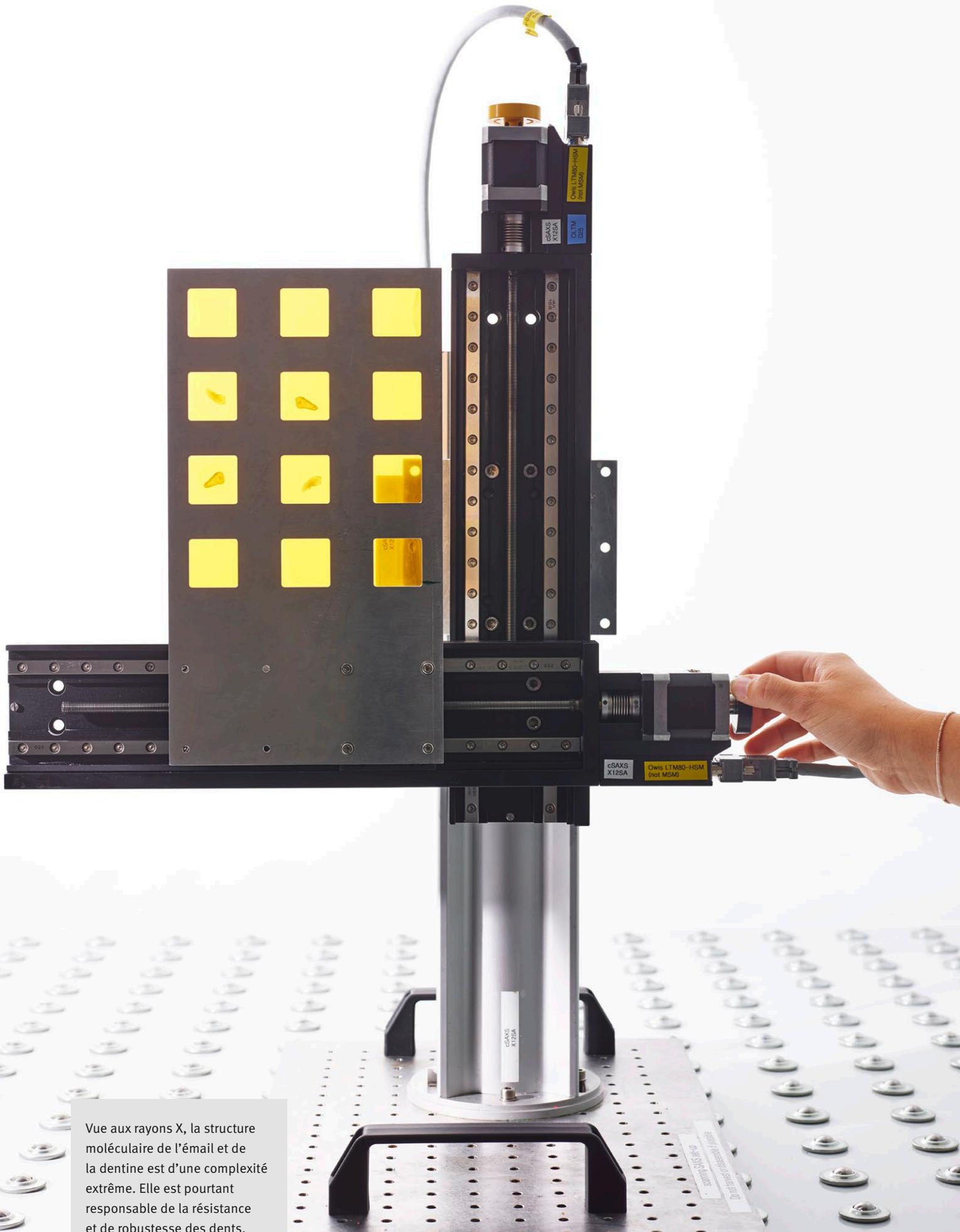
Les dentistes utilisent quotidiennement les rayons X pour déceler les problèmes dentaires cachés, mais cette technique permet seulement d'observer des détails d'une taille supérieure à un centième de millimètre.

Une étude de dents saines et de dents cariées, utilisant les puissants rayons X de la Source de Lumière Suisse SLS, a permis de relever des détails dix mille fois plus petits.

Vue à une aussi petite échelle, la structure moléculaire de l'émail et de la dentine est d'une complexité extrême. Elle est pourtant responsable de la résistance et de robustesse des dents.

Cette étude a permis de cartographier la disposition des fibres de collagène très fines de la dentine et d'étudier la zone de jonction émail-dentine. Il a été constaté que la structure fine de beaucoup de dents différentes est extrêmement similaire et, ce qui est surprenant, qu'elle n'est pas affectée dans les dents cariées.

Actuellement, les dentistes réparent les dents avec des matériaux qui ne tiennent pas compte de leur structure moléculaire. Les résultats de cette étude suggèrent que des traitements plus durables pourraient être mis au point, en utilisant des produits de remplissage mieux adaptés à la structure naturelle des dents.



Vue aux rayons X, la structure moléculaire de l'émail et de la dentine est d'une complexité extrême. Elle est pourtant responsable de la résistance et de robustesse des dents.

# Science des matériaux et ingénierie

**La technologie peut faire de grandes avancées en termes de forme et de fonction, en utilisant des nouveaux matériaux. Ceux-ci peuvent être testés rapidement avec les faisceaux très brillants de rayons X et de lumière ultraviolette de la Source de Lumière Suisse SLS.**

## Fibres de carbone

**Très rigides, les fibres de carbone sont utilisées pour renforcer d'autres matériaux et les rendre plus robustes. Mais leur fabrication est chère. Les ingénieurs recherchent donc comment en réduire le coût.**

Les matériaux composites en fibres de carbone sont très résistants et légers. Ils sont idéaux pour l'ingénierie à hautes performances en aéronautique, pour des mâts de voilier ou encore les membres artificiels.

Ces fibres de carbone sont le plus souvent produites à partir d'un matériau précurseur riche en carbone, appelé polyacrylonitrile. De longues fibres de ce précurseur sont chauffées à très haute température dans une enceinte exempte d'oxygène afin qu'elles ne brûlent pas. A l'issue de ce processus, appelé carbonisation, on obtient une fibre composée de longues chaînes d'atomes de carbone, étroitement imbriquées, où il ne reste que quelques atomes qui ne sont pas du carbone.

La production des fibres de carbone est chère, c'est pourquoi les ingénieurs d'Honda R&D Europe (Deutschland) recherchent de nouvelles façons de les fabriquer, en visant de meilleures performances à un coût moindre. Ils explorent actuellement l'utilisation d'un nouveau matériau précurseur présent dans le bois: la lignine.

Travaillant avec des scientifiques du PSI, les ingénieurs de Honda ont utilisé des techniques avancées de tomographie à

rayons X pour dresser des cartes tridimensionnelles très détaillées de la structure internes de fibres de carbone produites à partir de la lignine et les comparer à des fibres standard du commerce.

La structure interne de la fibre du commerce est très simple – un cœur dense enveloppé d'une couche extérieure moins dense. La fibre produite à partir de la lignine a une structure en éponge avec des pores 1000 fois plus petits qu'un grain de sable.

Grâce à cette représentation unique des fibres de carbone, les ingénieurs ont une meilleure compréhension des relations entre leur structure et leurs performances.

## Sécurité incendies

**Lors de l'incendie d'un immeuble, les poutres de charpente en bois se fendent sous l'effet de la chaleur intense dégagée, même lorsqu'elles sont loin des flammes. L'imagerie par rayons X à haute vitesse peut montrer comment la structure interne du bois affecte sa résistance mécanique.**

Au printemps et au début de l'été, la croissance des arbres est plus rapide, produisant un anneau de croissance de bois clair. A l'automne, un anneau plus foncé et plus dense se forme. Transversalement à ces anneaux, des lignes de «cellules de rayon» vont du centre de l'arbre jusqu'à l'écorce. Elles servent à emmagasiner de l'eau.

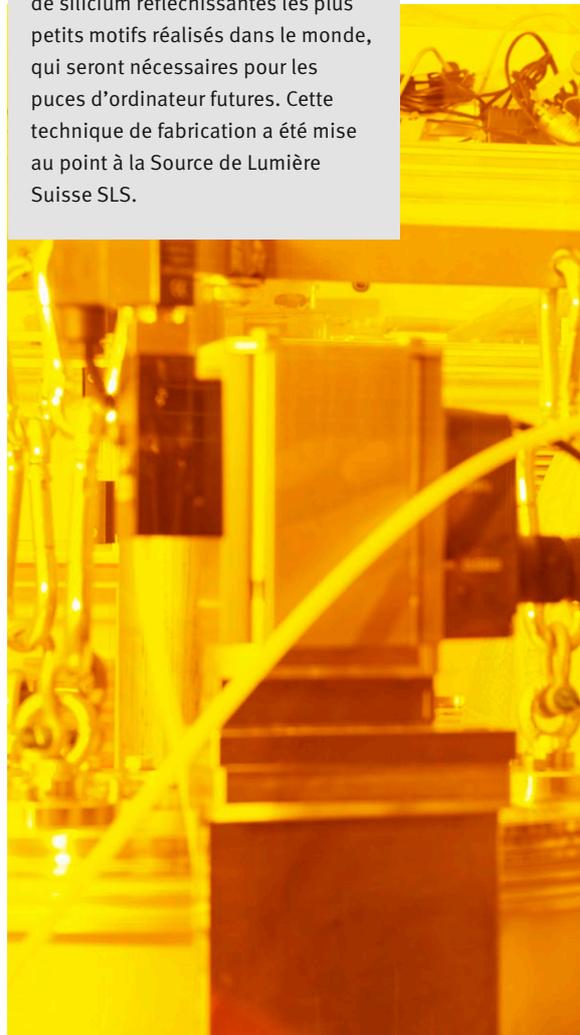
A la Source de Lumière Suisse SLS, le bois peut être chauffé rapidement à une température de plusieurs centaines de degrés dans un four spécial à chauffage laser. En même temps, la structure cellulaire et les modèles de fissuration sont mesurés par microtomographie par rayons X.

