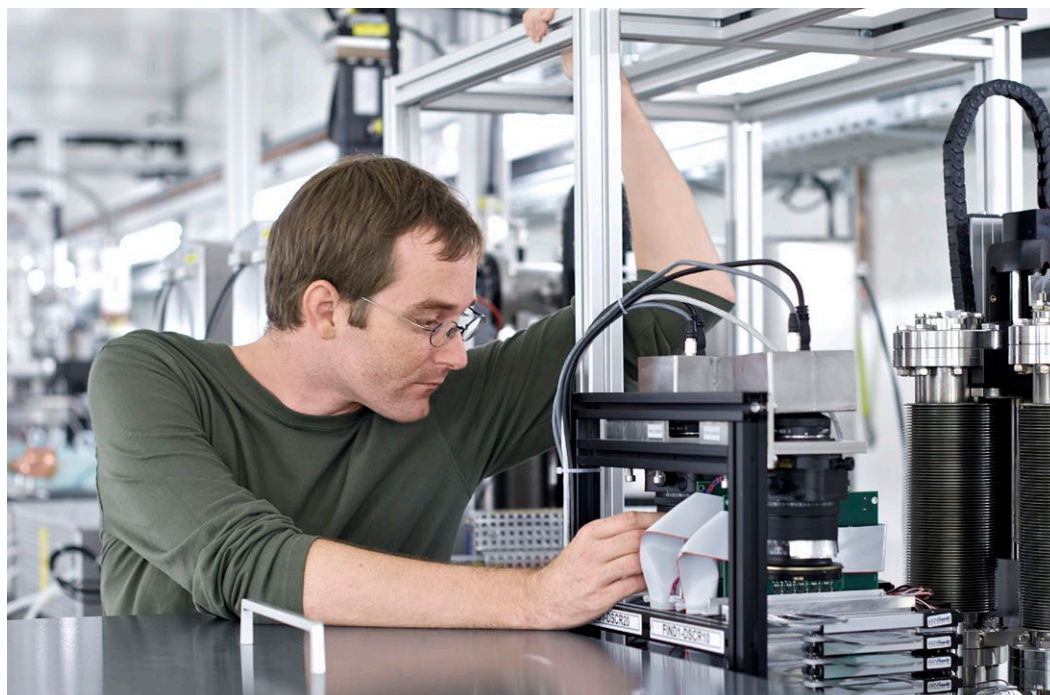


PAUL SCHERRER INSTITUT



Les matériaux de l'avenir

Recherches à l'Institut Paul Scherrer

A l'Institut Paul Scherrer PSI, les échantillons de matériaux, comme ici les polymères conducteurs, le matériau de départ pour la fabrication de LED, cellules photovoltaïques et transistors, sont par exemple examinés à l'aide de rayons X.



Table des matières

5	Les matériaux définissent le progrès	18	Spintronique pour ordinateurs rapides
6	Rayons X comme microscope	18	Le spin véhicule l'information
6	Catalyseurs accélèrent	19	Assez lents uniquement au PSI
7	Horizon de long terme		
7	Observer les réactions	20	Les câbles de l'avenir
		20	Utilisation de supraconducteurs
8	Batteries aux ions de lithium	21	A la poursuite du phénomène
8	Durée de vie limitée		
9	Combinaison unique	22	Aimants sous tension
		22	Combiner les caractéristiques
10	Piles à combustible pour l'automobile	23	La recherche ne est qu'au début
10	Membrane séparatrice en plastique		
11	Imagerie neutronique	24	Les détails intérieurs sont importants
		25	Création de cristaux parfaits
12	Catalyseurs pour énergie et environnement	25	Matériaux en couches minces apportent de l'aide
12	De la centrale électrique à l'automobile		
13	L'avenir est aux bioénergies	26	Les outils de la science
		26	Lumière synchrotron
14	Vieillessement d'aciers	27	Neutrons
15	L'acier dans les centrales nucléaires	28	Muons
15	L'eau de refroidissement doit être propre	29	SwissFEL
16	Sauvegarde d'informations	31	Le PSI en bref
17	Matériaux magnétiques	31	Impressum
17	Structures ultra-minces	31	Contacts

Page de couverture

La nouvelle grande installation de recherche SwissFEL donne au PSI la possibilité de mener des expériences totalement inédites dans le domaine de la recherche sur les matériaux.



La manière dont les domaines magnétiques sont arrangés dans le matériau est d'une importance capitale pour la sauvegarde de données informatiques. Pour photographier ces domaines, des petites zones d'un matériau, les chercheurs au PSI se servent du microscope électronique à photoémission.

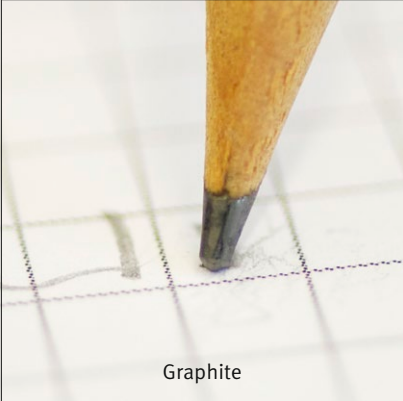
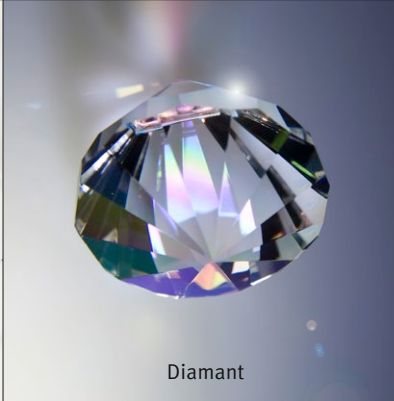
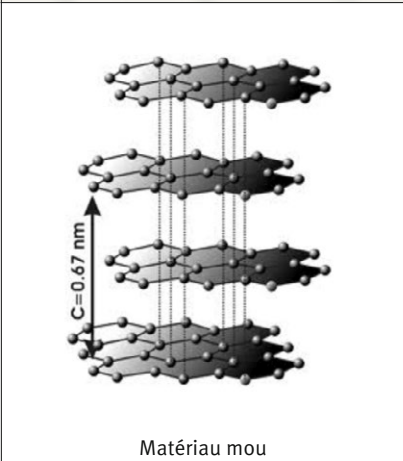
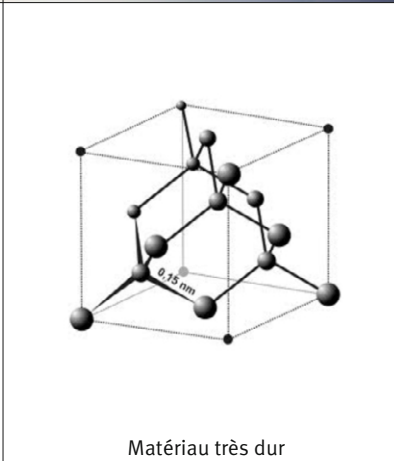
Les matériaux définissent le progrès

La préhistoire est classée en âge de pierre, de bronze et du fer. Chaque découverte d'un nouveau matériau marquait une étape du développement de l'humanité. Pour développer aujourd'hui une puce électronique ou une batterie rechargeable pour voitures électriques, une bonne connaissance des matériaux est indispensable. Les chercheurs du PSI examinent la structure des matériaux dans ses plus petits détails, les atomes. C'est ainsi que la recherche fondamentale d'aujourd'hui est la base des technologies de demain.

Le matériau naturel le plus dur sur terre est le diamant. Le graphite par contre est tellement effratable qu'il sert à la fabrication de mines de crayons. En écrivant, la fine couche de graphite est frottée par le papier. Pourtant, diamant et graphite sont composés du même élément chimique, le carbone. Au

dix-huitième siècle, personne n'y croyait encore. Ce n'est qu'en 1796 que le chimiste anglais, Smithson Tennant, en faisant brûler un diamant, découvrit le dioxyde de carbone (CO_2) comme unique produit de la combustion, c'est-à-dire le même gaz que celui de la combustion du graphite.

La différence entre ces deux substances provient des forces de liaison entre les atomes du matériau. Les électrons des atomes sont responsables des forces de liaison dans les matériaux et déterminent les caractéristiques du matériau. Et ceci se reflète dans la structure. A l'intérieur du diamant, les atomes du carbone se relient rigidement dans toutes les directions. Par contre, dans le graphite, les atomes sont fortement liés dans une couche, mais faiblement liés entre couches successives. L'arrangement des atomes dans le graphite ressemble à celui des ardoises sur un toit. En conséquence, il est facile d'effriter le graphite. Tennant ne le savait pas encore, car les atomes sont invisibles pour un microscope ordinaire. Ce n'est qu'après la découverte des rayons X que les scientifiques commencèrent à examiner les matériaux plus en détail. Quand les rayons X heurtent un matériau, ils sont

Carbone pur C	
 <p>Graphite</p>	 <p>Diamant</p>
 <p>Matériau mou</p>	 <p>Matériau très dur</p>

Bien qu'ils aient de caractéristiques très différentes, le graphite (la mine du crayon) et le diamant sont tous deux en carbone. La différence ne provient que de la liaison entre les atomes, c'est-à-dire dans la structure du matériel. 1 nm (Nanomètre) correspond à un millionième de millimètre.



Des scientifiques du PSI devant une installation permettant de fabriquer de minces couches de divers matériaux à l'aide d'un laser.

déviés dans de multiples directions par la structure atomique du matériau. L'image formée permet de déterminer la disposition des atomes, c'est-à-dire la structure du matériau.

Rayons X comme microscope

Le PSI étudie encore aujourd'hui les matériaux à l'aide de rayons X. L'appareil est néanmoins plus volumineux que celui du dentiste. Le microscope aux rayons X du PSI, le collisionneur de l'accélérateur de particules, nommé SLS ou «Source de Lumière Suisse», possède une circonférence de près de 300 mètres et est suffisamment puissant pour discerner les structures de matière au niveau atomique. Les rayons X ou «la lumière Röntgen» ne convient toutefois pas à l'étude de tous les matériaux. Dans une autre grande installation de recherche, les échantillons sont exposés au tir de neutrons pour étudier leur structure. La majorité des métaux freine énormément les rayons X, mais certains sont quasiment transparents aux neutrons. En revanche, l'eau freine les neutrons. La particule la plus exotique,

utilisée au PSI pour la recherche des propriétés des matériaux, est le muon. Il se prête notamment à la recherche sur les matériaux magnétiques. L'Institut Paul Scherrer est l'un de deux instituts de recherche au monde disposant sur le même site de trois sources: lumière aux rayons X, neutrons et muons.

Les scientifiques du monde entier viennent en Suisse pour étudier au PSI leurs échantillons de matériaux. Les projets de recherche actuels portent notamment sur les nouvelles sources d'énergie. Il est par exemple urgent d'améliorer la capacité des batteries aux ions de lithium, utilisées dans les voitures électriques. Les matériaux pour ces batteries ou accumulateurs de la génération suivante sont testés au PSI dans le but d'augmenter aussi bien l'autonomie des véhicules électriques que la durée de vie des batteries. Cela ne signifie pourtant pas que le PSI cherche à fabriquer ou à vendre ces nouvelles batteries. Nos laboratoires n'examinent souvent que de toutes petites quantités, destinées au développement de nouveaux matériaux. La fabrication de nouvelles batteries reste l'affaire de l'industrie.

Catalyseurs accélèrent

Un autre exemple issu de l'industrie automobile est le catalyseur équipant le pot d'échappement. Outre le monoxyde de carbone, la combustion dégage des dioxydes d'azote et de soufre qui donnent les pluies acides. Avant que ces gaz nocifs ne quittent le pot d'échappement, le catalyseur les convertit en gaz inoffensifs pour l'environnement. Grâce au catalyseur des véhicules, associé au prétraitement catalytique des carburants, les pluies acides ont pu être éliminées en Suisse et dans une grande partie d'Europe. La génération courante de catalyseurs utilise les terres rares et les métaux précieux comme le platine. La rareté de ces composants contribue au coût élevé des catalyseurs courants. Le PSI s'efforce de trouver des catalyseurs dont les composants sont moins coûteux. Mais l'utilisation de catalyseurs ne se limite pas aux voitures. Les catalyseurs sont des substances dont la présence accélère certaines réactions chimiques sans que le matériau du catalyseur ne soit consommé. On les trouve dans de nombreux processus chimiques. Ils

sont même utilisés dans une méthode largement répandue pour la fabrication de diamants industriels. L'industrie a en effet besoin de diamants pour couper, aléser et meuler. Sous pression et température élevées, il est possible de transformer le graphite en diamant. En présence d'un catalyseur, le processus se déroule à des pressions et températures moins élevées. La fabrication est moins énergivore et devient plus économique.

Horizon de long terme

Ces exemples de recherches sur les matériaux ont pour objectif l'amélioration d'un produit ou processus de fabrication existants. Les technologies permettent la réalisation d'un produit à mettre sur le marché, même si l'acheteur doit parfois encore attendre des années pour que le produit soit disponible. Dans d'autres projets de recherche, les scientifiques ne s'occupent pas encore de produits concrets, mais explorent leurs idées pour l'utilisation future d'un nouveau matériau. Ils travaillent dans la recherche fondamentale dont nous citons le graphène. Comme le diamant et le graphite, ce matériau n'est composé que de carbone, mais arrangé dans une structure unique. Le graphène n'a qu'une seule couche d'atomes. Cette couche a une haute résistance au déchirement, cent fois plus élevée que celle de l'acier. Et les électrons s'y déplacent à une vitesse telle qu'une puce à base de graphène pourrait être entre dix et cent fois plus rapide que les processeurs actuels.

