



# Les neutrons et les muons au service de la science

Recherches à l'Institut Paul Scherrer

Préparation d'une expérience avec des muons.



# Table des matières

4	Les neutrons et les muons en 90 secondes	18	Découvrir des matériaux
		18	Microgels
		19	Fabriquer des matériaux intelligents
		19	Comprendre les supraconducteurs
6	Énergie et transport	20	S'engager avec l'industrie
6	Voir les batteries de l'intérieur	20	Les universités, l'industrie et le PSI
6	Améliorer l'efficacité du carburant des motos	21	Résoudre des problèmes industriels
7	Tests de contrainte des pales de turbine	21	Développer de nouvelles technologies
		21	Compagnie d'essaimage
		21	Une future source neutronique pour l'Europe
8	Terre et environnement	22	A l'intérieur de la Source de Muons Suisse $\mu$ S
8	Assainir les sols avec des peupliers		
8	L'eau dans les argiles		
9	Regarder pousser les plantes		
10	Alimentation, santé et médecine	24	Utiliser les neutrons et les muons
10	La vie secrète des bulles	25	Qu'est-ce qu'un neutron?
10	Une recette pour une alimentation saine	25	Qu'est-ce qu'un muon?
11	Copier la nature pour la médecine		
12	A l'intérieur de la Source de Neutrons de Spallation Suisse SINQ	26	Produire des neutrons et des muons
		26	Accélérer les protons
		26	Produire des neutrons
		26	Produire des muons
14	Héritage et culture	28	C'est grâce à nous
14	Techniques de fabrication d'une hache de l'Age de bronze		
15	Prédire les dommages dus au sel sur les bâtiments		
16	Électronique et technologie	31	Le PSI en bref
16	Spintronique	31	Impressum
16	Mesurer les grains magnétiques	31	Contacts
17	Sandwichs moléculaires		

## Photo de couverture

Des expériences avec les neutrons et les muons permettent aux scientifiques d'effectuer des mesures à l'intérieur des matériaux et de découvrir où se trouvent les atomes et ce qu'ils font.

# Les neutrons et les muons en 90 secondes

L'Institut Paul Scherrer PSI est le berceau de trois grands instruments de recherche: la Source de Neutrons de Spallation Suisse SINQ, la Source de Muons Suisse SpS et la Source de Lumière Suisse SLS. Le PSI est le plus grand centre de recherche en Suisse pour les sciences naturelles et les sciences de l'ingénierie.

En utilisant les grandes installations de recherche du PSI, les scientifiques ont accès à une vue exceptionnelle du monde intérieur des matériaux. Leurs mesures font la connexion entre les positions microscopiques et le mouvement des atomes avec les propriétés que l'on trouve dans la vie de tous les jours.

Le confort et la facilité de la vie moderne reposent sur des décennies de recherche et de développement par les scientifiques et les ingénieurs. Grâce à leurs explorations minutieuses, des utilisations potentielles de matériaux naturels et artificiels peuvent se concrétiser.

Les matériaux sont partout: dans les vélos légers et les voitures économes en carburant, les implants chirurgicaux, les maisons écoénergétiques, l'acheminement quotidien de produits frais du fournisseur au supermarché, les téléphones mobiles qui permettent de se connecter immédiatement avec sa famille ou ses amis, et dans bien d'autres choses encore.

Au PSI, les faisceaux de neutrons et de muons sont utilisés pour la recherche sur les matériaux. Les faisceaux sont générés en projetant des protons à partir d'un accélérateur de particules sur des cibles en plomb ou en carbone. L'accélérateur, un chef d'œuvre de l'ingénierie suisse, produit le faisceau de protons le plus intense au monde.

Les neutrons sont des particules abondantes dans la nature. Avec les protons et les électrons, ils forment les atomes, les composants élémentaires du monde naturel. Les neutrons sont fortement liés avec les protons dans le noyau atomique.

Les muons sont des particules élémentaires qui peuvent être implantés dans les sites interstitiels entre les atomes à l'intérieur d'un matériau pour détecter ce qu'il y a autour d'eux. Ils ont une charge électrique et sont plus lourds que les électrons mais plus légers que les protons.