Dans le hêtre, un bois dur et durable largement utilisé comme matériau de construction en Europe, il a été constaté par exemple que les fissures commencent surtout le long des cellules de rayon et à

la jonction des couches de croissance saisonnières.

La recherche en ingénierie de sécurité incendie des structures combine des données provenant de différentes sources pour parvenir à une meilleure compréhension du comportement des matériaux et des structures aux températures concernées. Les résultats peuvent servir à concevoir les règles de sécurité et à les améliorer.

Les scientifiques du PSI sont capables de créer sur des plaquettes de silicium réfléchissantes les plus petits motifs réalisés dans le monde, qui seront nécessaires pour les puces d'ordinateur futures. Cette technique de fabrication a été mise au point à la Source de Lumière Suisse SLS.



## Des puces de silicium inégalées

**Le rayonnement ultraviolet extrême de la Source de Lumière Suisse SLS est utilisé par l'industrie des semiconducteurs pour mettre au point de nouvelles techniques de fabrication. Le PSI détient le record mondial du plus petit motif jamais réalisé sur une puce de silicium.**

La lithographie – la technologie d'impression de microcircuits sur des puces de silicium – a rendu possible la messagerie électronique, les téléphones mobiles, la vidéo en continu, ainsi que des voitures, des trains et des avions plus sûrs. L'élément de base de tous les circuits réalisés sur des puces de silicium est le transistor – un interrupteur précis, qui

peut être ouvert et fermé des millions de fois par seconde. Une puce de silicium moyenne contient plusieurs millions de transistors par millimètre carré.

Pour fabriquer des puces de silicium, on dépose à leur surface une couche de masquage photosensible. Le tout est ensuite exposé à la lumière pour réaliser des motifs dessinés selon la finesse des détails des circuits.

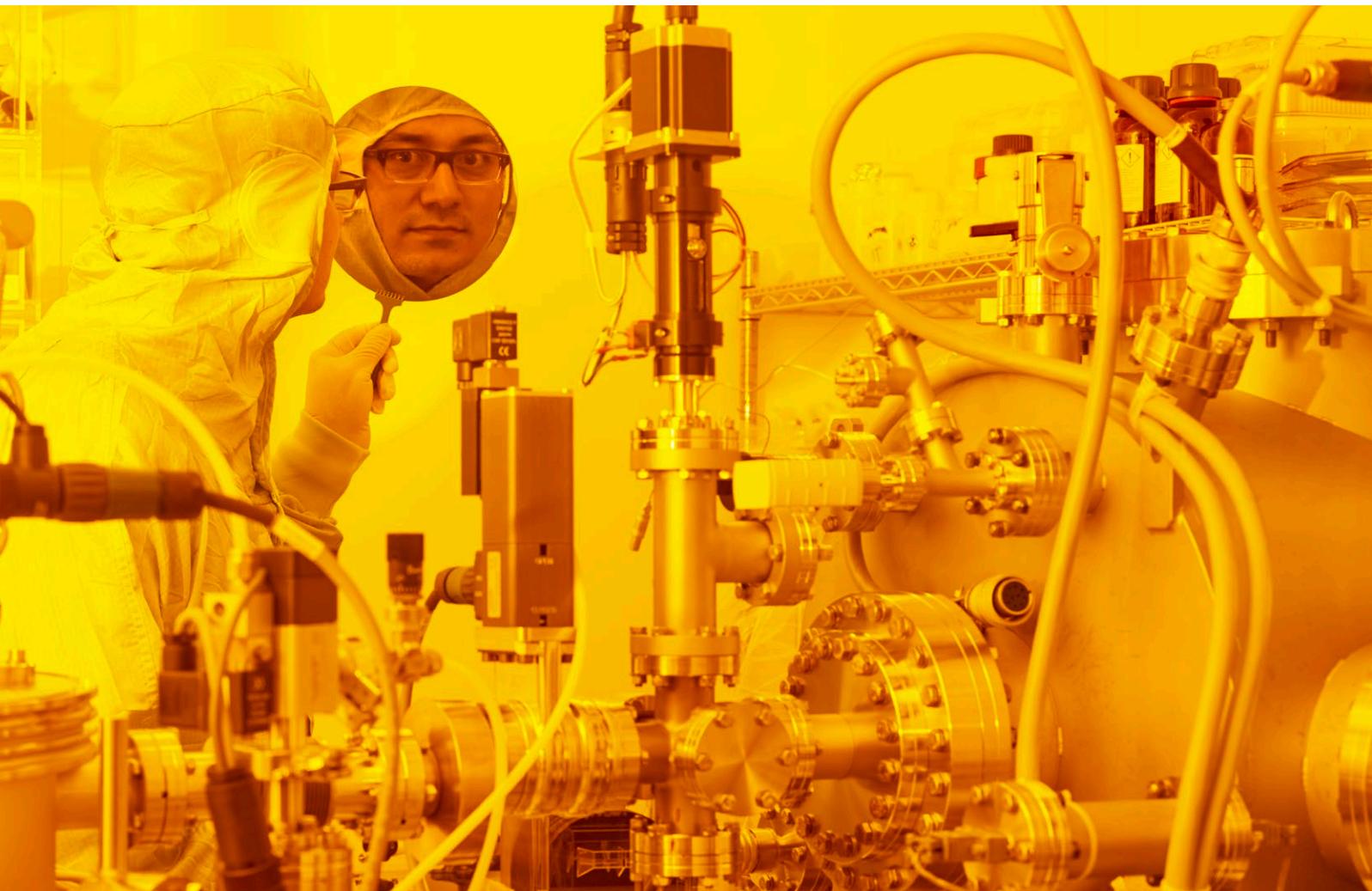
L'artiste peintre utilise un pinceau plus fin pour rendre les petits détails. En lithographie, les très petits détails sont dessinés avec de la lumière de longueur d'onde plus courte.

Les appareils commerciaux de lithographie sont passés de l'emploi d'une lumière ultraviolette d'une longueur d'onde de 365 nanomètres à celle de l'ultraviolet

profond d'une longueur d'onde de 193 nanomètres. La prochaine étape sera l'ultraviolet extrême d'une longueur d'onde de 13,5 nanomètres.

A la Source de Lumière Suisse SLS, des scientifiques du PSI ont réalisé les plus petites structures du monde – des rangées de conducteurs espacés de seulement 14 nanomètres. A titre de comparaison, un cheveu a un diamètre de 50 000 nanomètres et pousse à la vitesse de 5 nanomètres par seconde.

En lithographie, le PSI a cinq à dix années d'avance sur les méthodes standard de l'industrie. Ses capacités sont largement utilisées par des entreprises et des universités, pour tester les méthodes de fabrication pour la production des prochaines générations de puces de silicium.



# Manipuler le magnétisme

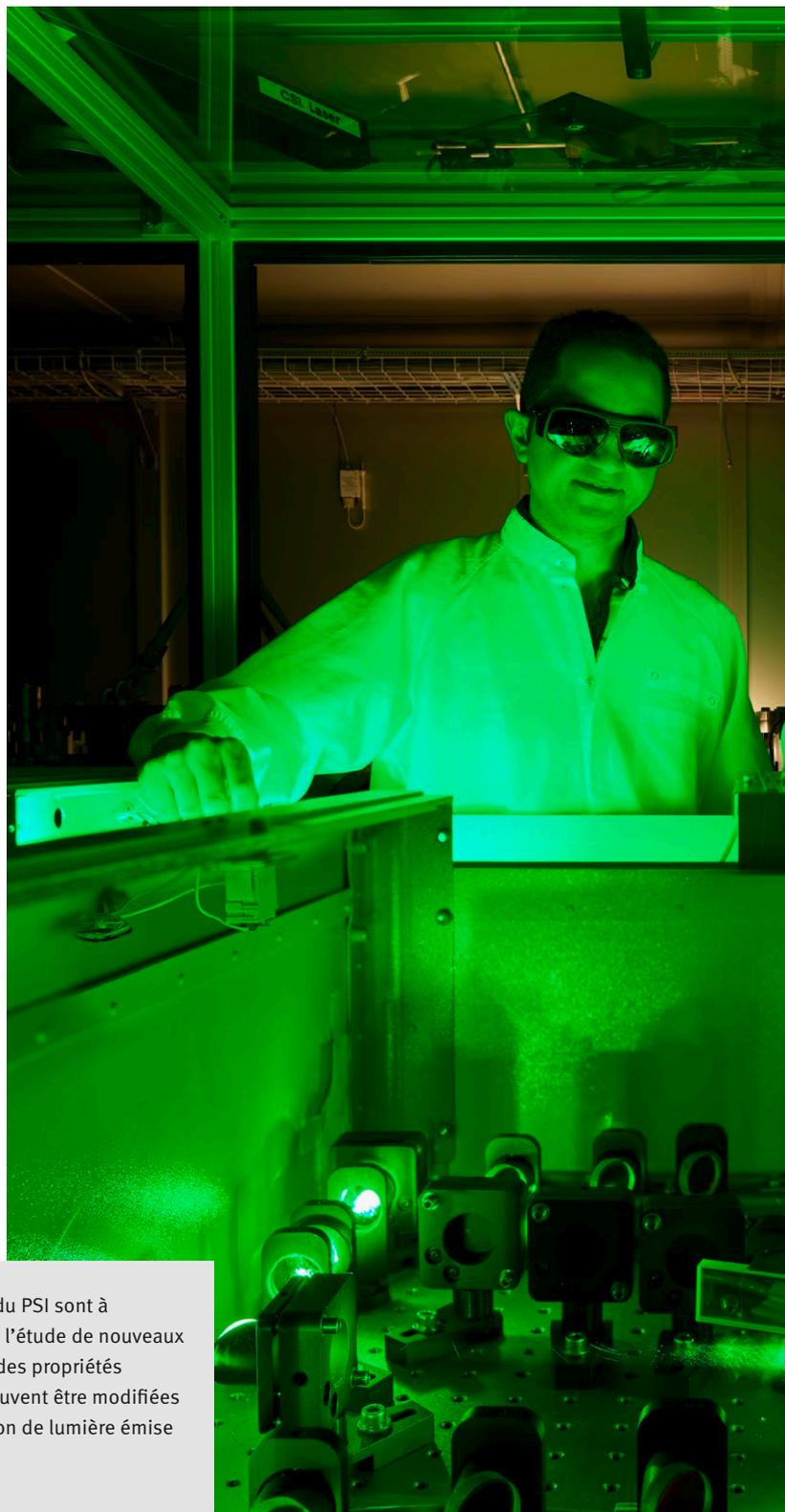
La capacité à manipuler les propriétés magnétiques à très petite échelle est centrale pour les technologies informatiques modernes. Elle permet de stocker musique, photos et vidéos, en enregistrant leurs informations à l'aide de motifs aimantés, à l'échelle des atomes. La technologie future exige la mise au point de nouvelles façons de stocker l'information et d'accéder rapidement à des montagnes de données, elles-mêmes en croissance rapide.