Mais il est encore incertain si l'ordinateur au graphène est réalisable. Pour l'instant, les scientifiques cherchent à fabriquer un transistor au graphène. Un processeur d'ordinateur courant possède quelques milliards de transistors. Dans la recherche des matériaux, il y a souvent des décennies entre l'idée et le produit. Un exemple: les transistors des circuits intégrés de nos ordinateurs ont été mis au point dans les années 1950.

Observer les réactions

Observer en temps réel la modification de la structure ou la position d'atomes composant un matériau est l'une des choses que les chercheurs du PSI ne savent pas encore faire. Ils rêvent par exemple à reproduire la photosynthèse au laboratoire. Les plantes nous montrent comment utiliser l'énergie de

la lumière du soleil. Mais les réactions chimiques sont trop rapides pour être observées avec les moyens actuellement disponibles. Aussi, de nombreux échantillons biologiques sont trop petits pour être analysés avec les installations courantes. Le projet de la grande installation de recherche SwissFEL est destinée à résoudre ces deux problèmes. Il utilisera de très courtes mais extrêmement puissantes impulsions de rayons X, concentrées sur une cible ponctuelle. Il devrait permettre d'observer le fonctionnement de molécules complexes à l'intérieur d'une cellule humaine. Avec les nouvelles connaissances, les médecins espèrent pouvoir développer de nouveaux médicaments. La construction du SwissFEL referme le cercle de la recherche sur les matériaux. La lentille destinée à focaliser les rayons X doit avoir une résistance extrêmement élevée. Le diamant serait un bon matériau pour sa réalisation.



Lentille à échelons, dite de Fresnel, développée pour focaliser les impulsions du laser à rayons X du SwissFEL. Pour permettre la focalisation, la couche de diamant a été fraisée à l'aide de procédés lithographiques. 1 μm (micromètre) correspond à un millième de millimètre.

Batteries aux ions de lithium



Les chercheurs du PSI examinent le vieillissement de batteries aux ions de lithium après un grand nombre de cycles de chargements et déchargements au microscope électronique.

Les futures voitures électriques roulent avec des batteries aux ions de lithium. Les scientifiques du PSI améliorent les matériaux et assistent les fournisseurs de l'industrie automobile à tester et analyser leurs prototypes de batteries.

En 1900, New York avait deux fois plus de voitures électriques que de voitures à essence. Les batteries à plomb étaient lourdes et l'autonomie n'était que de 50 kilomètres. Mais c'était suffisant puisque les routes étaient trop mauvaises en dehors de la ville. Les moteurs à essence n'ont réussi à s'imposer qu'à partir du moment où ils furent fabriqués en grande série et à

un prix abordable et que le réseau routier fut suffisamment développé.

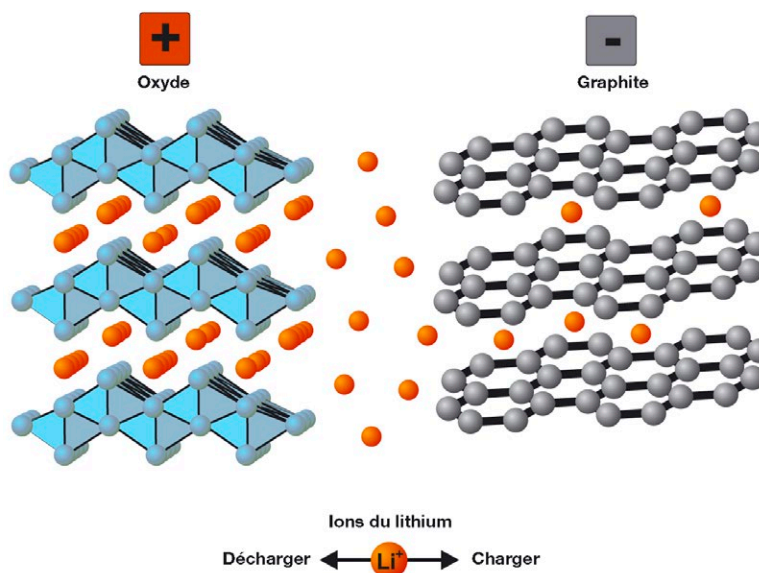
En raison du réchauffement climatique et des réserves limitées du pétrole, la voiture électrique regagne de l'intérêt, toutefois pas avec des batteries au plomb, comme leur poids reste à ce jour trop lourd par rapport à l'autonomie souhaitée. Les batteries au lithium se sont imposées pour les téléphones et ordinateurs portables. Le lithium est un métal léger dont la structure chimique possède la plus importante capacité de stockage d'électricité. Le lithium pur réagit violemment avec de l'eau et ne doit pas être mis en contact direct avec de l'oxygène. Dans une

batterie, il est donc confiné dans l'une des deux électrodes sous forme d'oxyde métallique de lithium. L'autre électrode est en graphite. Pendant le chargement, les ions du lithium s'accumulent dans la couche de graphite après avoir traversé l'électrolyte salin. Pendant le déchargement de la batterie, les ions reviennent dans l'oxyde de lithium.

Durée de vie limitée

Pendant le chargement, le graphite augmente son volume d'environ 10%. Il y a quelques années, cette variation

Au chargement, les ions du lithium quittent l'électrode positive et passent aux couches de l'électrode négative en graphite. Pendant le déchargement, l'opération est inversée.



perpétuelle du volume réduisait la durée de vie des piles au lithium à seulement quelques centaines de cycles de chargement. Ce n'est qu'après avoir étudié les détails du processus que les scientifiques ont pu stabiliser la couche de graphite et prolonger la durée de vie pour que ces batteries puissent être envisagées pour les voitures.

Encore aujourd'hui, les scientifiques du PSI recherchent de nouveaux matériaux pour les batteries au lithium. Ils étudient le vieillissement du matériau utilisé pour l'électrode au microscope électronique à balayage de surface. En balayant la surface du lithium avec un mince faisceau d'électrons, l'écran affiche l'endroit qui réfléchit un grand nombre d'électrons. Un microscope ordinaire ne conviendrait pas à cette recherche puisque les longueurs d'onde de la lumière normale sont trop

grandes pour voir les structures très fines du matériau. Ce serait comme si l'on voulait écrire une carte postale avec une bombe d'aérosol – le jet de couleur serait simplement trop large. La longueur d'onde d'électrons projetés sur les échantillons des batteries est nettement plus fine que celle de la lumière visible.

Combinaison unique

Le PSI est l'un des rares laboratoires au monde permettant de radiographier

les batteries au lithium pendant les opérations de chargement et déchargement. Pour cette raison, les chercheurs viennent du monde entier au PSI. Ils examinent les détails de migration et conservation d'ions de lithium dans les couches du graphite à l'aide de rayons X à la Source de Lumière Suisse SLS et par les neutrons fournis par la SINQ suisse, la source de neutrons à spallation. Du fait qu'ils sont très légers, les atomes de lithium sont pratiquement transparents aux rayons X. Par contre ils sont bien visibles aux neutrons.

Le PSI travaille aussi bien sur l'amélioration des piles déjà commercialisées que sur les technologies futures, dont les produits ne rejoindront le marché que dans 10 à 20 ans, par exemple sur les batteries au lithium-souffre, dont le principe a pu être présenté au laboratoire. La technologie la plus prometteuse est actuellement la batterie au lithium-air. Bien que les recherches soient encore aux débuts, on sait déjà que les capacités de ces piles seront 10 fois plus importantes que celles des batteries au lithium actuelles. Ce type de batterie confierait à la voiture électrique une autonomie d'environ 500 kilomètres.



Une chercheuse en train de réaliser une électrode en graphite. Le graphite noire liquide est déposé, épanché et séché. Au chargement de la batterie, cette électrode joue le rôle de réceptrice d'électrons du lithium et stocke ainsi l'énergie.

Piles à combustible pour l'automobile

Les voitures électriques actuelles ont une autonomie de 100 à 150 km par chargement de batterie. Les piles à combustible peuvent améliorer l'autonomie. Les chercheurs du PSI développent matériaux et systèmes pour applications pratiques.

En 2000, la pile ou cellule à combustion semblait être la source d'énergie idéale pour voitures électriques. Les experts prédisaient les premières voitures avec cellules à combustion pour l'année 2005. Mais hélas, ils se sont trompés. Les systèmes fonctionnaient fiablement au laboratoire, mais il y avait des problèmes pour l'utilisation de tous les jours: les fréquents arrêts et redémarrages fatiguaient les systèmes. La durée de vie espérée d'au moins 200 000 kilomètres n'a pu être atteinte et les piles à combustible ont dû être remplacées bien plus tôt. L'eau étant le produit final dans les cellules, les températures bien en dessous de zéro la faisaient geler. Mais l'acheteur d'une voiture électrique voudrait aussi pouvoir démarrer aux vacances d'hiver à $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

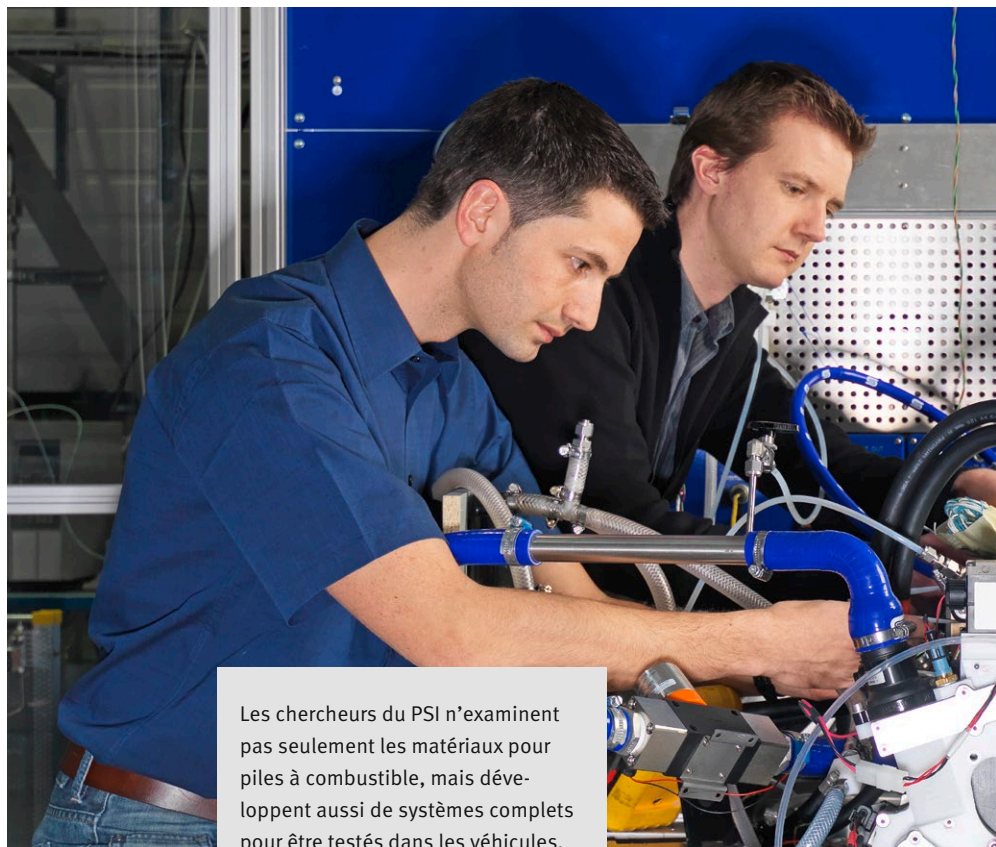
Le «combustible» des piles à combustible est l'hydrogène. Il n'est pas brûlé dans le moteur comme dans un moteur conventionnel mais utilisé pour la réaction contrôlée avec de l'oxygène. Les molécules d'hydrogène (H_2) sont d'abord divisées en atomes H individuels. Dans cette opération, chaque atome perd un électron. Le noyau nu de l'atome d'hydrogène (H^+), le proton, traverse un diaphragme en plastique. De l'autre côté du diaphragme, il entre en contact avec de l'oxygène (O_2) et forme une molécule d'eau (H_2O). Les

électrons ne peuvent pas passer à travers l'isolant en plastique. Collectés par une électrode, ils parviennent à l'autre côté sous forme de courant. Et ce courant est utilisé pour l'entraînement du véhicule. Le principe a pour la première fois été utilisé pour les missions aérospatiales de la NASA dans les années 1960.

Membrane séparatrice en plastique

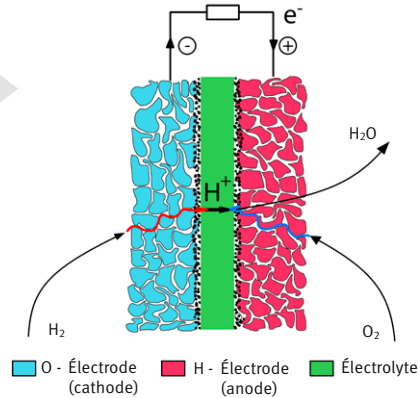
La membrane en plastique est le cœur de la pile à combustible. Elle comporte

de minuscules canaux pour le transport de protons, entourés de molécules d'eau. Ce diaphragme est composé d'un empilement de plusieurs centaines de feuilles en plastique avec des canaux agissant comme une éponge: Afin que les protons ou atomes nus d'hydrogène puissent passer de l'autre côté, l'éponge doit être humide. Une membrane sèche ne ferait pas passer les protons. C'était comme si l'on voulait essuyer une table sale à l'aide d'un chiffon sec. Le défi est donc de garder à la membrane une humidité constante d'environ 20%, indépendamment du fait que la voiture avance au ralenti ou



Les chercheurs du PSI n'examinent pas seulement les matériaux pour piles à combustible, mais développent aussi de systèmes complets pour être testés dans les véhicules.