Plus de 2500 scientifiques de Suisse et du monde entier viennent au PSI chaque année pour réaliser des expériences. Entre autres ils utilisent les faisceaux de neutrons et de muons pour illuminer leurs matériaux et découvrir leurs propriétés microscopiques.

Chaque jour, des découvertes faites au PSI sont utilisées pour faire avancer la science et résoudre des problèmes de l'industrie.

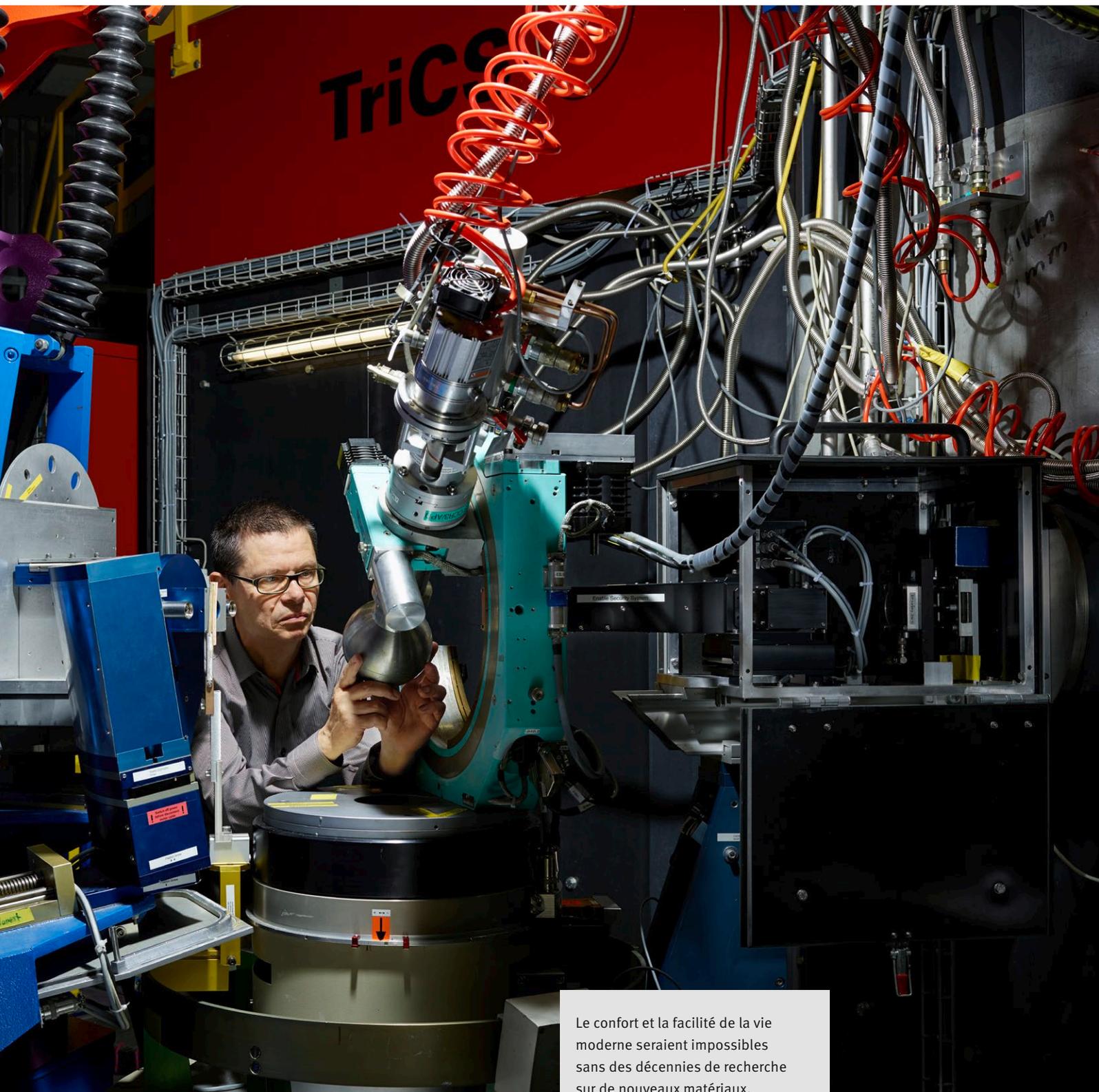
Vous trouverez plus de renseignements sur la recherche au PSI avec les neutrons ou les muons sur les pages suivantes.