## Stocker des données sur un seul atome

Des chercheurs d'universités suisses travaillant avec IBM aux États-Unis, ont créé en laboratoire des atomes uniques, dans un état qui pourrait, à l'avenir, servir à stocker des données sous la forme d'aimants monoatomiques stables.

Les mémoires aléatoires magnéto-résistives (MRAM) mémorisent l'information de façon permanente sans qu'il soit nécessaire de rafraîchir constamment les données. Les MRAM sont utilisées dans les systèmes de pilotage des avions et des satellites, car ils ne sont pas affectés par le rayonnement cosmique.

Une réduction de la taille des composants MRAM permet de stocker plus de données, mais la structure atomique de la matière impose une limite inférieure ultime. L'atome est la plus petite structure de stockage de données envisageable. L'équipe suisse-américaine a montré, par des expériences au PSI, que des monoatomes de cobalt placés sur une surface ultramince d'oxyde de magnésium peuvent être mis dans un état de haute énergie – première étape requise vers la création d'un aimant stable à partir d'un monoatome.



Les chercheurs du PSI sont à l'avant-garde de l'étude de nouveaux matériaux dont des propriétés magnétiques peuvent être modifiées par une impulsion de lumière émise par un laser.

## Inverser des aimants avec la lumière

**Les propriétés magnétiques d'une nouvelle classe de matériaux peuvent être modifiées par des impulsions de lumière laser. Bien que la recherche sur ce type de comportement inhabituel soit encore à un stade précoce, on prévoit déjà une large utilisation de ces nouveaux composés en technologie.**

Les chercheurs du PSI sont à la pointe dans l'étude de nouveaux matériaux dont l'aimantation peut être modifiée par des impulsions de lumière laser. Ce nouvel axe de recherche offre la perspective de nombreuses applications potentielles, notamment le stockage ultrarapide de données.

Les ordinateurs archivent leurs données sur des «disques durs», revêtus d'une couche magnétique. Une petite tête d'écriture/lecture «vole» au-dessus du disque en rotation rapide et y enregistre les données codées sous la forme de microscopiques aimants de polarité nord et sud.

Sur un disque dur classique, le temps de basculement d'un pôle nord en un pôle sud est généralement de quelques nanosecondes. Avec les nouveaux matériaux et une impulsion laser, le basculement peut être mille fois plus rapide et se faire en environ une picoseconde (un millionième de millionième de seconde).

Certaines des expériences requises sont extrêmement précises et exigeantes. Elles ne peuvent être réalisées qu'avec une nouvelle génération de grandes installations d'expérimentation: les lasers à rayons X à électrons libres (XFEL). Depuis des années, les scientifiques du PSI se rendent aux États-Unis pour faire des expériences sur l'installation LCLS et au Japon sur l'installation SACLA. Bientôt, le SwissFEL, le laser à rayons X à électrons libres suisse du PSI, ainsi que le XFEL européen de Hambourg leur permettront de conduire aussi ces recherches en Europe.

Ces expériences reposent sur la synchronisation d'une impulsion laser qui modi-

fie l'aimantation du matériau, avec une impulsion ultrabrève de rayons X qui la suit immédiatement pour permettre de prendre un cliché des pôles magnétiques. Inverser l'aimantation avec la lumière, cela fonctionne. Mais que se passe-t-il exactement? Cette question fait débat chez les scientifiques, qui explorent des pistes.

## Des hexagones magnétiques

**Des motifs géométriques précis de petits aimants, de formes et configurations variées, peuvent être créés sur du silicium. Lorsque la taille de ces aimants est inférieure à un micromètre, de nouveaux phénomènes apparaissent. Ces structures pourraient à l'avenir être utilisées dans des dispositifs électroniques pour des applications de mémorisation ou pour effectuer des opérations logiques.**

Un groupe de recherche du PSI a mis au point une méthode permettant de créer des motifs réguliers de petits aimants. Il les étudie au moyen d'un microscope à rayons X construit à la Source de Lumière Suisse SLS.

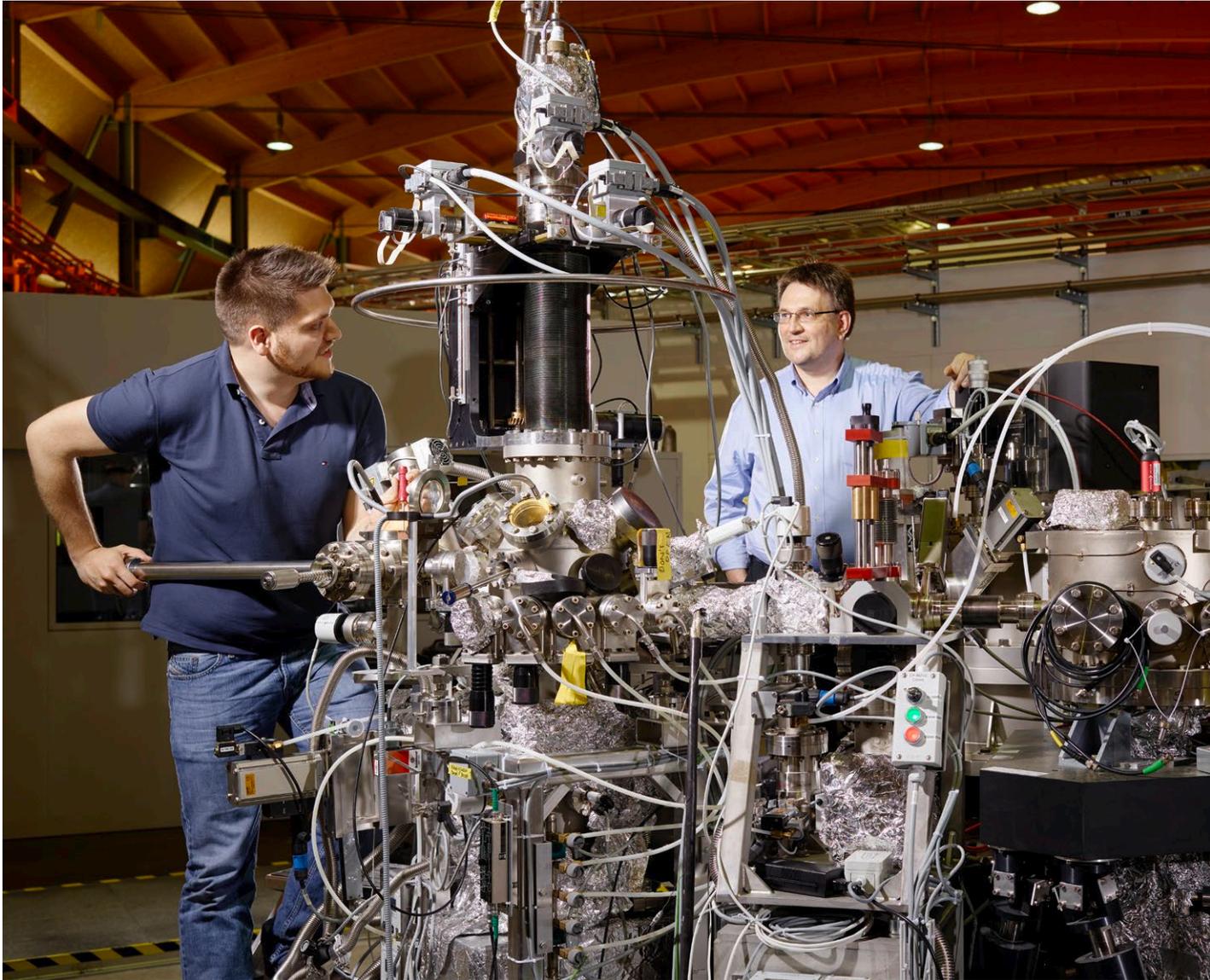
Les petits aimants ont la forme de grains de riz. Lorsque six aimants sont disposés en hexagone, ils s'organisent de manière à ce que les pôles nord et sud d'aimants voisins se touchent, afin de former un anneau stable.