Coupe d'une pile à combustible à électrolyte polymère (PEFC): Il est nécessaire que le gaz combustible, l'hydrogène, et l'humidité nécessaire au passage dans la membrane, soient uniformément répartis dans la pile à combustible.



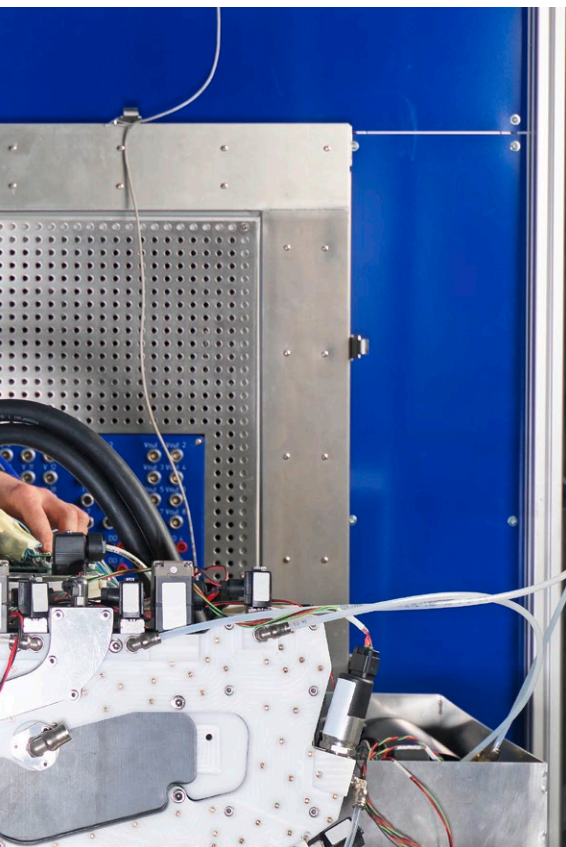
à plein régime. Le système d'une pile à combustible est composé de l'empilement d'une centaine de membranes. L'humidité doit être répandue uniformément.

Imagerie neutronique

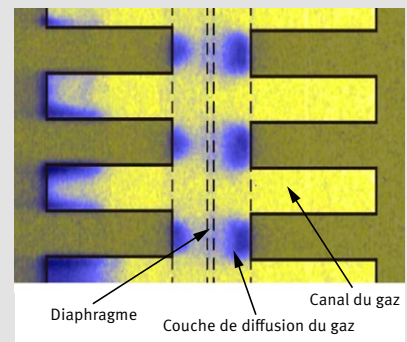
Comment rendre visible la répartition d'humidité dans un boîtier métallique fermé? Le PSI en possède les moyens: radiographier toute la cellule à combustion, mais pas aux rayons X, mais aux neutrons. Contrairement aux rayons X, les neutrons traversent le

métal presque sans perte, mais ils sont absorbés par l'eau. La radiographie aux neutrons fournit donc une image représentant la répartition de l'humidité dans le diaphragme de séparation. Certains constructeurs automobiles viennent au PSI pour y étudier ce problème d'humidité. Une autre question qui préoccupe les chercheurs est celle de la porosité de la membrane. Pour la vérifier, ils examinent la structure ato-

lors des fréquents arrêts et redémarrages peut être désamorçé à l'aide de super-condensateurs. Comme une batterie, ils stockent l'énergie du freinage pendant un temps court et accélèrent ensuite le véhicule. Les chercheurs du laboratoire électrochimique du PSI qui développent la pile à combustible, travaillent également aux nouvelles technologies et matériaux pour les super-condensateurs. La raison pour laquelle il n'y a pas encore de voitures avec piles à combustible sur le marché, n'est pas due aux problèmes techniques. C'est leur prix qui est actuellement encore trop élevé.



Intérieur d'une cellule à combustible: La photo, prise aux neutrons, montre la répartition de l'humidité. Les surfaces bleues représentent de l'eau dans lequel les neutrons sont fortement freinés et absorbés.



mique du diaphragme à l'aide de la Source de Lumière Suisse SLS. Mais pour rendre la cellule à combustible utilisable, il ne suffit pas de n'améliorer que la membrane. Aux températures basses, ce n'est pas l'humidité de la membrane qui gèle, mais l'eau produite par la réaction chimique et éliminée des cellules sous forme de déchet. Pour résoudre ce problème, il faut examiner le système entier. Le problème de l'usure des cellules par les à-coups de puissance demandés

Pour éviter les méthodes onéreuses de la fabrication de diaphragmes actuels, le PSI travaille à la recherche de transformation de feuilles plastiques courantes, du genre utilisé dans les serres. Quelques phases de fabrication supplémentaires devraient permettre d'obtenir des diaphragmes pour piles à combustible. Les experts pensent aujourd'hui que les véhicules abordables, équipés de piles à combustible, seront disponibles dans quelques années.

Catalyseurs pour énergie et environnement

Les limitations draconiennes d'émissions récemment décrétées ont favorisé la rapidité du développement de catalyseurs pour gaz d'échappement. Les catalyseurs ne réduisent toutefois pas seulement la pollution atmosphérique sur les routes, ils améliorent également de nombreux processus chimiques.

On connaît le catalyseur de l'automobile. La combustion d'essence, de gasoil ou d'autres carburants produit également du monoxyde de carbone et des oxydes azotiques. Le catalyseur permet de les transformer en substances inoffensives. Les nombreux catalyseurs mis en œuvre dans l'industrie chimique sont moins connus. Les catalyseurs sont des substances dont la présence accélère certaines réactions chimiques sans que le matériau du catalyseur ne soit consommé. On pense, que 80% des produits chimiques sont fabriqués en présence d'un catalyseur et de nombreux processus chimiques ne sont même possibles que grâce aux catalyseurs. Idéalement, la catalyse transforme intégralement tous les produits de départ, sans résidus indésirables et en consommant un minimum d'énergie. Ce serait la quintessence de la technologie durable.

De la centrale électrique à l'automobile

Le post-traitement des gaz d'échappement par la réduction sélective catalytique ou procédé SCR, utilisé dans de nombreux moteurs de poids-lourds, est



Les scientifiques recherchent des catalyseurs permettant par exemple la transformation de biomasse en méthane.

un secteur important de la recherche. L'ammoniac injecté dans les gaz chauds d'échappement réagit avec les oxydes azotiques dans le catalyseur et produit de l'azote. Le procédé SCR fut d'abord utilisé dans les centrales électriques pour nettoyer les fumées. Ce n'est qu'à la fin des années 80 et au début des années 90 que la recherche commença à transférer cette méthode aux véhicules à gasoil. Aujourd'hui, elle représente le centre d'intérêt puisque les problèmes d'oxydes azotiques sont urgents et les exigences élevées.

Dans le véhicule, l'ammoniac n'est pas utilisé d'emblée, mais obtenu par combustion d'urée, approvisionnée sous forme de solution aqueuse du nom de AdBlue. Les véhicules utilitaires exploitent ce procédé depuis 2005. En raison du durcissement permanent des limites d'émissions, les recherches du PSI portent sur les nouveaux matériaux catalyseurs et les agents susceptibles à remplacer l'ammoniac. Le respect de ces limites impose pratiquement l'emploi du procédé SCR.



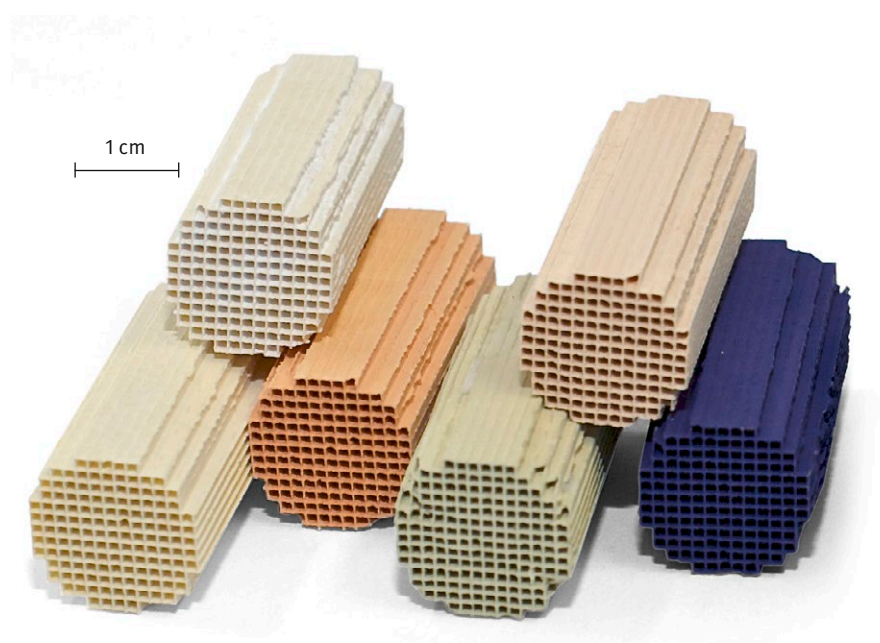
L'avenir est aux bioénergies

Au PSI, les chercheurs dans le domaine de la catalyse ne travaillent pas uniquement sur le traitement des fumées. En utilisant les matériaux organiques renouvelables n'entrant pas dans la production de denrées alimentaires, les scientifiques recherchent activement un procédé pour transformer la biomasse en source d'énergie. La recherche porte en outre sur des catalyseurs permettant de transformer efficacement la biomasse en méthane. La génération de sous-produits est à éviter et la température, nécessaire à la réaction, doit être modérée pour économiser l'énergie.

Pour convertir à l'institut PSI la biomasse en méthane, on chauffe celle-ci à 380 °C sous pression élevée avant de la faire traverser un catalyseur en ruthénium. Dans ces conditions, environ 45 % sont transformés en méthane, tandis que le reste est converti en sous-produits, c'est-à-dire en dioxyde

de carbone, en hydrogène et en eau. Cette conversion nécessite impérativement la présence d'un catalyseur.

Un autre processus pour transformer l'énergie est la photosynthèse. Les plantes l'utilisent pour la production de leurs ressources énergétiques, les glucides, et de l'oxygène à partir de l'eau d'arrosage, du dioxyde de carbone (CO₂) et de la lumière du soleil. Les scientifiques du monde entier sont à la recherche d'un processus permettant la reproduction artificielle de la photosynthèse avec des catalyseurs au nickel et cobalt pour dissocier de l'eau en hydrogène et oxygène à l'aide de la lumière du soleil et qui ultérieurement peuvent, dans une pile à combustible, être transformés en énergie électrique. Pour l'instant, la nature maîtrise la photosynthèse bien mieux que les hommes dont la technologie de synthèse se contente encore de rendements modestes. Il est toutefois évident que bioénergie et photosynthèse artificielle deviendront des sujets importants dès que les gisements de pétrole commenceront à tarir. A long terme, la biomasse sera une source de carbone importante pour la fabrication de produits chimiques et du carburant. Comme la recherche dans ce domaine n'a débutée qu'il y a 15 à 20 ans, les scientifiques s'attendent à des surprises quant aux capacités de la méthode.



Éléments céramiques en nid d'abeilles revêtus de différents catalyseurs (nu à l'extrême gauche). La couleur varie en fonction de la composition chimique du catalyseur.

Vieillessement d'aciers

L'acier renforce les bâtiments et les ponts. L'acier est utilisé partout, dans des caisses de voitures jusqu'aux caissons des réacteurs nucléaires. Pour des raisons de sécurité, les constructions en acier nécessitent des contrôles périodiques, car l'acier subit aussi un vieillissement.

Au soir du 9 mai 1985, le plafond de la piscine municipale d'Uster (ZH) s'effondrait sur les nageurs restés dans l'eau. Il s'est avéré que la majorité des 207 arceaux d'acier supportant le pla-

fond en béton s'était brisée. Mais l'effondrement n'était ni dû au travail bâclé, ni au manque d'entretien. Les arceaux étaient en inox puisque l'humidité de la piscine risquait de faire rouiller l'acier ordinaire. C'était le chlore de l'air de la piscine qui avait provoqué des fissures filiformes dans l'inox. Durant les années, ces fissura-

tions progressèrent et fragilisèrent un bon quart d'arceaux – sans que le défaut ne soit visible à l'œil nu.

Les fissurations filiformes ne peuvent être comparées à la rouille que l'on peut parfois trouver sur les voitures. En rouillant, la surface de l'acier ordinaire devient rouge et s'écaille. A Uster, les fissurations par corrosion sous tension ont entraîné l'effondrement: Les minuscules fissurations de l'inox, visibles qu'au microscope, se développent sous l'effet de la contrainte de traction et de la corrosion par le chlore.

Chercheurs du PSI en train d'examiner le vieillissement d'aciers sous conditions d'environnement variables.



Avec cette installation, l'acier est testé dans les conditions qui existent dans des centrales nucléaires. Les résultats alimentent des modélisations mathématiques, permettant l'évaluation de la sécurité et donc la durée de vie d'installations nucléaires.