<http://psi.ch/LD19>



<http://psi.ch/Qxck>





Le confort et la facilité de la vie moderne seraient impossibles sans des décennies de recherche sur de nouveaux matériaux.

# Énergie et transport

La demande en énergie étant en constante augmentation, les moyens de réduire la consommation de carburant et d'améliorer l'efficacité énergétique sont des sujets de préoccupation croissante. Les faisceaux de neutrons et de muons du PSI sont de plus en plus utilisés pour les recherches liées à l'énergie.

## Voir les batteries de l'intérieur

Les batteries rechargeables sont utilisées partout, dans les jouets, les dispositifs électroniques et les véhicules électriques. Les batteries nickel-hydrure métallique couramment utilisées n'étaient jadis que des curiosités de laboratoire. Les matériaux développés au cours des 20 dernières années permettent maintenant de les recharger de nombreuses fois. Le développement des batteries est un processus continu et les faisceaux de neutrons et de muons du PSI sont régulièrement utilisés par les fabricants.

Une batterie nickel-hydrure métallique typique de type A-A (NiMH) est un miracle compact de la science que vous pouvez transporter dans votre poche.

A l'intérieur de la batterie, deux bandes de métal séparées par une feuille isolante sont roulées et placées dans le boîtier métallique. Le boîtier est rempli d'un liquide électroconducteur et scellé au moyen d'un couvercle. La borne positive est formée d'un composé de nickel et la borne négative est faite dans une substance connue sous le nom d'hydrure métallique.

Lors du chargement de la batterie, des réactions chimiques font que le composé de nickel libère de l'hydrogène qui est absorbé par l'hydrure métallique. Lorsque la batterie est utilisée, les réactions chimiques s'inversent et génèrent un courant électrique.

En utilisant les faisceaux de neutrons, il est possible de voir à l'intérieur de la batterie et de suivre en temps réel ce qui se passe dans ses différentes parties au fur et à mesure qu'elle est chargée ou déchargée. On obtient ainsi un aperçu unique de la performance opérationnelle réelle de la batterie. Avec les faisceaux de muons, il est possible de suivre le déplacement des produits chimiques autour de la batterie.