Le microscope à rayons X permet de suivre les modifications de l'arrangement des pôles nord et sud des petits aimants lorsque plusieurs hexagones se réunissent. Lorsque le réseau d'hexagones grandit, le choix de l'orientation des aimants n'est plus évident: l'ensemble du réseau doit se réarranger pour former une nouvelle configuration stable.

Le groupe de recherche du PSI a élaboré des modèles mathématiques précis pour expliquer ce qui est observé – un outil bien maîtrisé qui lui permet de tester rigoureusement les situations observées dans des matériaux réels.



# Matériaux quantiques



La recherche sur les matériaux quantiques explore le comportement complexe et inattendu d'un grand nombre d'électrons, qui se manifeste lorsqu'ils interagissent dans un solide. La maîtrise de ces effets étranges pourrait transformer la prochaine génération de matériaux électroniques.

## Observer les orbitons

Prévu par la théorie il y a plus de 30 ans, un bizarre mouvement synchronisé d'électrons dans un solide a enfin été observé par des physiciens à la Source de Lumière Suisse SLS.

Le mouvement des électrons et des noyaux atomiques au sein de solides est extrêmement complexe. Chacun d'eux est

poussé et tiré par tous les autres électrons et noyaux du solide, qui peut lui-même être en mouvement. Ces interactions intenses et le nombre énorme d'électrons et de protons concernés, rendent la prévision et la compréhension du comportement des solides très difficiles.

Afin de simplifier la description du comportement des solides, les physiciens ont recours à la notion de *quasi-particule*. Ce ne sont pas des objets réels présents au

Le comportement complexe des électrons dans les supraconducteurs peut être étudié en détail grâce aux instruments à rayons X de pointe disponibles à la Source de Lumière Suisse SLS.

sein des solides, mais une façon condensée de décrire comment un grand nombre d'électrons et de protons se déplacent ensemble de façon coordonnée.

On peut alors se représenter les mouvements complexes de tous les électrons d'un solide comme le mouvement beaucoup plus simple de quasi-particules, dont le comportement est plus proche de celui de particules isolées qui s'ignorent entre elles.

L'électron ne peut pas être divisé en composants plus petits – c'est une *particule fondamentale*. Mais dans les années 1980, des physiciens ont prédit par la théorie que les très nombreux électrons se propageant le long d'une chaîne d'atomes pourraient être décrits comme trois quasi-particules: le *holon* portant la charge de l'électron, le *spinon* son aimantation et l'*orbiton* son énergie et son impulsion.

Lors d'une expérience, qui relève de l'exploit technique, des physiciens du PSI ont été capables de mesurer des quasi-particules orbiton et spinon dans un matériau. Un faisceau de rayons X est focalisé sur un groupe d'électrons. L'énergie absorbée par le groupe d'électrons a permis la formation d'un spinon et d'un orbiton, se déplaçant à des vitesses différentes et dans des directions différentes.

Les orbitons pourraient être utilisés dans un ordinateur quantique qui effectuerait des calculs beaucoup plus rapidement que les ordinateurs actuels.

Un des principaux obstacles s'opposant aujourd'hui à la réalisation d'ordinateurs

quantiques, est que les états de mémoire sont normalement détruits avant que les calculs n'aient pu être effectués. Les transitions orbitoniques sont extrêmement rapides; elles ne prennent que quelques femtosecondes (une femtoseconde vaut un millionième de milliardième de seconde). C'est tellement rapide que l'utilisation de spinons et d'orbitons pourrait être une bonne solution pour manipuler l'information dans un ordinateur quantique réaliste.

## Les secrets des supraconducteurs

**La supraconductivité est une des grandes découvertes scientifiques du 20<sup>e</sup> siècle. L'incroyable capacité des supraconducteurs de laisser l'électricité s'écouler librement, sans résistance, à basse température, est de mieux en mieux maîtrisée. Les scientifiques du PSI sont aux premières lignes de l'effort mondial pour expliquer comment ces matériaux fonctionnent effectivement.**

La supraconductivité a été découverte en 1911. Dans un fil supraconducteur, le courant électrique s'écoule librement sans l'échauffer. Il peut ainsi transporter un courant plus de 100 fois plus intense que celui passant par un câble de cuivre de même diamètre.

Les supraconducteurs doivent être refroidis à basse température, à environ 290 degrés en-dessous de la température ambiante, en utilisant de l'azote ou de l'hélium liquide.

Ils sont utilisés dans les scanners d'imagerie par résonance magnétique (IRM) médicale, dans les filtres de réception des stations de base de téléphonie mobile, ainsi que dans certains réseaux de transport d'électricité pour transférer de grandes quantités d'énergie entre des installations voisines. Les matériaux su-

praconducteurs les plus simples sont bien compris, mais on en découvre de plus en plus dont le comportement défie toute explication. Les plus récents peuvent fonctionner à des températures plus élevées – environ 190 degrés en-dessous de la température ambiante. On les appelle *supraconducteurs à haute température*.

Les éléments constitutifs les plus importants d'un supraconducteur à haute température type sont des feuillets formés par un maillage carré d'atomes de cuivre et d'oxygène. Les atomes de cuivre se comportent comme des petits aimants et semblent liés d'une façon ou d'une autre à la température élevée de supraconduction. Ceci est surprenant, car la supraconductivité et les champs magnétiques sont normalement considérés comme rivaux, le champ magnétique étant capable de détruire l'état supraconducteur.

Une équipe de recherche étasunienne a maîtrisé l'art de réaliser des films supraconducteurs extrêmement minces, formés de seulement deux feuillets de cuivre-oxygène.

Au titre d'une collaboration unique en son genre, cette équipe s'est rendue en Suisse pour travailler avec des scientifiques de l'Institut Paul Scherrer PSI et y utiliser les instruments à rayons X extrêmement sensibles et avancés de la Source de Lumière Suisse SLS. Le PSI était le seul endroit au monde où cette collaboration pouvait obtenir les résultats nécessaires.

Les expériences ont montré que dans ces films ultraminces de matériau supraconducteur, le champ magnétique n'a pas disparu et qu'il peut être compris au moyen de descriptions très simples. Les expériences démontrent que le magnétisme joue un rôle très important dans le phénomène de supraconduction à température élevée.

Ce résultat est un pas en avant vers la réalisation du rêve ultime de supraconducteurs à température ambiante.

# Energie et environnement

Faire le meilleur usage des ressources en combustible limitées de la Planète Terre est important pour la société. Au PSI, la science apporte sa contribution à la réduction de l'impact de l'activité humaine sur l'environnement.

Des chercheurs de l'Institut Paul Scherrer PSI travaillent d'arrache-pied pour obtenir les meilleures performances de nouveaux matériaux à mettre en œuvre dans des batteries sodium-ion rechargeables. Avec les rayons X de la Source de Lumière Suisse SLS, ils peuvent voir à l'intérieur de batteries prototype et observer en temps réel à l'échelle atomique ce qui se passe lors de la charge et de la décharge.

## Du gaz naturel issu du bois

Le bois est une source d'énergie polyvalente et renouvelable – exploitable de façon durable dans les forêts suisses. Le PSI a élaboré une technologie qui permet sa conversion efficace en gaz naturel.

En Suisse, le biogaz est obtenu en de nombreux endroits par la fermentation de déchets ménagers, agricoles et issus d'installations d'épuration des eaux usées. Mais le bois, lui, ne fermente pas facilement. Généralement on l'utilise directement comme combustible.

L'Institut Paul Scherrer PSI a mis au point une solution alternative pour traiter le bois. Il est d'abord chauffé à haute température et converti en gaz chauds,



qui sont ensuite recombinaés pour former du gaz naturel synthétique. Ce gaz de bois peut être injecté dans le réseau gazier, d'où une plus grande souplesse quant à son lieu d'utilisation.

Les gaz chauds issus du bois sont un mélange de monoxyde de carbone, de dioxyde de carbone, d'hydrogène et de vapeur. Ils contiennent aussi des sous-produits indésirables, notamment des composés contenant des goudrons et du soufre.

Les composés soufrés doivent être éliminés, car ils corrodent les gazoducs et endommagent les matériaux des équipements de conversion du mélange de gaz chauds en méthane, principal composant du gaz naturel.



Des scientifiques du PSI ont utilisé les résultats d'expériences faites à la Source de Lumière Suisse SLS pour élaborer un matériau utilisable pour éliminer le soufre du flux de gaz chauds.

Ce nouveau matériau, fondé sur l'élément molybdène, a été mis au point en utilisant des faisceaux de rayons X pour étudier en temps réel des réactions chimiques et déterminer les adaptations requises pour obtenir de meilleures performances.

## De meilleures batteries

**Les batteries lithium-ion sont une source courante d'énergie, utilisée par les ordinateurs portables, les tablettes et les téléphones mobiles. Des batteries d'un nouveau type, au sodium-ion, ayant presque les mêmes performances, pourraient être moins chères à fabriquer.**

Un des grands défis auxquels la société moderne est confrontée est le stockage de l'énergie. Les batteries lithium-ion sont largement utilisées dans les appareils électroniques – et de plus en plus dans les voitures électriques et pour stocker les énergies provenant des éoliennes et des panneaux solaires.

En passant du lithium au sodium, on pourrait réaliser un nouveau type de batterie rechargeable. Le sodium a des propriétés chimiques similaires à celles du lithium, mais il est beaucoup plus abondant et il est cinquante fois moins cher.