L'acier dans les centrales nucléaires

Ces fissurations invisibles à l'œil nu préoccupent également les scientifiques du PSI travaillant sur la sécurité d'installations nucléaires. L'eau chaude du refroidissement, associée au rayonnement radioactif, rend à la longue l'acier cassant et risque d'engendrer des fissurations de contrainte. Comme à la piscine d'Uster, les débuts de la fissuration ne sont visibles qu'au microscope et invisibles à l'extérieur du caisson de confinement du réacteur. On les recherche systématiquement par des examens à l'ultrason et au courant de Foucault pour éviter qu'elles ne grandissent et deviennent dangereuses. Les experts du PSI sont capables de bien surveiller l'état d'aciers dans les centrales nucléaires suisses. Pendant la construction, des spécimens entaillés du même acier que celui du caisson sont placés à proximité du noyau du réacteur. De temps à autre, l'un de ces échantillons est sorti par un robot pour être testé au «Hotlabor» du PSI. On casse l'échantillon à l'endroit de l'entaille et obtient ainsi des informations fiables sur la fragilisation actuelle et future du caisson. Ces essais relativement simples sont effectués par des

bras robotisés derrière d'épais murs en béton avec fenêtres en verre au plomb pour protéger les scientifiques.

L'eau de refroidissement doit être propre

Les soudures aux tuyauteries sont également sensibles à la corrosion et aux fissures. Chaque soudure introduit une contrainte mécanique du fait que le métal fondu se détend, puis se contracte au refroidissement. Cette contrainte de traction reste dans le métal et, comme à la piscine d'Uster, risque d'engendrer des fissurations sous l'effet du chlore accélérant la corrosion. Le chlore provient des traces de sel dans l'eau de refroidissement.

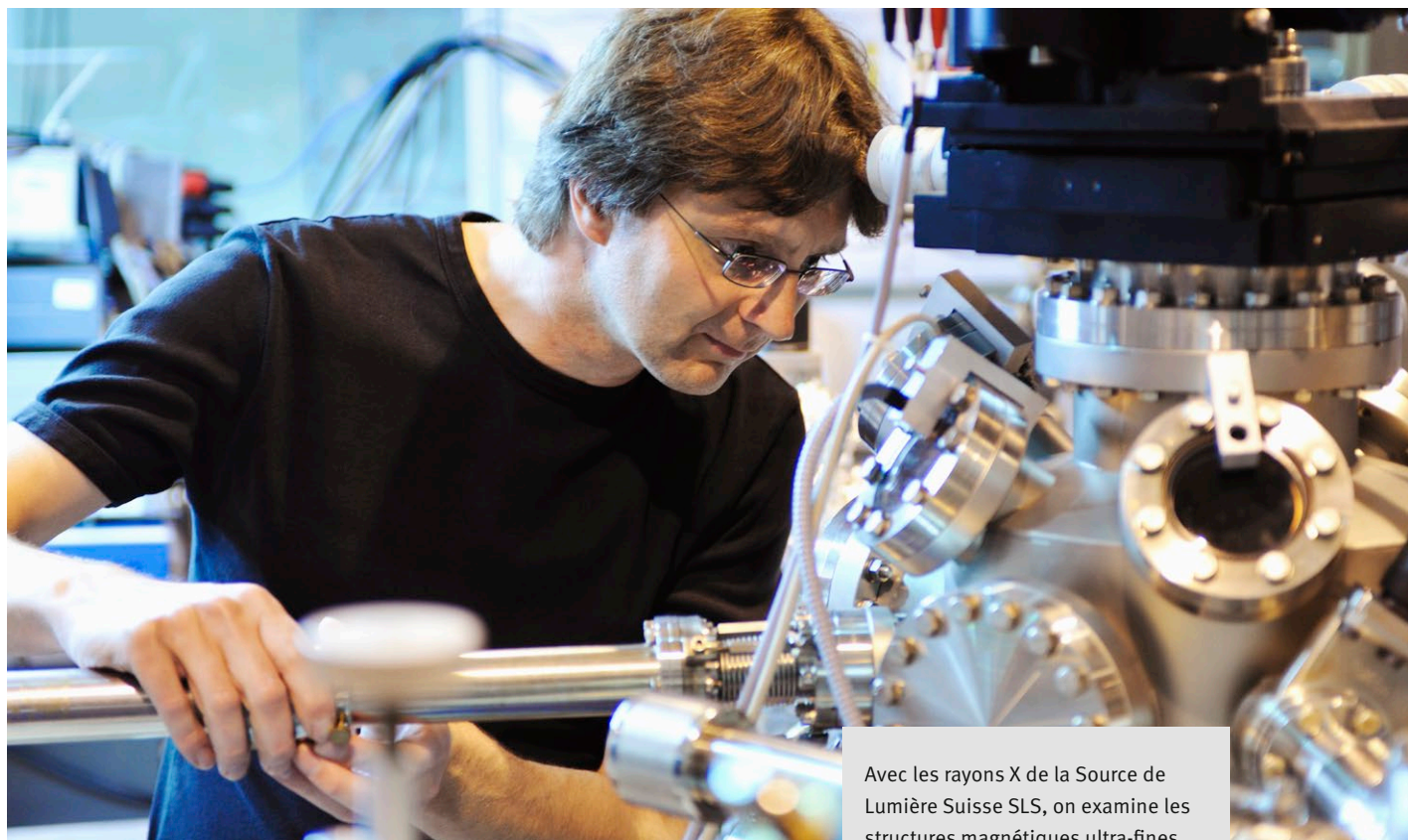
La découverte de ces réactions date des années 80. Depuis, le traitement de l'eau de refroidissement des centrales nucléaires a été amélioré, si bien qu'il contient mille fois moins d'atomes de chlore que de l'eau potable. Parallèlement, de nouvelles méthodes de

soudage sont appliquées, qui remplacent les contraintes de traction par des contraintes de compression et empêchent ainsi les risques de fissuration.

Pour éviter la corrosion, on n'utilise donc pas de matériaux complètement nouveaux aujourd'hui. Une exploitation précautionneuse dans les centrales nucléaires en ce qui concerne l'eau de refroidissement et les bouleversements thermiques, ainsi que la mise en œuvre contrôlée d'aciers, sont décisives. Ainsi, les cordons de soudure doivent soigneusement être meulés et polis. Ces traitements vont décider si oui ou non les fissures vont apparaître 30 ans plus tard.



Sauvegarde d'informations



Avec les rayons X de la Source de Lumière Suisse SLS, on examine les structures magnétiques ultra-fines.

Ordinateurs, appareils photo numériques, lecteurs MP3 et téléphones mobiles intelligents appartiennent aujourd'hui à la vie de tous les jours. Ils produisent énormément de données – à enregistrer soit au centre de calculs, soit sur un disque dur à la maison.

L'ordinateur sauvegarde ses informations sur un disque dur. Son principe de fonctionnement est identique à celui d'un magnétophone où une bande magnétique est lue par une tête de son. La différence n'est que le matériau magnétique est sur un disque en rotation et que la tête de lecture peut être

déplacée à n'importe quelle position sans que la bande ne doive être avancée ou rembobinée.

Le premier disque dur IBM commercialisé en 1956 était de la taille d'une armoire et pesait la moitié d'une tonne. Quand les ordinateurs personnels se répandèrent dans les années 1980, les disques durs, larges de 15 cm, furent installés dans les PCs. Ils pouvaient sauvegarder 10 Mégabytes. Cela correspond à la quantité de données d'une à trois images enregistrées par un appareil photo numérique actuel. Un disque dur moderne n'a plus que la moitié de cette largeur et une capa-

acité de plus d'un Téraoctet, suffisante pour sauvegarder 100 000 à 300 000 photos.

Avec autant d'informations dans si peu d'espace, la place de stockage pour un seul bit – soit une seule information – doit devenir de plus en plus petite. Plus ces cellules de mémorisation deviennent petites, plus il y a de risques que la magnétisation soit accidentellement modifiée, par exemple par des champs magnétiques dans l'environnement ou même par la chaleur du disque dur. Car au niveau d'atomes, la chaleur n'est rien d'autre que du mouvement.

Matériaux magnétiques

Pour cette raison, les instituts de recherche, dont le PSI, travaillent sur de nouveaux matériaux pour disques durs. Ils doivent être conçus de telle sorte que le champ magnétique le plus important possible soit nécessaire pour modifier les structures magnétiques du disque dur qui stockent en fin de compte l'information. Ces matériaux contiennent typiquement des combinaisons de fer, de cobalt, de nickel et quelques autres substances. Différentes couches de films minces sont empilées et leurs caractéristiques magnétiques sont ainsi influencées de manière ciblée.

Les différentes couches peuvent avoir des comportements complètement différents du système empilé total. De cette manière, la contribution des différents atomes du fer, du cobalt ou du nickel est également variable. La me-

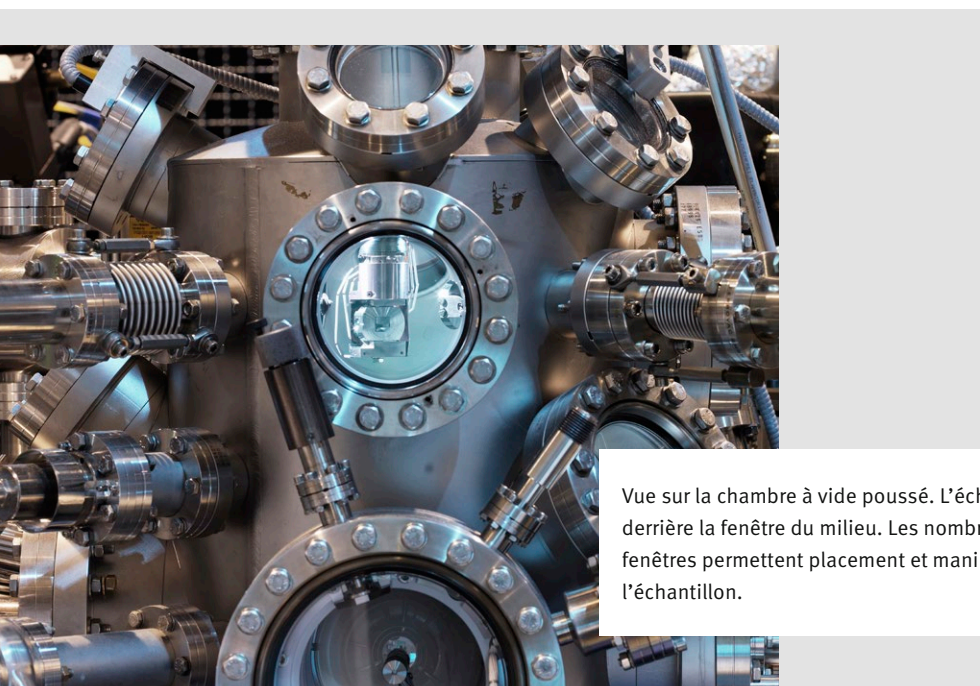
sure de l'incidence des différents métaux dans les diverses couches est la spécialité des chercheurs du PSI. Ils peuvent également afficher à l'écran les couches fines et leurs orientations magnétiques.

Pour ce faire, ils utilisent les rayons X de la Source de Lumière Suisse SLS. Pour la mesure de couches minces, on utilise des rayons X à faible pénétration. Tellement faibles, qu'ils sont absorbés dans l'air après seulement quelques millimètres. Pour cette raison, les expérimentations ont lieu dans le vide, sans la présence d'air. Les rayons X heurtent le matériau et détachent quelques électrons des atomes. Ces électrons sont mesurés par une sonde et analysés à l'aide d'un logiciel. C'est ainsi que les chercheurs obtiennent une image des cellules magnétisées.

Structures ultra-minces

En fonction de leurs longueurs d'onde, les rayons X réagissent avec les atomes de différents matériaux. De cette manière, les chercheurs peuvent observer les magnétisations du fer, du cobalt ou du nickel en fonction de la longueur d'onde choisie. Une des difficultés réside dans le fait, que la dimension des structures n'est souvent que de quelques nanomètres et que leur forme influence le comportement magnétique. Pour comparaison: En moyenne, nos cheveux poussent de quelques nanomètres par seconde. Pour examiner ces minuscules structures, les chercheurs du PSI combinent différentes méthodes de microscopie et font appel aux procédés nanolithographiques les plus modernes.

Les scientifiques ne travaillent pas uniquement à la réduction de la taille des cellules de mémoire, mais sont également à la recherche de méthodes pour lire et/ou sauvegarder les informations plus rapidement. Les dernières connaissances montrent qu'un laser est capable de modifier l'orientation magnétique d'une cellule de mémoire. Ces nouveaux développements offrent des possibilités insoupçonnées, et les ordinateurs de la prochaine génération nous rappelleront guère les ordinateurs de l'époque passée.



Vue sur la chambre à vide poussé. L'échantillon se trouve derrière la fenêtre du milieu. Les nombreux branchements et fenêtres permettent placement et manipulation précis de l'échantillon.

Spintronique pour ordinateurs rapides

Les physiciens ont découvert le spin d'électrons dans les années 1920. Aujourd'hui, 90 ans après, cet effet est utilisé dans les disques durs. Les chercheurs caressent l'idée de pouvoir concevoir des unités centrales basées sur l'exploitation de cet effet, car la spintronique est rapide et économise l'énergie.