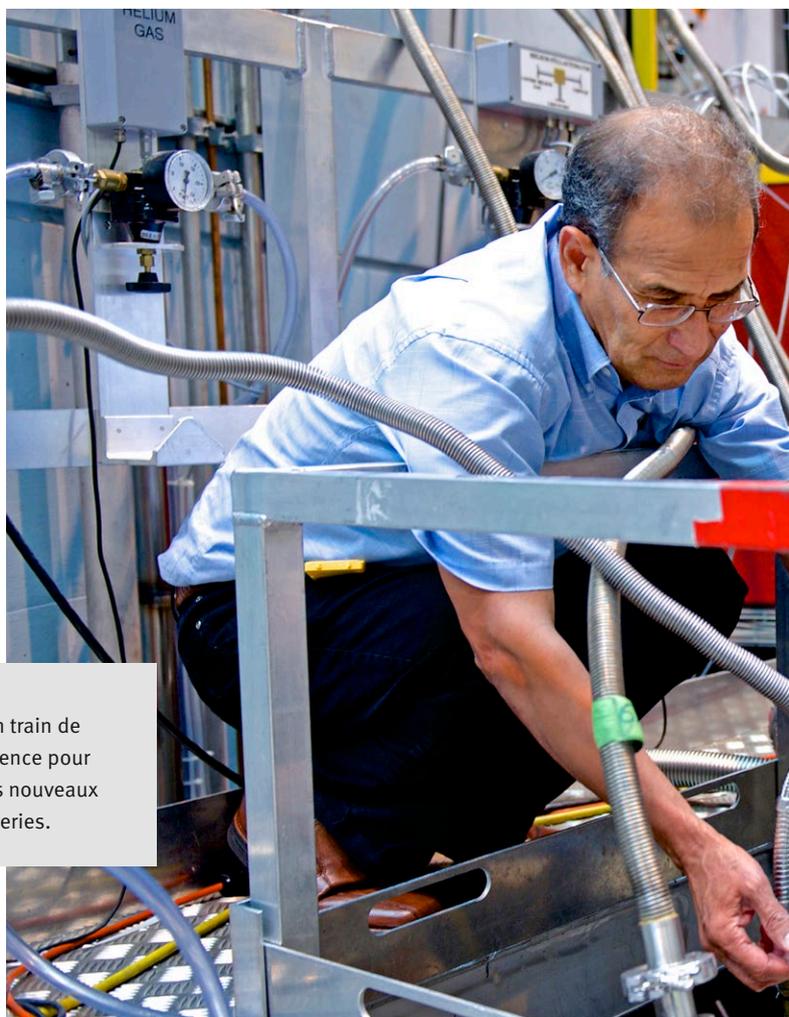
Par exemple, il est possible d'observer les changements microscopiques du volume d'un hydrure métallique pendant la charge lorsque l'hydrogène est absorbé. Le changement de volume des matériaux commerciaux de bonne qualité est fluide et réversible. Mais si les tests montrent un changement brusque plutôt que fluide du volume du matériau potentiel pour une nouvelle batterie, cela signifie que

ce matériau n'est pas approprié. En raison de ces changements brusques de volume, il serait difficile de garantir que la batterie continuerait à fonctionner après de nombreux chargements.

## Améliorer l'efficacité du carburant des motos

Les faisceaux de neutrons peuvent pénétrer les métaux. Cette propriété a été utilisée par les ingénieurs chargés de concevoir un embrayage lubrifié à l'huile. A leur grande surprise, ils ont découvert que de nombreux disques fonctionnaient à sec. Il était donc temps pour eux de revoir leur copie.

Les ingénieurs chargés de concevoir des motos sous soumis à des pressions constantes pour réduire la consommation



Des scientifiques en train de préparer une expérience pour la recherche sur des nouveaux matériaux pour batteries.

de carburant afin de répondre aux objectifs de rendement énergétique et de réduction des émissions et d'augmenter l'autonomie de leurs machines. La pompe à huile est l'une des pièces du moteur qui consomme le plus d'énergie. L'une de ses tâches principales est de lubrifier et de refroidir l'embrayage de la moto.

L'embrayage transmet la puissance et le mouvement du moteur aux roues. La conception la plus courante utilise une rangée de plateaux et de disques de friction qui, en règle générale, sont empilés ensemble mais qui peuvent être écartés pour changer de vitesse.

L'imagerie neutronique peut être utilisée pour voir directement à travers le boîtier métallique et cartographier les endroits où l'huile coule dans l'embrayage alors que le moteur tourne à une vitesse allant jusqu'à 8000 tr/mn.

Une nouvelle conception d'embrayage avait pour le but de réduire le débit d'huile dans l'embrayage afin de réduire la puissance consommée par la pompe à huile. L'huile arrive par un trou dans l'arbre de transmission, pénètre à l'intérieur de l'embrayage et se disperse sur les huit disques rotatifs de l'embrayage. En prenant des clichés neutroniques de

seulement quelques millièmes de seconde, les ingénieurs ont découvert avec surprise que seuls les trois premiers des huit disques étaient baignés d'huile. Le résultat était toujours le même et peu important la vitesse de rotation du moteur ou la vitesse à laquelle l'huile était pompée. Avec des informations aussi précises, il est possible d'adapter la conception interne des goulottes de guidage de l'huile dans l'embrayage pour parvenir à une bonne lubrification et un bon refroidissement tout en réduisant le débit d'huile.