Tout comme les batteries lithium-ion, les batteries sodium-ion doivent être capables de fournir un potentiel constant, tout en étant chimiquement et structurellement stables lors de la charge et de la décharge.

Au PSI, on étudie le potentiel futur des batteries sodium-ion. Avec des rayons X, il est possible de voir à l'intérieur de batteries prototype lors de la charge et de la décharge, et d'y observer ce qui se passe à l'échelle atomique.

A la Source de Lumière Suisse SLS, on est capable de faire très rapidement des mesures par rayons X et d'obtenir ainsi

beaucoup de détails utiles sur la structure des différents matériaux utilisés dans les batteries. Plusieurs dizaines de batteries prototype peuvent être testées en même temps.

L'objectif à long terme est de réaliser des batteries sodium-ion pouvant être utilisées aussi facilement que les batteries lithium-ion. Les chercheurs du PSI travaillent d'arrache-pied pour obtenir les meilleures performances de cette nouvelle technologie.

## Peinture pour bateaux

**Les bateaux et les structures marines sont revêtus de peintures marines spéciales, les protégeant de la corrosion par l'eau de mer. Des images tridimensionnelles par rayons X de la structure microscopique de ces peintures montrent comment cette bonne protection est réalisée.**

Les navires de haute-mer sont peints avec un revêtement de résine époxy mélangée avec des paillettes d'aluminium ou de verre. Les paillettes se chevauchent, comme les tuiles d'un toit, forçant l'eau à prendre un chemin plus long avant d'atteindre l'acier en-dessous.

Un partenariat entre le Centre de nanotechnologie de Londres, l'University College London, le PSI et AkzoNobel, travaille sur l'optimisation de la couche de peinture des bateaux et des structures marines. Les images par rayons X montrent les formes et l'arrangement des paillettes individuelles du revêtement, à l'échelle du nanomètre.

Les essais de résistance à l'eau de mer du métal peint peuvent prendre des années. Des simulations informatiques utilisant les informations obtenues au moyen des rayons X permettent de mieux prévoir les performances des nouvelles peintures, ce qui raccourcit le délai d'étude et de mise au point des produits.

# Industrie et innovation

**Le PSI encourage activement l'industrie à utiliser ses recherches.**

## Investir dans l'innovation

**Un accès à des installations de pointe de lumière synchrotron est essentiel pour les entreprises du secteur des sciences de la vie, pour être capables d'élaborer de nouveaux médicaments permettant de traiter des pathologies telles que la maladie d'Alzheimer, l'arthrite et le cancer.**

Les protéines sont des petites machines moléculaires, qui accomplissent toutes les tâches nécessaires pour maintenir les cellules en vie. Leur activité peut être modifiée par des traitements et des médicaments – dans de nombreux cas ciblés sur une protéine très spécifique. La détermination de la structure atomique de protéines et de médicaments, par des mesures utilisant la lumière synchrotron, peut montrer comment ils interagissent à l'échelle moléculaire et indiquer comment modifier ces médicaments pour changer la façon dont ils opèrent.

A la Source de Lumière Suisse SLS, deux postes d'expérimentation utilisés pour la détermination de structures de protéines et de médicaments sont financés par l'industrie – l'un entièrement, par les entreprises pharmaceutiques suisses **Novartis** et **Hoffmann La Roche** et la Société Max-Planck (Allemagne); l'autre partiellement, au titre d'un partenariat entre l'Institut Paul Scherrer PSI, **Novartis**, **Actelion**, **Boehringer Ingelheim**, **Proteros** et le japonais **Mitsubishi Chemical**.

## Résoudre des problèmes de l'industrie

**Des usagers industriels visitent fréquemment la Source de Lumière Suisse SLS. Des entreprises unissent souvent leurs connaissances et leurs compétences à celles d'équipes universitaires de recherche et de scientifiques spécialisés travaillant au PSI.**

Les exemples qui suivent ne sont que quelques-uns des nombreux cas d'utilisation par l'industrie des instruments de pointe de la Source de Lumière Suisse SLS – pour résoudre des problèmes immédiats, pour affiner des procédures à utiliser ultérieurement lors de la mise au point et de la fabrication de produits ou pour parvenir à une pleine compréhension de nouveaux matériaux.

Un partenariat entre le Centre de nanotechnologie de Londres, l'University College London, le PSI et **AkzoNobel** travaille sur l'optimisation des revêtements de peinture des bateaux et des structures marines.

**Honda R&D Europe (Deutschland)** travaille sur l'amélioration des performances et la réduction du coût de fabrication de fibres de carbone prototype. Les techniques classiques d'extraction du pétrole, laissent inexploités entre 50 et 70% des réserves de gisement. **Shell Global Solutions International B.V.** travaille avec le PSI et l'université de Mayence (Allemagne) à la mise au point de méthodes sûres pour extraire le pétrole et le gaz piégés à l'intérieur des petits pores des roches sédimentaires.

La sensation en bouche est d'une importance cruciale pour la fabrication des produits alimentaires commerciaux. La société alimentaire suisse **Nestlé** utilise la Source de Lumière Suisse SLS pour comprendre comment la texture de la crème glacée change avec la température.

**IBM** recherche, avec plusieurs universités suisses, à la Source de Lumière Suisse SLS, comment miniaturiser les mémoires magnétiques des ordinateurs au-delà des limites actuelles.

**Intel** et **ASML** travaillent avec des chercheurs du PSI sur l'évaluation de techniques avancées de lithographie utilisant l'ultraviolet extrême, qui pourraient être utilisées pour fabriquer les puces en silicium de la prochaine génération.

## Elaborer de nouvelles technologies

**Une nouvelle méthode prometteuse de diagnostic des tumeurs du sein repose sur une technique avancée d'imagerie conçue à la Source de Lumière Suisse SLS. Cette méthode est à l'essai à l'hôpital cantonal de Baden, avec le partenaire industriel Philips.**

La mammographie est une technique médicale utilisée pour diagnostiquer et localiser les tumeurs du sein. Le praticien qui examine une image radiologique d'un sein peut déterminer si une tumeur est présente ou risque de se former.

Il est parfois très difficile de voir la différence entre le tissu sain et le tissu affecté. Une technique pour laquelle le PSI a fait œuvre de pionnier en science des matériaux à la Source de Lumière Suisse SLS, peut permettre de prendre des images radiologiques nettement meilleures des tissus mammaires.

Une image radiologique classique exploite la différence d'absorption des rayons X lorsqu'ils traversent des types différents de tissu. La nouvelle technique enregistre aussi les changements de direction de ces rayons – une information supplémentaire qui améliore considérablement l'image radiologique, en offrant la perspective d'un diagnostic précoce des tumeurs du sein.



La technologie mise en œuvre dans les détecteurs de rayons X DECTRIS a été conçue au PSI. Elle a transformé la recherche utilisant les sources de lumière synchrotron ainsi que les méthodes de mesure des rayons X à usage médical.

## Entreprises spin-off

**Quatre entreprises dont l'activité repose sur l'utilisation de la lumière synchrotron ont été créées à partir de technologies et de procédés mis au point au PSI.**

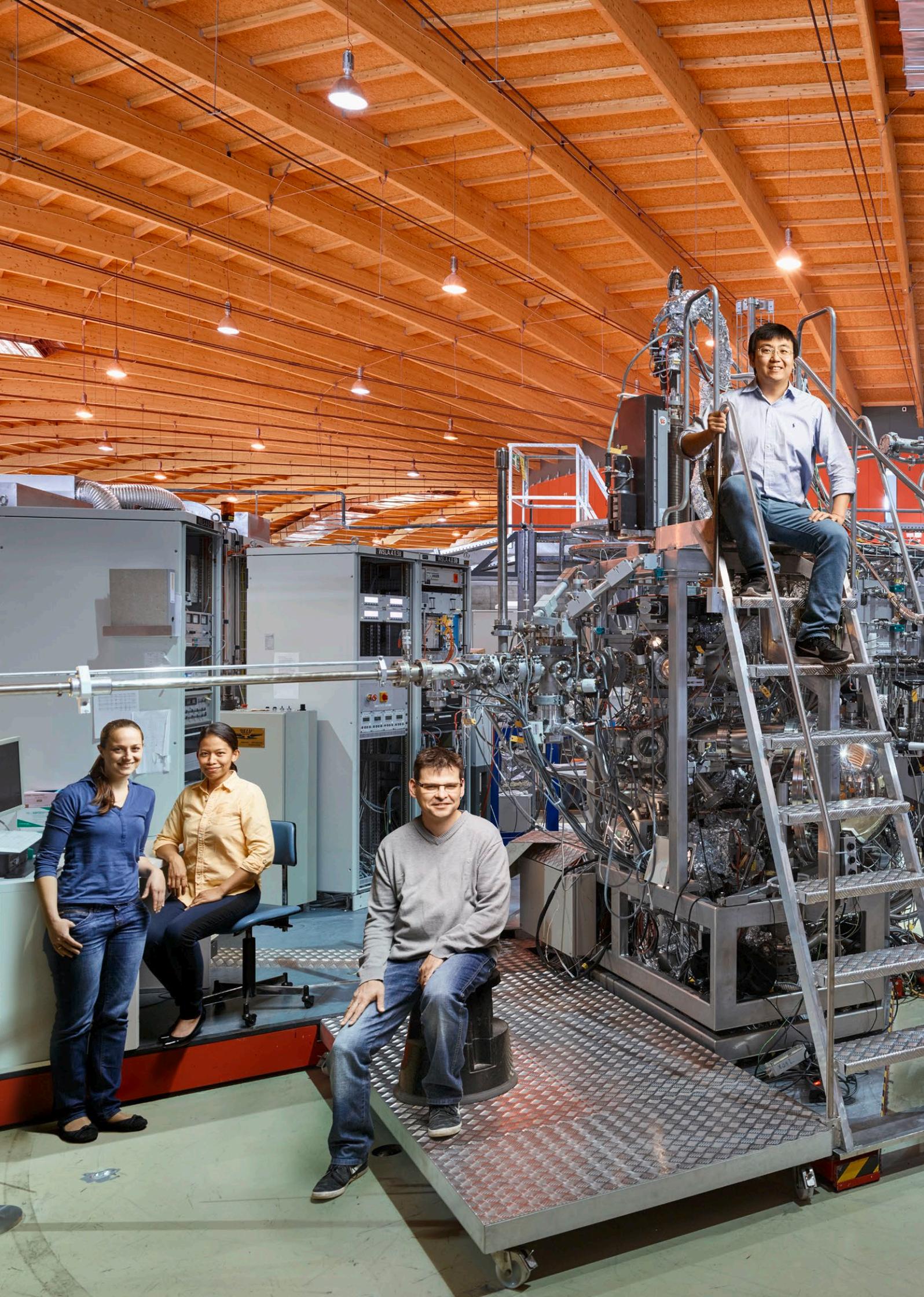
**DECTRIS** est le leader mondial de la production de détecteurs hybrides de rayons X à comptage de photons. Ses détecteurs ont transformé la recherche utilisant les sources de lumière synchrotron ainsi que les applications industrielles et médicales des rayons X. La technologie mise en œuvre dans son