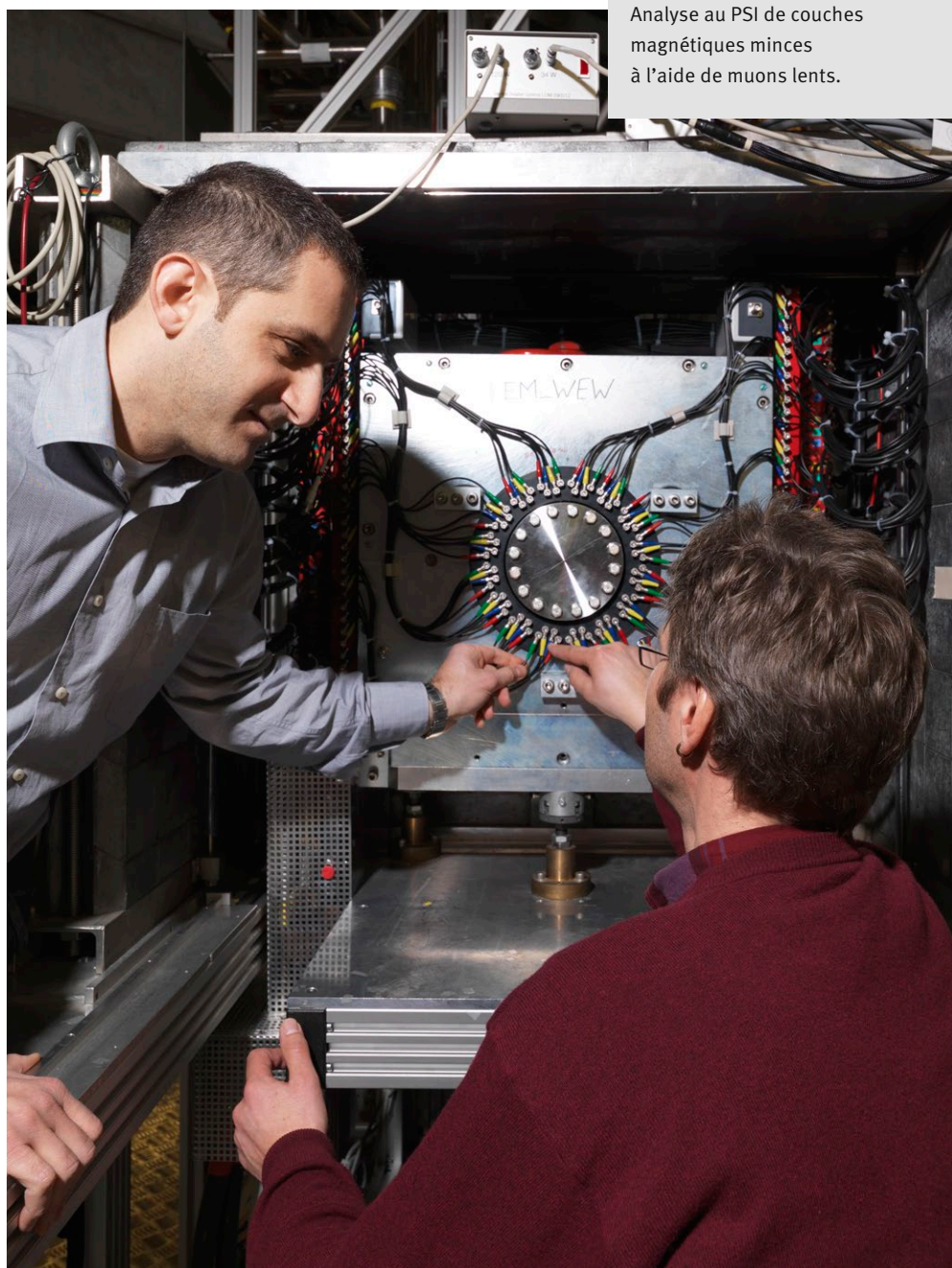
Il arrive aux informaticiens de parler de four à pizza pour désigner les armoires 19 pouces hébergeant les ordinateurs de centres de calculs. Non seulement parce que leurs ordinateurs ont la forme d'une boîte à pizza, mais aussi parce que cette installation chauffe comme un four. Calculé pour une surface identique, les circuits intégrés d'ordinateurs modernes dégagent en effet autant de chaleur qu'une plaque de cuisson.

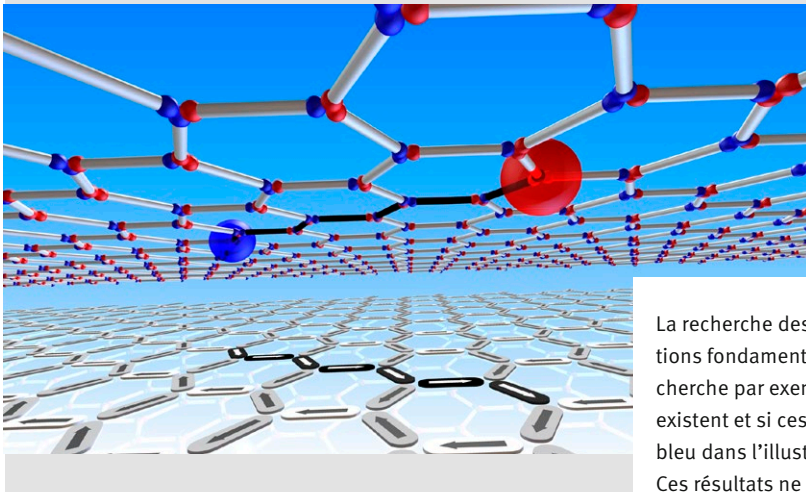
Pour cette raison, l'électronique de demain ne doit pas seulement être moins encombrante et plus rapide, mais elle doit surtout être moins énergivore. Ceci nécessite toutefois la modification du principe de nos ordinateurs. Les éléments les plus importants y sont les transistors dans les «puces». Les puces jouent le rôle de la signalisation sur nos routes. Les puces ont deux modes d'action: «on» ou «off» qui correspondent aux couleurs vertes et rouges des feux de signalisation. En mode «on», les électrons circulent sur leur piste du circuit intégré. En mode «off», les électrons ne circulent plus. Cette alternance «on» et «off» du mode de fonctionnement des puces engendre des pertes de courant, qui, transformées en chaleur, font chauffer les circuits intégrés.

Le spin véhicule l'information

Au lieu de couper le passage d'électrons, les scientifiques souhaitent se servir d'une caractéristique d'électrons non exploitée à ces jours: le spin. Le

Analyse au PSI de couches magnétiques minces à l'aide de muons lents.





La recherche des matériaux s'occupe également de questions fondamentales. Une collaboration internationale cherche par exemple à savoir si des aimants unipolaires existent et si ces «charges magnétiques» (en rouge et en bleu dans l'illustration) peuvent se déplacer librement. Ces résultats ne sont pas seulement intéressants conceptionnellement, mais pourrait également être la base d'un développement d'appareils spintroniques futurs.



spin de l'électron est un attribut qui ressemble au sens de rotation d'une toupie. Le sens de rotation du spin de l'électron ne peut prendre que 2 valeurs, «spin up» ou «spin down». Le fait déterminant est alors que la valeur du spin de l'électron ne peut non seulement être inversée rapidement, mais que cette inversion consomme également beaucoup moins d'énergie que le mouvement de l'électron. Les scientifiques appellent cela la spintronique. Les premiers éléments spintroniques sont déjà dans nos ordinateurs modernes: dans la tête de lecture du disque dur. Autrefois c'était une petite self qui effectuait la lecture de cellules magnétiques. Mais la taille des cellules a rapetissé de même que les tensions à détecter, au point que ces tensions ne sont plus détectables par une self. Aujourd'hui l'induction magnétique est remplacée par le spin de l'électron. Il s'oriente en fonction du champ magnétique traversé par l'électron. Le spin des électrons est d'abord orienté dans un sens à l'aide d'une couche magnétique dans la tête de lecture. Ensuite, ils passent à travers une couche qui adopte le sens de magnétisation de la cellule de mémorisation. Si cette couche a la même orientation que les électrons, ils la traversent sans résistance notable. Si la couche est orientée dans l'autre direction, les électrons sont légèrement freinés et doivent mo-

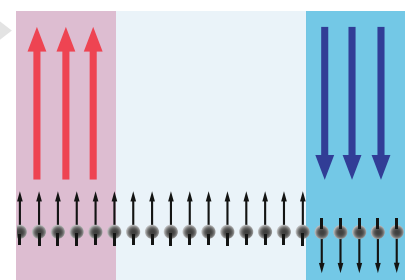
difier le spin. C'est ainsi que la tête de lecture détecte l'orientation de la magnétisation sur le disque dur. L'effet appelé «Magnétorésistance géante» a été découvert en 1988 par des chercheurs en Allemagne et en France, récompensés en 2007 par le prix Nobel de Physique.

Assez lents uniquement au PSI

Les scientifiques du monde entier travaillent sur l'amélioration de couches magnétiques pour têtes de lecture et éléments de commutation pour ordinateurs du futur. Le PSI s'est notamment spécialisé dans l'étude des orientations magnétiques de systèmes à couches complexes. Il s'agit de mesurer les magnétisations à différentes profondeurs des couches à l'aide de muons lents.

Intérieur d'un composant spintronique. Les deux couches extérieures sont aimantées, le courant électrique passe de gauche à droite. Si les polarités magnétiques des deux couches sont en opposition, seuls les électrons dont le spin est parallèle au champ magnétique peuvent passer, le courant est par conséquent réduit de moitié et apparaît sous forme de magnétorésistance, puisque les deux directions du spin existent à peu près au même nombre.

Les muons sont des particules élémentaires fabriquées artificiellement. Elles se désintègrent au bout de quelques microsecondes, une durée de vie qui convient parfaitement aux chercheurs. Le muon reste coincé dans la couche magnétique et son spin s'aligne parallèlement avec le champ magnétique. Ensuite le muon se désintègre en émettant, en direction de son spin, une autre particule qui sera détectée. Plusieurs groupes de chercheurs du monde travaillent avec les muons. Mais il est difficile de produire des muons suffisamment lents pour couches magnétiques. Les sources ordinaires émettent des muons trop rapides, pénétrant trop profondément dans le matériau. De plus, la profondeur de pénétration varie fortement. Les chercheurs du PSI sont les seuls capables de générer des muons suffisamment lents pour analyser les couches d'éléments spintroniques. Pour cette raison, les visites de groupes de chercheurs du monde entier sont fréquentes dans l'installation suisse.



Les câbles de l'avenir

La supraconductivité est connue depuis 100 ans. Mais du fait que ce phénomène n'apparaît normalement qu'aux températures très basses, les applications restaient limitées à la recherche. La découverte de la supraconductivité aux températures critiques élevées en 1986 a remis l'espoir aux applications industrielles au premier plan. Son mécanisme n'est toutefois pas encore totalement compris, ce qui explique le manque de bases pour la recherche ciblée de nouveaux supraconducteurs aux performances meilleures.

En se servant de faisceaux à neutrons, les chercheurs du PSI espèrent élucider les secrets de la supraconductivité à températures critiques élevées.

Les matériaux supraconducteurs permettent le passage du courant sans la moindre résistance. Mais pour devenir supraconducteur, le matériau doit être refroidi en dessous de son point critique, appelé point de transition, se situant à environ -269 °C selon le matériau. Le refroidissement à ces températures très basses nécessite de l'hélium liquide qui est coûteux. Le premier supraconducteur à température critique élevée a été découvert en 1986 au laboratoire de recherche suisse IBM à Rüslikon. Le point critique de l'oxyde de cuivre à l'yttrium-baryum est à -180 °C , soit au-dessus du point d'ébullition de l'azote (-196 °C). C'est intéressant

puisque l'azote liquide est bon marché et plus facile à manipuler que l'hélium liquide. Ce matériau ouvre donc un vaste champ d'applications.

Utilisation de supraconducteurs

Un domaine d'application important pour les supraconducteurs sont les électroaimants utilisés dans certains accélérateurs du PSI, par exemple pour la génération de protons pour le traitement médical de certaines formes de cancers (protonthérapie). Les bobines d'électroaimants utilisées dans ces aimants sont fabriquées par



Une autre manifestation de la supraconductivité est la lévitation magnétique, connue sous le nom d'effet Meissner, illustré ici par le modèle d'un train glissant au-dessus d'un aimant supraconducteur.



fil supraconducteurs de seulement quelques micromètres d'épaisseur, mais longs de plusieurs kilomètres. Les supraconducteurs à température critique élevée sont cependant composés de matériaux céramiques très cassants et difficiles à travailler. Pour cette raison, on utilise des supraconducteurs classiques en alliages métalliques aux températures critiques très basses. Les bobinages sont court-circuités pour que le courant puisse y circuler infiniment et sans pertes. Pour amorcer la circulation du courant, une petite partie de la bobine est chauffée au-dessus du point critique. Le courant y est introduit par les branchements. Dès que l'ampérage voulu est atteint, la partie partielle de la bobine est de nouveau refroidie en dessous du point critique afin de refermer le circuit du courant. Pour maintenir le champ magnétique, il suffit ensuite de rajouter périodiquement de l'hélium liquide. Un exemple sont les installations de la tomographie médicale à résonance magnétique (MRI). Une autre caractéristique bien utile est l'importante densité de courant des supraconducteurs. Pour transporter un certain ampérage, la section d'un supraconducteur peut être nettement en dessous de celle nécessaire à un conducteur en cuivre à température ambiante. De tels câbles à supraconducteur à température critique élevée peuvent être refroidis à l'azote. Isolation et refroidissement comprise, un câble supraconducteur peut transporter une densité de courant cinq fois supérieure à celle d'un câble en cuivre du même diamètre. Toutefois, les câbles sont 6 à 8 fois plus chers. Depuis le mois d'avril 2008, 660 m d'un

tel câble sont en service à Long Island à New York. Dans les métropoles, il manque souvent simplement la place pour les câbles supplémentaires en cuivre. L'utilisation de câbles supraconducteurs à prix élevé peut alors s'avérer rentable.

A la poursuite du phénomène

Contrairement au mécanisme des supraconducteurs classiques à très basse température, celui de la supraconductivité à température critique élevée n'est pas encore compris. En bombardant les échantillons de neutrons, les chercheurs du PSI peuvent connaître le positionnement d'atomes et peuvent en déduire les caractéristiques électroniques du supraconducteur. Dans un conducteur ordinaire, la résistance électrique est due aux collisions entre les électrons du matériau. La situation ressemble à celle qui existerait sans feux de circulation sur les routes à plusieurs voies dans une capitale comme la ville de Zürich. Certaines voies devraient de temps à autre être fermées en raison de collisions et accidents et provoqueraient des embouteillages. En présence de feux de signalisation, il y a une sorte de «concertation» entre les voitures: les voitures démarrent tous en même temps, se comportent idéalement comme un collectif et peuvent ainsi profiter des feux de

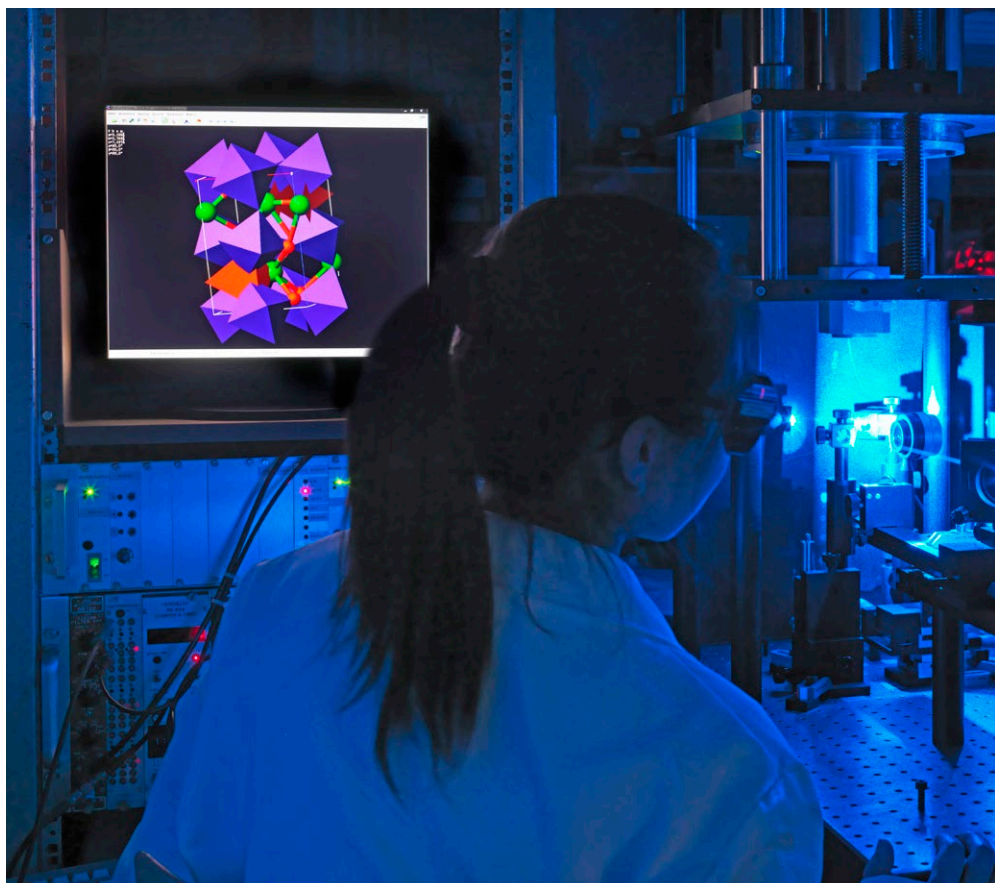
signalisation synchronisés. Les électrons d'un supraconducteur, semblent établir une «entente» similaire qui leur permet de parcourir le matériau sans la moindre résistance. Contrairement à la supraconductivité à très basse température, on ne comprend pas encore la façon dont les électrons organisent cette «entente». Cependant, les scientifiques sont convaincus que l'interaction du magnétisme avec la supraconductivité y joue un rôle important. Pour mieux comprendre, les chercheurs du PSI empilent alternativement différentes couches de supraconducteurs et matériaux aimantés, les bombardent de rayons X, de neutrons et de muons et examinent leurs caractéristiques. Ils espèrent pouvoir obtenir de nouveaux renseignements leur permettant de trouver le mécanisme expliquant la supraconductivité à température critique élevée de certains matériaux. On peut imaginer des matériaux aux températures critiques encore plus élevées dont le refroidissement sera plus simple et plus économique. Comme vision du futur reste le rêve de remplacer partout les câbles en cuivre actuels, perdant inutilement beaucoup d'énergie sous forme de chaleur, par des supraconducteurs. Le courant pourrait alors être transporté sans perte sur de grandes distances et facilement stocké. Ces deux aspects sont actuellement un défi important pour l'exploitation de sources renouvelables d'énergie.

Aimants sous tension

Les ordinateurs du futur offriront des capacités de stockage immenses dans un minimum de volume. L'accès aux données sera beaucoup plus rapide et même une panne de courant n'entraînera jamais la perte d'informations. Les chercheurs travaillent aujourd'hui sur les bases de ces systèmes.

Grâce à la boussole – l'une de ces plus anciennes applications – le ferromagnétisme était déjà connu dans la Chine ancienne. Initialement, les matériaux ferromagnétiques ne sont pas magnétiques, mais peuvent être magnétisés par un champ magnétique externe intense. Après disparition du champ, une partie du matériau reste magnétisée – c'est ainsi que l'aiguille de la boussole est magnétisée et indique le champ magnétique de la terre. Pour lire et écrire les informations, les disques durs d'ordinateurs utilisent aussi l'effet de la rémanence magnétique.

Outre le magnétisme, d'autres phénomènes ferriques comme la ferro- ou piézoélectricité sont bien connus. Le briquet piézoélectrique en est une application largement répandue: En appuyant sur la touche, un petit pilon frappe un cristal piézoélectrique. Le cristal subit une déformation et génère une brève impulsion de tension pouvant atteindre les 15 000 Volts, qui, amenée à deux contacts distant de quelques dizaines de millimètres, produit l'étincelle qui allume le gaz sortant du réservoir du briquet.



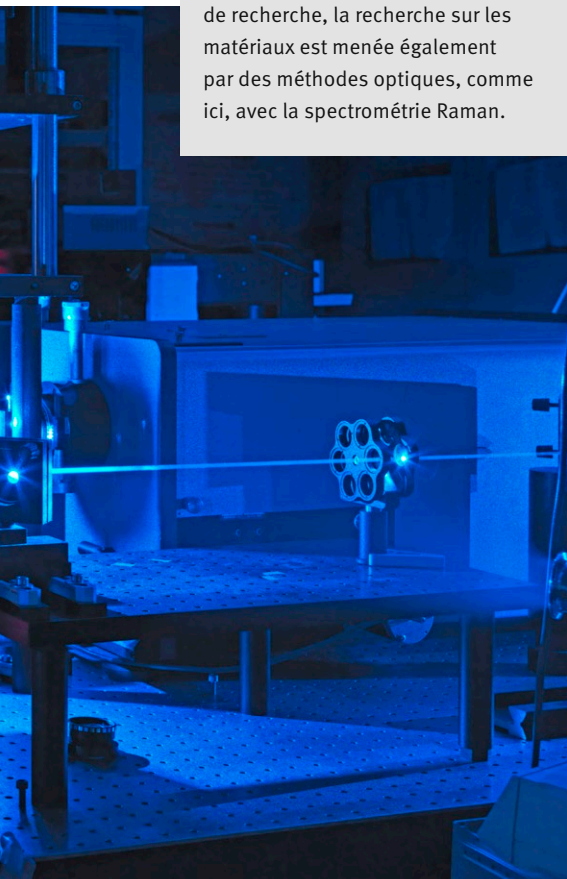
Combiner les caractéristiques

Magnétisme et ferroélectricité sont des propriétés qui n'existent pas en même temps dans les matériaux naturels. Les scientifiques se posent donc des questions sur l'existence de multiferroïques, les matériaux réunissant à la fois un ordre magnétique et ferroélectrique. Si ce type de matériau existait ou pouvait être créé: est-ce que l'effet serait suffisamment fort pour générer des applications? L'effet magnéto-électrique de telles interactions serait particulièrement intéressant. Une tension élec-

trique pourrait modifier l'ordre magnétique et inversement un champ magnétique pourrait modifier l'ordre ferroélectrique de ces matériaux. En mettant un tel matériau dans un champ magnétique, on pourrait mesurer une tension électrique. Les premiers projets de recherche ont été effectués en Union Soviétique, il y a 50 ans. L'effet trouvé par les physiciens dans des matériaux réunissant magnétisme et ferroélectricité était toutefois trop faible pour être exploitable en matière.

Les matériaux multiferroïques seraient idéaux pour dispositifs de sauvegarde

Parallèlement aux mesurages effectués aux grandes installations de recherche, la recherche sur les matériaux est menée également par des méthodes optiques, comme ici, avec la spectrométrie Raman.



tiques pourraient ici être influencés par l'application d'une tension électrique. La mémoire peut être écrite et lue sans génération, ni détection d'un champ magnétique. Cela fonctionne beaucoup plus rapidement que l'écriture dans les disques durs actuels et consomme moins d'énergie. Les composants mobiles d'un disque dur pourraient être supprimés et les disques en rotation rapide, sensibles aux vibrations, seraient superflus.

La recherche ne est qu'au début

En fonction de la faisabilité de matériaux multiferroïques et des propriétés à examiner ou à découvrir, les scientifiques du PSI utilisent à la fois des

spécimens épais et des pellicules très minces. S'il s'agit de couches minces, les très petits volumes de ces matériaux – environ 100 000 fois plus petits qu'une goutte d'eau – sont un défi majeur pour les mesures. En plus, la majorité de ces matériaux sont des isolants et la mesure de leur résistance électrique n'est pas aussi simple. Pour mieux comprendre les mécanismes électroniques et magnétiques, ce type de matériau doit également être exploré à l'aide de rayons X, de neutrons ou muons dans des grandes installations de recherche.

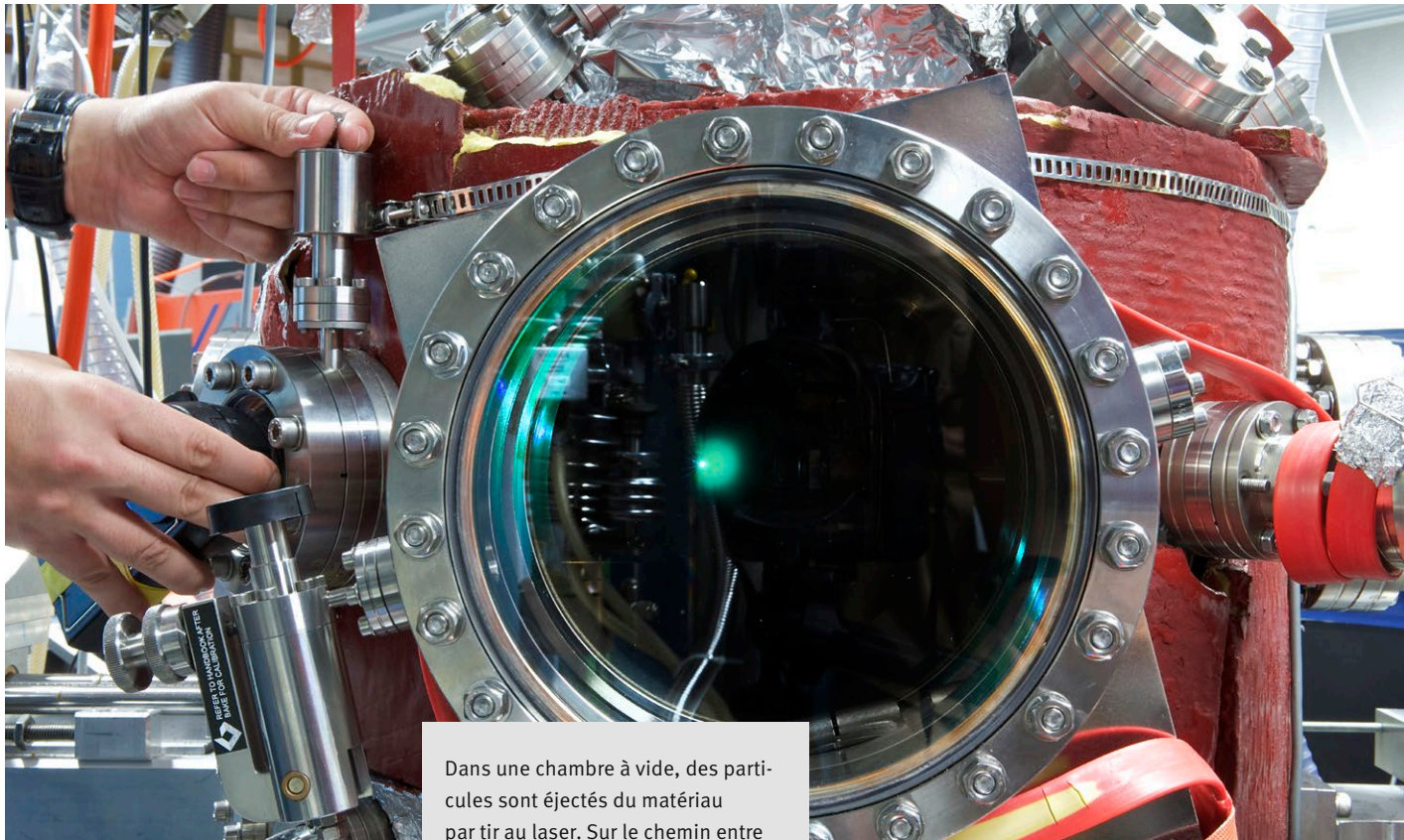
La recherche dans ce domaine est encore jeune. Mais si les scientifiques comprennent prochainement les multiples interactions du magnétisme et de la ferroélectricité dans ces matériaux, ils seront également capables de fabriquer ces matériaux aux propriétés inédites. Cela pourrait créer de toutes nouvelles applications.

de données. Sur un disque dur traditionnel, les informations sont sauvegardées sous forme de bits. Chaque bit pourrait être imaginé comme un microscopique barreau aimanté. Si son pôle nord est orienté vers le haut, le barreau représente un UN numérique, s'il est orienté vers le bas, il représente un ZERO. Un disque dur comporte plusieurs milliards de bits. Les données sont écrites et lues à l'aide d'un courant passant dans une tête d'écriture et lecture magnétique. Les multiferroïques ont la même structure de base, à la différence près que les bits magné-

Couches minces déposées sur monocristaux. Les matériaux multiferroïques sont déposés sur le substrat par impulsions laser et préparés pour le mesurage à effectuer.