produit phare, le détecteur Pilatus, a été élaborée au PSI par les fondateurs de cette entreprise. Elle lui a permis d'acquérir une brillante position sur le marché international. DECTRIS emploie maintenant plus de 70 personnes.

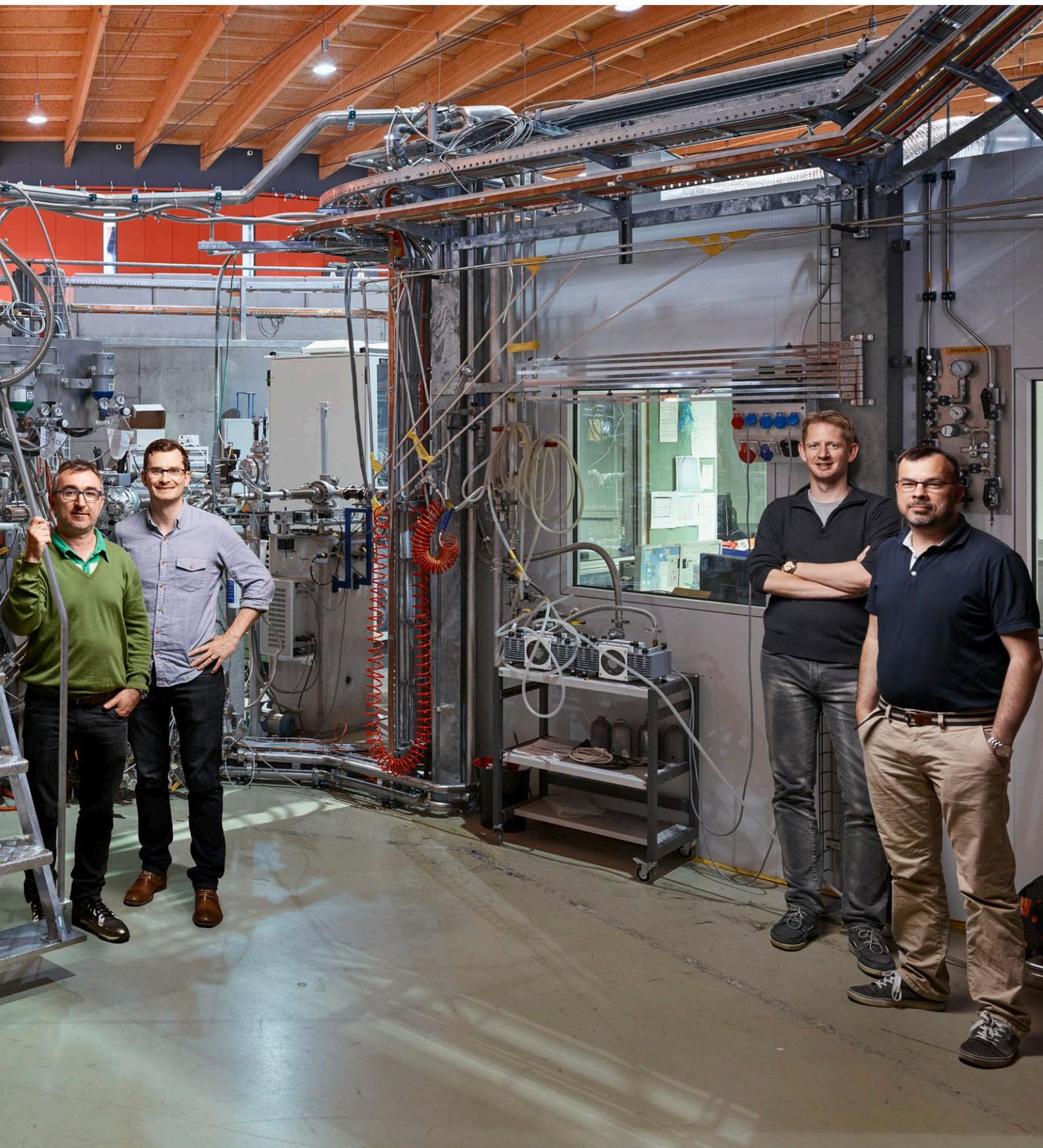
Les fondateurs d'**Eulitha** ont mis au point de nouvelles techniques de lithographie utilisant l'ultraviolet extrême produit à la Source de Lumière Suisse SLS. Eulitha fournit, sous la marque PHABLE, des services et des équipements de création de motifs d'échelle nanométrique («nanopatterning») pour des applications, notamment en photonique, optoélectro-

nique, affichage et biotechnologie. Ses produits sont utilisés à l'échelle industrielle en recherche, développement et fabrication.

**Expose** et **Excelsus** collectent et analysent des données à la Source de Lumière Suisse SLS, pour les entreprises pharmaceutiques et de biotechnologie.



# A l'intérieur de la Source de Lumière Suisse SLS



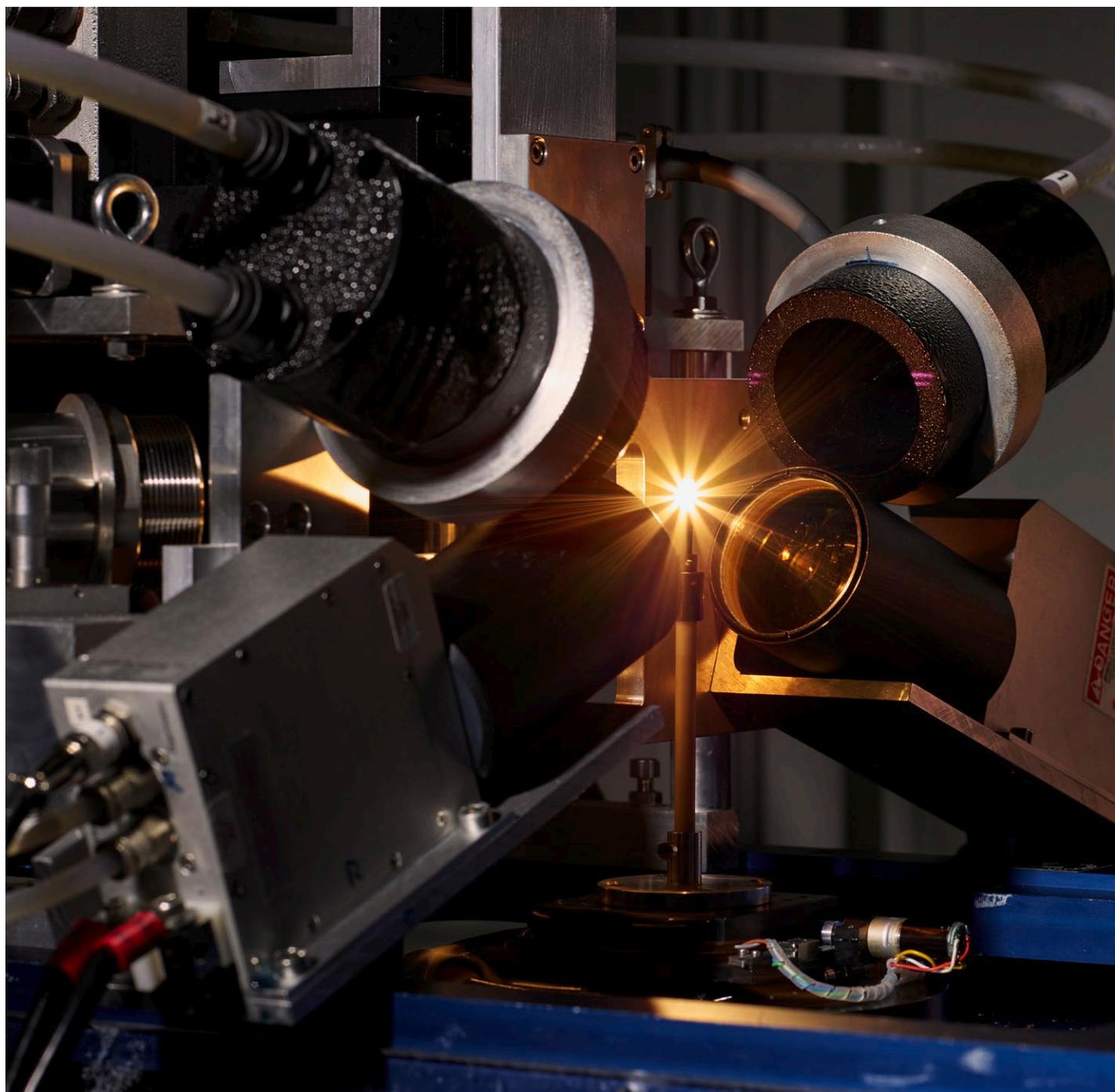
# Matière et lumière

Tout est fait d'atomes et ils sont minuscules. Des dizaines de milliers peuvent tenir sur le diamètre d'un cheveu. Au PSI, des chercheurs utilisent des faisceaux ultrafins et d'une brillance extrême de rayons X pour déterminer la position des atomes et observer ce qu'ils font.

## Les atomes sont partout

Les atomes sont les éléments constitutifs du monde naturel. Au centre de l'atome, des protons et des neutrons sont étroitement liés dans un noyau. Un nuage d'électrons électriquement chargés entoure le noyau. Les atomes sont

connectés en d'innombrables façons pour former les substances et les matériaux de l'univers.



## La lumière est partout

La lumière visible est une étroite tranche d'un spectre beaucoup plus large, allant des ondes radioélectriques aux rayons gamma. La lumière transporte de l'énergie qui peut être absorbée par les atomes constituant la matière.

Les ondes radioélectriques et les hyperfréquences (ou micro-ondes) sont la lumière de la plus basse énergie; la lumière d'énergie moyenne comprend la lumière visible et la lumière ultraviolette; la lumière de haute énergie est constituée de rayons X; les rayons gamma ont une énergie encore plus élevée.

Les micro-ondes sont utilisées pour chauffer les aliments; la lumière visible, lorsqu'elle frappe la rétine de l'œil, est transformée en un signal électrique envoyé au cerveau; la lumière ultraviolette du soleil provoque la combinaison de la mélanine avec l'oxygène, noircissant la peau pour produire le bronzage; les rayons X, enfin, permettent au médecin de voir à l'intérieur du corps humain.



## Expériences avec la lumière

A la Source de Lumière Suisse SLS, des faisceaux de rayons X et de lumière ultraviolette sont projetés sur des matériaux et des objets pour comprendre leurs propriétés à l'échelle atomique. Lorsqu'un objet est placé dans un faisceau de rayons X, cette lumière le traverse; elle y est diffusée par les atomes qui se trouvent à l'intérieur.

La lumière diffusée est reçue par des détecteurs (jouant rôle d'appareils photographiques) placés autour de l'objet. Les signaux détectés permettent de déterminer les positions et les mouvements des atomes de l'objet. Des séquences rapides de clichés peuvent être combinées en films tridimensionnels montrant l'action atomique.

A la Source de Lumière Suisse SLS, les expériences peuvent être conduites simultanément sur jusqu'à seize postes d'expérimentation.

Chaque poste est spécialisé dans un type différent d'expérience avec la lumière.

Lorsqu'il sera pleinement opérationnel, le SwissFEL aura six postes d'expérimentation.

A la Source de Lumière Suisse SLS, des faisceaux de rayons X et de lumière ultraviolette sont projetés sur des matériaux et des objets pour comprendre leurs propriétés à l'échelle atomique.

# La lumière extraordinaire de la Source de Lumière Suisse SLS



La lumière synchrotron de la SLS est produite dans l'anneau de stockage construit à l'intérieur d'un tunnel circulaire en béton. Les électrons y circulent à une vitesse proche de celle de la lumière, parcourant un million de cercles complets par seconde. Une équipe d'opérateurs spécialisés veille au parfait fonctionnement de l'accélérateur vingt-quatre heures sur vingt-quatre.



Pour créer l'extraordinaire lumière nécessaire pour des expériences scientifiques d'avant-garde, des chercheurs et des ingénieurs se sont réunis pour construire une énorme machine d'une grande précision technique: la Source de Lumière Suisse SLS, installée à l'intérieur d'un étonnant bâtiment circulaire situé sur le campus de l'Institut Paul Scherrer PSI, sur la rive ouest de l'Aare.

Sous un magnifique toit voûté en bois, les équipements complexes et perfectionnés de la Source de Lumière Suisse SLS sont fascinants. De prime abord, le labyrinthe de tuyaux, de câbles et de laboratoires peut sembler déroutant, mais après quelques pas dans le bâtiment, il devient plus facile de voir comment tout est connecté.

### Des électrons ultrarapides

A la SLS, la «lumière synchrotron» est émise par un faisceau d'électrons qui ont été accélérés à une vitesse extrêmement élevée par une succession d'accélérateurs de particules. Les électrons se meuvent dans un anneau de stockage de 288 mètres de circonférence – un tube où règne un vide très poussé, logé dans un tunnel en béton. Disposés le long de ce tube, plusieurs centaines d'aimants maintiennent les électrons sur sa ligne centrale, sur une trajectoire constamment incurvée.

Ce faisceau est aussi fin qu'une soie d'araignée et les électrons peuvent tourner pendant des heures. De temps en temps, certains se heurtent et en sont éjectés. Pour compenser cette perte, de nouveaux électrons sont régulièrement ajoutés afin de maintenir constante la brillance des faisceaux de lumière.

La Source de Lumière Suisse SLS fonctionne en permanence, nuit et jour, plus

de 220 jours par an. Après un arrêt, il suffit de quelques minutes pour remplir l'anneau de stockage de tous les électrons nécessaires.

### Electrons et lumière

Lorsque des électrons ultrarapides sont forcés de changer de direction, ils émettent de la lumière. A la SLS, des appareils appelés onduleurs balancent les électrons d'un côté à l'autre. Lors de ce slalom, ils émettent un faisceau de lumière de haute qualité, utilisé dans des expériences.

Pendant que les électrons continuent de décrire leur trajectoire incurvée dans l'anneau de stockage, le faisceau de lumière émis file en ligne droite vers les postes d'expérimentation. Des miroirs spéciaux guident et focalisent la lumière sur les matériaux étudiés, la concentrant en un faisceau ultrafin de lumière ultraviolette ou de rayons X d'une extrême brillance.

### De plus en plus brillants

Une amélioration des techniques de pompage du vide pourrait permettre à la Source de Lumière Suisse SLS de produire des faisceaux de lumière encore plus brillants. Cette importante amélioration, qui pourrait être mise en service en 2021, prolongerait la durée de vie de la source de lumière de 20 ans et ouvrirait de nouveaux domaines de recherche scientifique.

# SwissFEL: le laser à rayons X à électrons libres du PSI

**Le laser à rayons X à électrons libres SwissFEL est la plus récente parmi les grandes installations de recherche du PSI. Sa lumière de type rayons X, unique en son genre, ouvre la voie à des expériences importantes dans les domaines de l'énergie, de l'environnement, de la médecine, des matériaux et des nouvelles technologies.**

**Le SwissFEL consolide ainsi la position de leader de la Suisse en comparaison internationale dans le domaine des sciences et de la recherche. L'économie en profite aussi.**

Le SwissFEL produit des impulsions lumineuses de rayons X ultracourtes ayant les propriétés du laser. Ces impulsions sont un milliard de fois plus brillantes que la lumière produite par la Source de Lumière Suisse SLS.

Elles sont si lumineuses qu'elles permettent de réaliser des films d'atomes et de molécules en mouvement. Le SwissFEL travaille donc en complément de la Source de Lumière Suisse SLS. Ensemble, ces deux installations répondent à la demande croissante de faisceaux ultramodernes de rayons X et de lumière ultraviolet.

## Qu'est-ce qu'un laser à rayons X à électrons libres?

**Un laser à rayons X à électrons libres concentre de la lumière de type rayons X en impulsions de rayons X ultracourtes et incroyablement lumineuses. Il n'existe dans le monde que quelques grandes installations comparables.**

Le principe d'un laser à rayons X à électrons libres est le suivant: un faisceau d'électrons est accéléré à une vitesse proche de celle de la lumière. Ce faisceau

se dirige ensuite par un long circuit-onduleur, où des aimants contraignent les électrons sur une trajectoire sinueuse et rapide. Ce changement de direction permanent fait que les électrons émettent une succession rapprochée d'impulsions lumineuses de rayons X ultracourtes.

## Recherche de pointe

**Les expériences au SwissFEL permettent de comprendre la matière et les matériaux à un niveau tout à fait inédit, que ce soit dans le domaine de la biologie, de la chimie, des sciences de l'ingénieur ou encore des sciences des matériaux.**

La Source de Lumière Suisse SLS a permis de formidables succès: la structure statique de nombreuses protéines importantes y a été élucidée. Le SwissFEL va permettre à présent de suivre les mouvements au cœur de ces protéines. L'installation ouvre des perspectives tout à fait nouvelles sur les processus qui se jouent dans le corps humain.

La composition chimique et la structure géométrique d'une substance déterminent la manière dont elle se comporte pendant une réaction chimique. Le SwissFEL donne la possibilité aux chercheurs d'observer chaque étape d'une réaction de ce genre. Le SwissFEL élargit également notre compréhension de l'apparition des propriétés magnétiques des matériaux, mais aussi des méthodes permettant de les modifier. Cette grande installation de recherche ouvre ainsi la voie aux ordinateurs du futur qui doivent pouvoir stocker toujours plus de données dans un espace de plus en plus restreint. Elle donne par exemple aux chercheurs la possibilité d'étudier le potentiel de la lumière pour un stockage magnétique ciblé des données et une transmission nettement plus rapide des informations que celle que nous connaissons aujourd'hui.