Les détails intérieurs sont importants



Dans une chambre à vide, des particules sont éjectées du matériau par tir au laser. Sur le chemin entre matériau et support (de gauche à droite) les particules émettent une lumière verte.

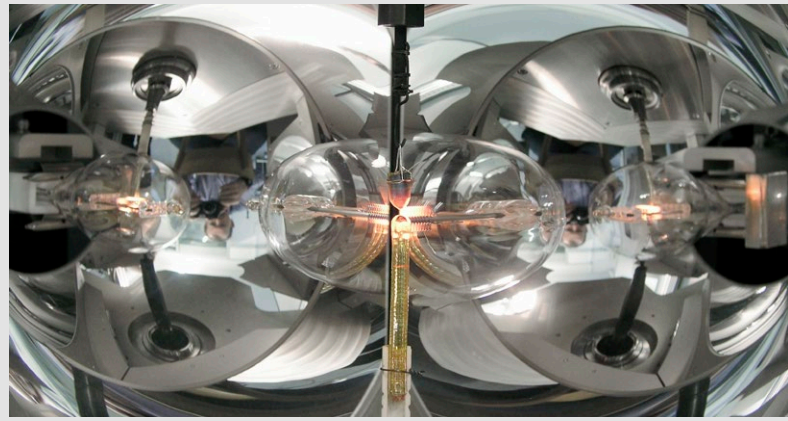
Découvrir la propriété intéressante d'un matériau est une chose. La comprendre en est une autre. Les expérimentations visant à connaître à fond les propriétés, nécessitent des matériaux dans leur version la plus pure puisque le moindre écart de la structure idéale risque d'altérer le comportement. C'est tout un art de fabriquer les échantillons d'un matériau dont les milliards de structures basiques sont rigoureusement identiques.

Ce sont les nouvelles propriétés qui rendent les nouveaux matériaux intéressants pour les applications – par exemple la capacité des supraconducteurs

d'acheminer l'électricité dans les conducteurs sans la moindre résistance ohmique. Bien que ces propriétés soient utiles, la manière de leur apparition n'est souvent pas claire. Pour tenter de décoder le mystère, les chercheurs étudient les interactions à l'intérieur du matériau et essaient d'observer ce qui se passe au niveau d'atomes et électrons, les plus petits

composants de la matière. Ils parlent alors de la détermination des structures statiques et dynamique du matériau. Pour mener ces études et expériences, ils ont besoin d'un échantillon du matériau. Et cet échantillon ne doit comporter que ce matériau, ce qui complique considérablement sa fabrication. On ne veut voir que les propriétés de ce matériau et pas celles d'une autre substance ajoutée. Il ne suffit pas d'utiliser le bon matériau, il faut également que la structure de ses molécules corresponde exactement à la forme idéale du matériau. Toute différence risque de générer des effets indésirables. On admet que dans un milliard de molé-

Vue du centre d'un four à miroirs, large de 40 cm, pour la création de monocristaux de grandes dimensions. Un faisceau de lumière fait successivement fondre les sections d'un cylindre polycristallin qui, en refroidissant, adopte le réseau parfait d'un monocristal.



cules parfaites quelques-unes puissent être affectées de défauts. C'est comme si dans une bibliothèque de plusieurs milliers de volumes on ne tolérerait que quelques coquilles d'impression sans que toute la bibliothèque soit sans valeur.

Création de cristaux parfaits

Les chercheurs ont développé de nombreuses méthodes pour la fabrication d'échantillons appropriés – par exemple pour créer des cristaux. Un cristal est un matériau dans lequel les composants sont disposés régulièrement et forment un réseau cristallin répétitif. Normalement, les matériaux cristallins, donc également les métaux, sont composés d'une multitude de minuscules cristaux disposés irrégulièrement. Pour fabriquer un tel matériau «polycristallin», les chercheurs commencent par faire fondre le matériau, ce qui crée un état de parfait désordre puisque dans une fonte tous les atomes se déplacent librement. En refroidissant la fonte, les atomes, à l'intérieur de leur environnement, se regroupent dans un ordre cristallin. Les minuscules cristaux formés poussent à différents endroits, dans différentes directions et ne correspondent pas quand ils se rencontrent.

Un tel échantillon polycristallin est souvent tout à fait suffisant pour les expérimentations. Mais pour d'autres recherches, ce désordre cristallin ne convient pas, puisqu'il risque de cacher les véritables caractéristiques du matériau. Les frontières entre les différents mini-cristaux d'un matériau po-

lycristallin peuvent par exemple freiner le passage du courant bien que le matériau pur soit un excellent conducteur.

Dans ces cas, les chercheurs ont besoin de monocristaux, c'est-à-dire des volumes d'un matériau plus importants dont le réseau cristallin se poursuit parfaitement. Pour fabriquer un monocristal on peut par exemple commencer par un petit cylindre polycristallin de la taille d'un crayon feutre. A l'aide d'une lumière très intense, on fait fondre la section à l'extrémité du crayon et la fait refroidir lentement pendant que la source de chaleur se déplace vers le haut. De cette façon, les atomes ont suffisamment de temps pour se placer dans l'ordre idéal de leur structure cristalline. La source de chaleur passe à la section du cylindre immédiatement au-dessus. Les atomes dans la fonte de cette section adoptent alors la structure idéale, formée par la section en dessous. Après avoir ainsi refondu toutes les sections du cylindre, on possède le matériau sous forme d'un monocristal. Ce procédé assez lent peut demander quinze jours. Mais il fournit le matériau multiferroïque ou supraconducteur à état pur. Il suffit ensuite à découper le cylindre en rondelles pour les examiner à l'aide de neutrons ou de la lumière synchrotron.

Matériaux en couches minces apportent de l'aide

Réaliser de cette manière un monocristal n'est hélas pas toujours possible. Certains matériaux sont trop liquides, d'autres ne fondent qu'aux températures très élevées. Le gallium par exemple se liquéfie déjà en dessous de 30°C, tandis que le tungstène demande plus de 3400°C pour fondre. Pour obtenir des échantillons cristallins de ces matériaux, les chercheurs fabriquent des couches minces.

Cette méthode fait évaporer le matériau, part donc également d'un état de parfait désordre. A condition d'utiliser un laser suffisamment puissant, il est possible d'évaporer n'importe quel matériau, même le tungstène. Si c'est exécuté correctement, le matériau évaporé sous vide se dépose facilement sur un support de préférence très plat. Le tout se passe bien sûr sous vide, afin d'assurer qu'il n'y ait pas de molécules d'air dans l'échantillon. Le cristal obtenu par évaporation est toujours mince et ne compte qu'un maximum de 10 000 couches d'atomes, soit un millième de millimètre ou parfois encore mille fois plus mince. Bien que ces couches minces ne permettent pas toutes les expérimentations, elles fournissent souvent de connaissances précieuses dans le domaine de la spintronique ou de la supraconductivité lorsque les scientifiques les auscultent à l'aide de rayons X, de neutrons ou de muons.

Les outils de la science

Plus les structures sont petites, plus les installations pour les observer doivent être grandes. Le site du PSI héberge quatre grandes installations de recherche uniques au monde: la Source de Lumière Suisse SLS, la Source de Neutrons de Spallation Suisse SINQ, la Source de Muons Suisse μS et le laser à rayons X à électrons libres SwissFEL – la plus récente d'entre elles.

Les scientifiques experts en matériaux ont comme objectif la connaissance des mécanismes qui sont à la base des propriétés spécifiques des matériaux. Ces connaissances leur permettent de développer de nouveaux matériaux ou d'améliorer les matériaux existants. Les scientifiques du PSI déterminent les propriétés des matériaux à l'aide d'une multitude d'outils allant du simple Ohmmètre pour la mesure de la résistance électrique jusqu'aux appareils complexes pour la mesure des caractéristiques optiques d'un matériau. Outre ces appareils de mesure hautement spécialisés, disponibles dans de nombreux laboratoires du PSI, les scientifiques ont également besoin d'instruments de recherche à dimensions imposantes, ressemblant à des microscopes géants, pour observer en profondeur les matériaux. Car en fin de compte, les caractéristiques d'un matériau sont toujours déterminées par la disposition des atomes et les forces de leur liaison. Les experts parlent de structures statiques et dynamiques du matériau.

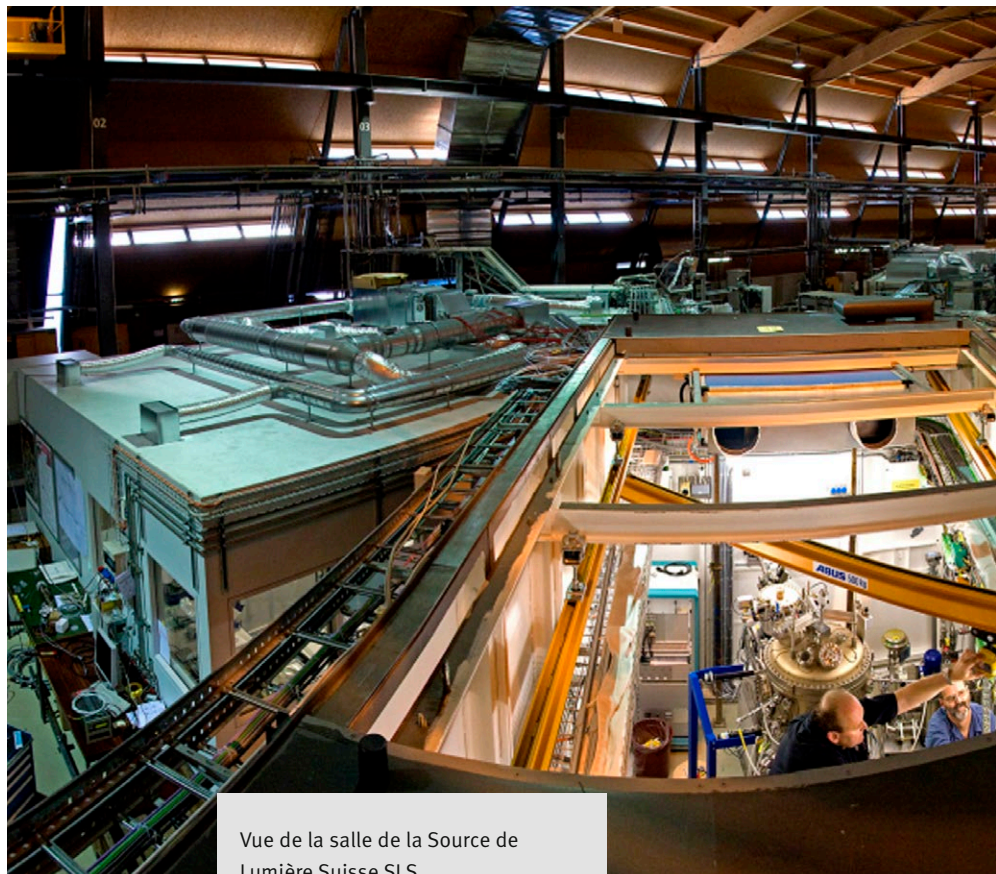
Lumière synchrotron

Les longueurs d'onde de la lumière visible pour l'œil humain sont à peu près mille fois plus importantes que les distances entre les atomes d'un matériau. Pour cette raison, les atomes ne sont pas visibles à la lumière «normale», même pas avec les meilleures loupes. Les chercheurs du PSI utilisent donc la source de lumière synchrotron. Celle-ci produit une lumière dont les longueurs d'onde sont invisibles à l'œil, les rayons X.

Les rayons X sont produits en freinant fortement les électrons. Les électrons doivent d'abord être accélérés à une

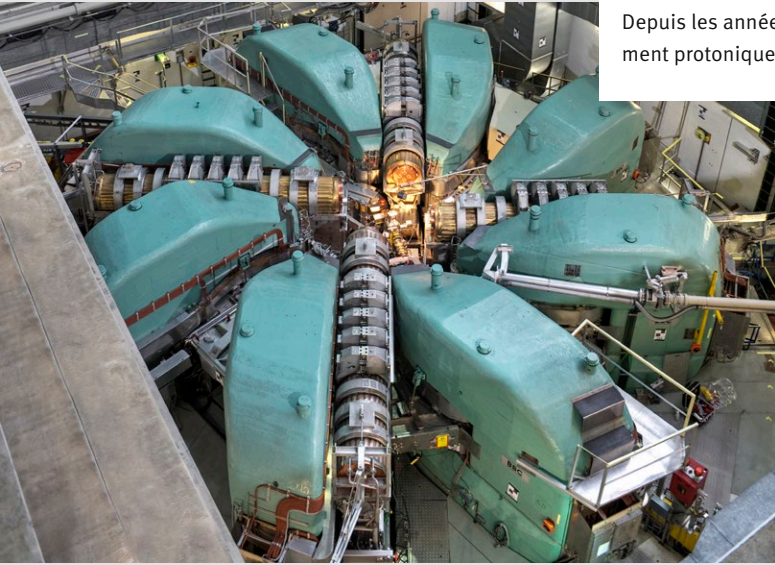
vitesse élevée. Ceci se fait comme dans un téléviseur à tube: les électrons, émis par un filament incandescent, sont accélérés par la haute tension entre deux plaques métalliques. Dans le téléviseur, ce faisceau d'électrons produit l'image à l'écran. Dans un appareil à rayons X, la tension est plus élevée et les électrons bombardent une pièce de métal. Ils y sont tellement ralentis qu'ils émettent des rayons X.

Ces rayons X, comme par exemple utilisés dans la médecine, ne sont toutefois pas assez percutants et ne couvrent pas non plus toute la gamme d'ondes nécessaires à de nombreuses applications. Ainsi, pour la SLS, les électrons



Vue de la salle de la Source de Lumière Suisse SLS.

L'accélérateur de protons du PSI. Son rayonnement produit les neutrons et muons nécessaires aux expérimentations du PSI. Depuis les années 1970 il détient le record mondial du rayonnement protonique le plus intense.



gênant du fait que les opérateurs doivent constamment rajuster leurs appareils pour tenir compte de cette diminution. Au PSI par contre, les électrons perdus en cours de route sont remplacés toutes les 4 à 5 minutes et l'intensité du faisceau reste quasiment constante.

sont accélérés pratiquement à la vitesse de la lumière. A cette vitesse, ils entrent dans l'anneau de stockage dont le diamètre fait environ 300 mètres. Ici ils tournent en rond, dans un tube métallique sous vide, sans risque de

collision avec des molécules d'air. Cet anneau est composé de courtes distances droites à la fin desquelles se trouvent des aimants destinés à dévier légèrement les électrons accélérés pour qu'ils restent au centre de l'anneau.

Vu la vitesse des électrons, la petite déviation, induite par les aimants, représente une accélération suffisante pour qu'ils émettent – comme lors de la collision d'électrons avec une pièce en métal – des rayons X, appelés lumière synchrotron. Depuis quelques années déjà, les chercheurs du PSI utilisent des circuits d'accélération encore plus raffinés: D'autres aimants disposés en quinconce forcent les électrons-rayons X sur un parcours ondulatoire ayant pour résultat une augmentation supplémentaire de leur intensité. Par rapport à d'autres centres de recherche, la source de lumière synchrotron au PSI possède l'avantage de rayons durables et très stables. Dans les autres installations, le faisceau électronique n'est injecté qu'une fois dans l'anneau de stockage pour y circuler pendant huit heures environ. La force du faisceau diminue alors en raison de la perte inévitable d'électrons, non remplacés. C'est un peu

Neutrons

A part des rayons X, les scientifiques utilisent encore d'autres méthodes pour scruter la matière. Les éléments chimiques légers comme l'hydrogène ou le lithium sont pratiquement transparents aux rayons X. Maintenant ce sont justement les matériaux organiques qui sont en grande partie composés de carbone et d'hydrogène. Le lithium des piles aux ions du lithium laisse passer les rayons X quasi librement. Les scientifiques ont alors recours aux neutrons qui réagissent aussi avec certains éléments très légers. Étant électriquement neutre, l'enveloppe d'atomes chargée négativement est transparente pour les neutrons. Par contre, les neutrons réagissent lorsqu'ils rencontrent le petit et lourd noyau de l'atome.

Les noyaux d'atomes sont composés de protons et de neutrons. Du fait que les neutrons n'existent que dans les noyaux, les chercheurs utilisent une astuce pour les extraire. Ils accélèrent le noyau nu de l'hydrogène, ne contenant qu'un seul neutron, et le propulsent sur un bloc de plomb. Le proton rapide heurte le noyau du plomb, contenant de nombreux protons et neutrons, et le fait vibrer très fortement.



Vue sur la salle du conducteur à neutrons. Avec un total de 18 différents instruments, souvent uniques au monde, il permet au PSI de faire examiner les matériaux à l'aide de neutrons.



Cette vibration lui fait perdre plusieurs de ses protons et neutrons. C'est ainsi que les chercheurs se procurent les neutrons.

Pour freiner ces neutrons à une vitesse appropriée aux expérimentations, le bloc de plomb est placé dans un bac d'eau lourde. Cette eau lourde (D_2O), et dans une deuxième phase de freinage le deutérium liquide (D_2), freinent les neutrons à la vitesse appropriée. Comme les rayons X, les neutrons sont ensuite dirigés sur l'échantillon à examiner où ils sont déviés et freinés en fonction de la structure atomique du spécimen. C'est ainsi que les scientifiques obtiennent les informations sur le matériau. Et puisque les neutrons se comportent comme de minuscules aimants, il est même possible d'obtenir des indications sur les caractéristiques magnétiques du matériau.

Muons

Les muons sont encore plus sensibles aux champs magnétiques à l'intérieur d'un spécimen que les neutrons. Ils restent coincés dans le matériau et y occupent des places vides entre les atomes. Un millionième de seconde après, le muon se désintègre en émettant une autre particule vers l'extérieur qui peut être détectée. En fonction de la vitesse du muon, orientation et force du champ magnétique à l'intérieur du matériau sont ainsi mesurées à différentes profondeurs de l'échantillon.

Les muons utilisés par les chercheurs doivent être générés comme un produit de la désintégration à la suite de collisions de protons avec du carbone, car la capture de muons naturels, produits dans l'atmosphère par les rayons du soleil, est impossible en raison de leur très courte durée de vie.

Mais ces muons fabriqués de toute pièce au laboratoire sont également encore trop véloces pour les expériences désirées. Le PSI s'est donc spécialisé sur la production de muons lents. Le PSI est le seul centre de recherches au monde capable de produire des muons tellement lents. Ils sont d'abord freinés par une feuille d'argent et ensuite envoyés dans un gaz inerte gelé, par exemple de l'argon. Le bloc de glace d'un gaz a le même effet sur les muons qu'une foule de personnes dans une gare à l'heure de pointe. Comme passant, on ne peut que suivre la foule, on ne peut ni courir plus vite, ni avancer plus lentement. C'est ainsi que les muons de différentes vitesses sont freinés à une vitesse uniforme qui permet aux chercheurs de fixer la profondeur de pénétration dans le matériau.

SwissFEL

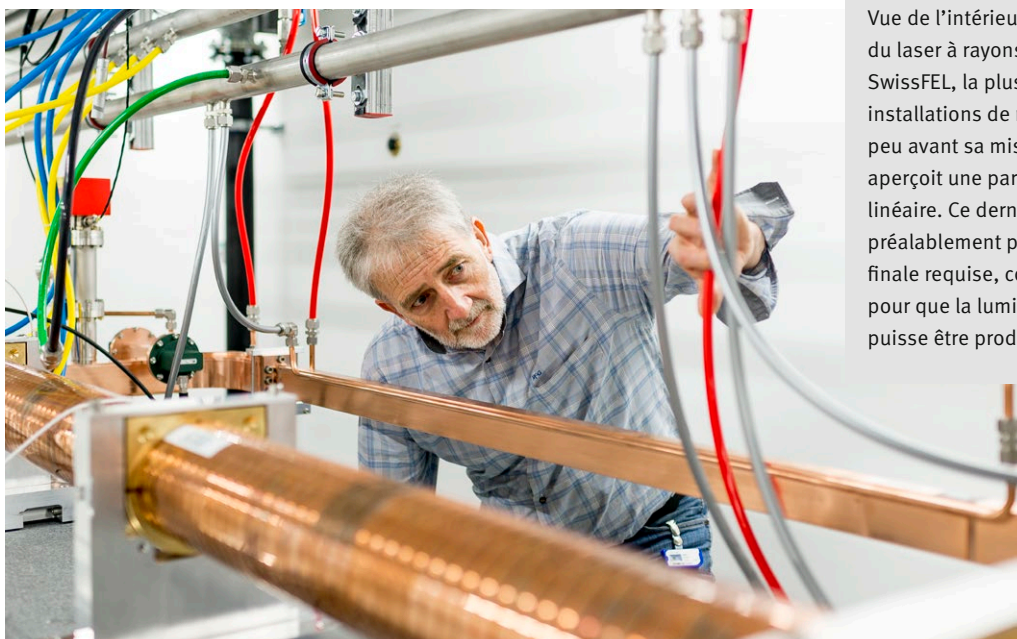
Le laser à rayons X à électrons libres SwissFEL est la plus récente parmi les grandes installations de recherche du PSI.

Les rayons X de la SLS, les neutrons de la SINQ et les muons de la μS permettent de caractériser la plupart de matériaux. Mais il y a des limites. Notamment par rapport à quelques molécules essentielles qui déterminent le fonctionnement de certaines cellules biologiques. Les cristaux de ces molécules, appelées protéines membranaires, peuvent être examinés à la SLS, mais à condition qu'elles mesurent au moins un centième de millimètre environ. Malheureusement, dans la nature et le corps humain, les protéines membranaires qui permettent la création de cristaux de cette taille sont très peu nombreuses. Et ce sont justement les structures des protéines membranaires qui intéressent le plus la recherche pharmaceutique pour le développement de nouveaux médicaments. Par ailleurs, les trois grandes installa-

tions du PSI que sont la SLS, la SINQ et la μS ne permettent pas non plus d'étudier des réactions ultrarapides, comme celles qui interviennent lors de la commutation rapide dans les multiferroïques et les matériaux utilisés pour l'exploitation de la spintronique, ou encore dans des réactions chimiques en présence d'un catalyseur. Les «temps d'exposition» sont trop longs.

Les problèmes des petits échantillons et celui des réactions ultrarapides peuvent être maîtrisés à l'aide de rayons X extrêmement puissants et de très courte durée. Or c'est précisément ces rayons X que fournit le laser à rayons X suisse à électrons libres SwissFEL, la quatrième et la plus récente parmi les grandes installations de recherche du PSI. A l'aide d'impulsions laser extrêmement courtes, on arrache des électrons à un morceau de métal, qui sont utilisés pour produire la lumière de type rayons X. Dans un accélérateur linéaire, les paquets d'électrons obtenus sont portés à l'énergie finale requise, puis tellement comprimés grâce à une série d'aménagements sophistiqués qu'ils

finissent par se comporter comme un «collectif». De manière analogue à ce qui se passe à la SLS, ces paquets d'électrons passent ensuite par un agencement d'aimants disposés en quinconce et émettent de la lumière de type rayons X. Mais contrairement aux rayons X émis par le synchrotron, il s'agit ici de rayons quasiment cohérents ou «en phase». L'intensité de ces impulsions de rayons X est plusieurs milliards de fois plus intense que la «lumière» de la SLS et dispose de propriétés qui permettent d'obtenir des images nettes même des échantillons les plus petits. Ces impulsions de rayons X sont aussi suffisamment courtes pour livrer des images nettes de procédés physiques, chimiques et biologiques ultrarapides. Les images en question peuvent être ensuite assemblées pour former un film, qui permettra aux chercheurs d'étudier les phénomènes au ralenti et d'acquérir les connaissances nécessaires au développement de nouveaux matériaux et de technologies futures.



Vue de l'intérieur du canal de faisceau du laser à rayons X à électrons libres SwissFEL, la plus récente des grandes installations de recherche du PSI, peu avant sa mise en service. On aperçoit une partie de l'accélérateur linéaire. Ce dernier porte les électrons préalablement produits à l'énergie finale requise, condition nécessaire pour que la lumière de type rayons X puisse être produite.

Vue aérienne de l'Institut
Paul Scherrer.



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/rédaction

Dagmar Baroke
Dr. Thomas Lippert
Thomas Meier
Dr. Paul Piwnicki
Guido Santner
Dr. Thierry Strässle

Photos

Scanderbeg Sauer Photography
Frank Reiser
Markus Fischer
Roland Keller

Design et maquette

Monika Blétry

Impression

Paul Scherrer Institut

Commandes à adresser à

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

Villigen PSI, octobre 2018

Contacts

Chef de la division de recherche Recherche avec neutrons et muons

Dr. Alex Amato a.i.
Tél. +41 56 310 32 32
alex.amato@psi.ch

Chef de la division de recherche Sciences Photoniques

Prof. Dr. Gabriel Aeppli
Tél. +41 56 310 42 32
gabriel.aeppli@psi.ch

Chef de la division de recherche Energie nucléaire et sûreté

Prof. Dr. Andreas Pautz
Tél. +41 56 310 34 97
andreas.pautz@psi.ch

Chef de la division de recherche Energie et environnement

Prof. Dr. Thomas J. Schmidt
Tél. +41 56 310 57 65
thomasjustus.schmidt@psi.ch

Chef du département Communication

Dr. Mirjam van Daalen
Tél. +41 56 310 56 74
mirjam.vandaalen@psi.ch

Paul Scherrer Institut :: 5232 Villigen PSI :: Suisse :: Tél. +41 56 310 21 11 :: www.psi.ch

Materialen für die Zukunft_f, 05/2023