C'est dans les onduleurs qu'est générée la lumière de type rayons X du SwissFEL. Ces appareils ont été produits en collaboration avec le groupe Daetwyler. Sur la photo, on aperçoit Peter Daetwyler (à gauche) avec Hans Braun, chef de projet SwissFEL, près des onduleurs dont l'installation vient d'être terminée peu avant la mise en service de la nouvelle grande installation de recherche du PSI.

## Renforcer la Suisse comme place économique

**Le SwissFEL a été largement conçu en fonction des exigences des hautes écoles et de l'industrie suisses. Il prend en compte leurs intérêts et leurs besoins en matière de recherche.**

Avec le SwissFEL, la Suisse comme place de recherche se voit renforcée à long terme. En même temps, cette grande installation contribue à la compétitivité de l'économie helvétique.

Cette compétitivité est principalement fondée sur la capacité de l'économie suisse à mettre sur le marché des produits innovants avant ses concurrents. La disponibilité dans le pays d'excellentes possibilités en matière de recherche permet de développer précocement de nouvelles connaissances, de même que des méthodes et des instruments novateurs à la hauteur des défis globaux.

Mais l'industrie suisse profite aussi de manière immédiate des nouvelles possibilités de recherche au SwissFEL, que ce soit au travers de collaborations avec le PSI et les hautes écoles, ou encore par le



biais d'analyses menées aux installations du SwissFEL dans le cadre de son propre travail de développement.

### Encore plus de SwissFEL dès 2020

**En 2020, une deuxième ligne de faisceau sera mise en service au SwissFEL. Grâce à elle, la diversité d'expériences possibles sera encore plus importante.**

Les stations d'expérimentation au SwissFEL ont été conçues précisément pour

correspondre aux besoins attendus de leurs utilisatrices et utilisateurs. Car chaque question à étudier – qu'elle relève de la biologie, de la chimie ou de la physique – pose des exigences différentes au dispositif expérimental et à la méthode la plus appropriée pour l'analyse. Par ailleurs, les différents types de rayons X n'offrent pas les mêmes possibilités en matière d'analyse: actuellement les chercheurs au SwissFEL peuvent mener leurs essais avec ce qu'on appelle des rayons X «durs». Ces rayons X ont une longueur d'onde extrêmement courte et sont optimaux, par exemple, pour suivre

le mouvement des atomes et la direction de ce mouvement pendant un processus ultrarapide.

En revanche, les chercheurs ont besoin de rayons X «mous» avec une longueur d'onde plus grande lorsqu'ils cherchent à comprendre précisément ce qu'il advient de certaines molécules ou de certains atomes lorsque ces derniers forment une liaison chimique, ou encore la manière dont ils réagissent aux champs électromagnétiques et à la lumière. Une deuxième ligne de faisceau produira précisément cette lumière de type rayons X. Elle sera mise en service en 2020.

# C'est grâce à nous

## Plombier

Améliore les canalisations transportant de l'eau de refroidissement et de l'air comprimé

Beaucoup de personnes, possédant toute une palette de compétences, font fonctionner des installations du PSI nuit et jour.  
Rencontrez-en quelques-unes:

## Coordinateur technique

Supervise les projets et coordonne les plans d'action

## Technicien de radioprotection

Assure un environnement de travail sain et sûr au sein de tout l'institut

## Agent de nettoyage

Nettoie minutieusement autour d'équipements fragiles et coûteux

## Ingénieur accélérateur

Fournit une lumière synchrotron de haute qualité pour les expériences

## Assistante du chef de division

Aide le chef de division pour toutes les tâches administratives et organisationnelles

## Développeur de logiciel

Écrit le code des programmes de commande d'expériences de haute précision

## Ingénieur en électronique

Réalise des dispositifs électroniques assurant le positionnement précis des instruments scientifiques

**Electricien**

Installe l'alimentation électrique et le câblage complexe de la ligne de faisceau

**Conducteur de grue**

Déplace quotidiennement des tonnes d'équipements avec la plus grande précaution

**Technicien faisceau**

Assure la maintenance de la ligne de faisceau et construit de nouveaux équipements

**Ingénieur du vide**

Entretien le vide sur toute la trajectoire du faisceau de particules



**Scientifique**

Conçoit des expériences pour faire de nouvelles découvertes

**Polymécanicienne**

Crée des composants de précision pour des équipements scientifiques uniques

**Physicienne détecteurs**

Réalise des détecteurs ultrarapides pour capter les résultats des expériences



Vue aérienne de l'Institut Paul Scherrer PSI. Le bâtiment circulaire situé à l'arrière est la Source de Lumière Suisse SLS, implantée sur la rive ouest de l'Aare. Le SwissFEL, le laser à rayons X à électrons libres suisse, est situé dans la forêt qui se trouve de l'autre côté de la rivière, à gauche sur l'image.

# Le PSI en bref

L'Institut Paul Scherrer PSI est un institut de recherche pour les sciences naturelles et les sciences de l'ingénieur. Au PSI nous faisons de la recherche de pointe dans les domaines des technologies d'avenir, énergie et climat, innovation santé ainsi que fondements de la nature. Nous associons recherche fondamentale et recherche appliquée pour élaborer des solutions durables répondant à des questions centrales de la société, de la science et de l'économie. Le PSI développe, construit et exploite des grandes installations de recherche complexes. Chaque année, nous accueillons plus de 2500 chercheurs invités venant de Suisse, mais aussi du monde entier. Tout comme les scientifiques du PSI, ils effectuent sur nos installations uniques des expériences qu'ils ne pourraient effectuer nulle part ailleurs. La formation des générations futures est un souci central du PSI. Pour cette raison, environ un quart de nos collaborateurs sont des postdocs, des doctorants ou des apprentis. Au total, le PSI emploie 2200 personnes, étant ainsi le plus grand institut de recherche de Suisse.

## Impressum

### Conception/texte

Dr. Martyn J. Bull

### Comité d'édition

Dr. Martyn J. Bull, Christian Heid,  
Dr. Laura Hennemann,  
Dr. Paul Pivnicki

### Photos et illustrations

Toutes les photos Scanderbeg  
Sauer Photography, sauf:  
page 6: image inaltéré de:  
*The Structural Basis for mRNA Recognition  
and Cleavage by the Ribosome-Dependent  
Endonuclease RelE*; Cell, 2009 Dec 11;  
139(6): 1084–1095 (doi: 10.1016/j.  
cell.2009.11.015), copyright:  
[creativecommons.org/licenses/by/4.0/](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)  
page 27: Frank Reiser  
page 30: Markus Fischer

### Design et maquette

Mahir Dzambegovic

### Impression

Paul Scherrer Institut

### Commandes à adresser à

Paul Scherrer Institut  
Events et Marketing  
Forschungsstrasse 111  
5232 Villigen PSI, Suisse  
Tél. +41 56 310 21 11

Villigen PSI, octobre 2018

## Contacts

### Chef de la division de recherche Sciences Photoniques

Prof. Dr. Gabriel Aepli  
Tél. +41 56 310 42 32  
[gabriel.aepli@psi.ch](mailto:gabriel.aepli@psi.ch)

### Chef d'état-major Sciences Photoniques

Elizabeth Bianchi a.i.  
Tél. +41 56 310 43 77  
[elizabeth.bianchi@psi.ch](mailto:elizabeth.bianchi@psi.ch)

### Coordinateur scientifique et CEO SLS Techno Trans AG

Stefan Müller  
Tél. +41 56 310 54 27  
[stefan.mueller@psi.ch](mailto:stefan.mueller@psi.ch)

### Chef du laboratoire de Macromolécules et Imagerie Biologique

Dr. Oliver Bunk  
Tél. +41 56 310 30 77  
[oliver.bunk@psi.ch](mailto:oliver.bunk@psi.ch)

### Chef du laboratoire de Nanosciences et Technologies des Rayons X

Dr. Yasin Ekinci  
Tél. +41 56 310 28 24  
[yasin.ekinci@psi.ch](mailto:yasin.ekinci@psi.ch)

### Chef du laboratoire de Matière Condensée

Prof. Dr. Frithjof Nolting  
Tél. +41 56 310 51 11  
[frithjof.nolting@psi.ch](mailto:frithjof.nolting@psi.ch)

### Chef du laboratoire de Femtochimie

Prof. Dr. Christoph Bostedt  
Tél. +41 56 310 35 94  
[christoph.bostedt@psi.ch](mailto:christoph.bostedt@psi.ch)

### Chef du laboratoire de Spectroscopie Avancée et Sources de Rayons X

Prof. Dr. Luc Patthey  
Tél. +41 56 310 45 62  
[luc.patthey@psi.ch](mailto:luc.patthey@psi.ch)

### Chef du laboratoire d'Optique Non Linéaire

Prof. Dr. Adrian Cavaliere  
Tél. +41 56 310 30 79  
[adrian.cavaliere@psi.ch](mailto:adrian.cavaliere@psi.ch)

### Chef du département Communication

Dr. Mirjam van Daalen  
Tél. +41 56 310 56 74  
[mirjam.vandaalen@psi.ch](mailto:mirjam.vandaalen@psi.ch)

Paul Scherrer Institut :: 5232 Villigen PSI :: Suisse :: Tél. +41 56 310 21 11 :: [www.psi.ch](http://www.psi.ch)

SLS\_Science with light\_f, 5/2023