<http://psi.ch/uhcG>



### Test de contrainte des pales de turbine

**Dans le monde entier, les turbines dans les stations électriques convertissent l'énergie des gaz chauds à écoulement rapide en mouvements mécaniques pour générer de l'électricité, à des températures allant jusqu'à 90% du point de fusion des pales des turbines. La recherche et le développement sur la performance des matériaux dans des conditions aussi extrêmes est cruciale pour améliorer l'ef-**

**ficacité énergétique et garantir un fonctionnement stable à long terme.**

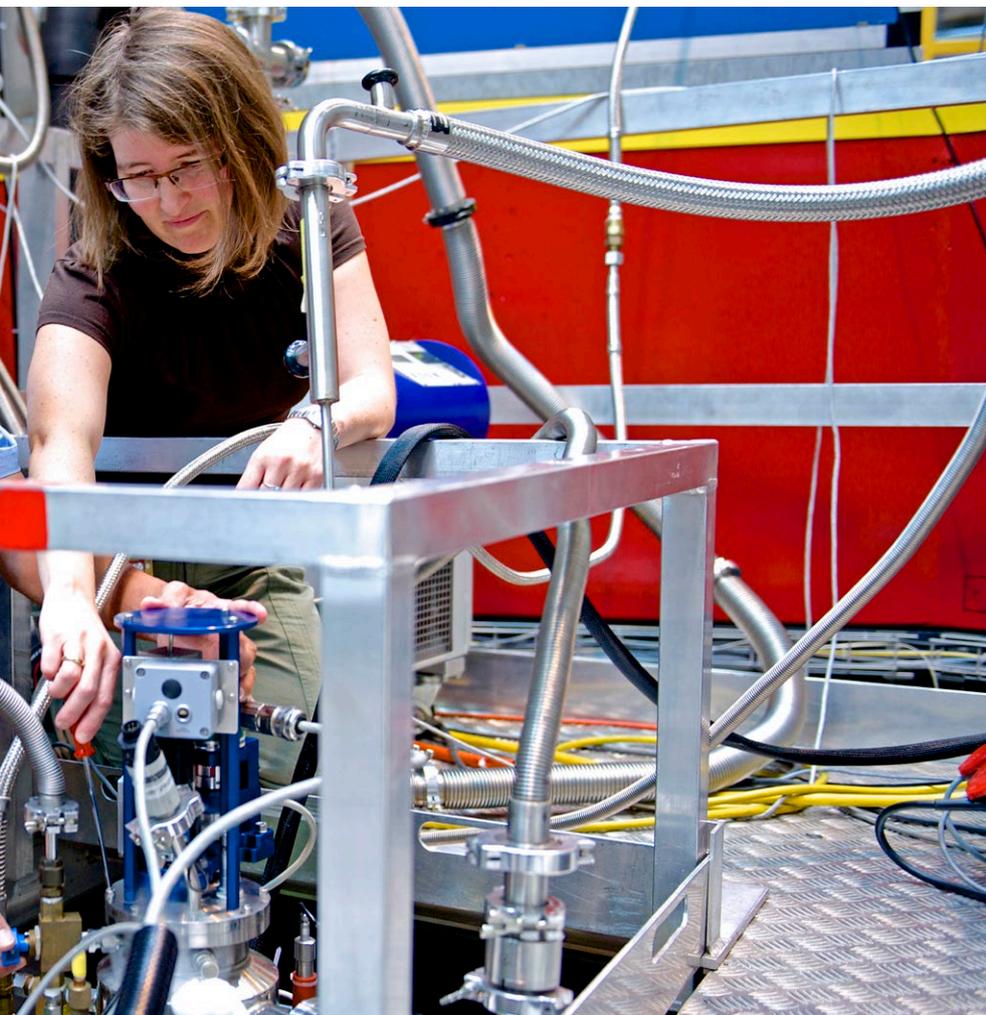
A l'intérieur des turbines à gaz, les conditions sont extrêmes. Les pales des turbines peuvent tourner à 3600 tours par minute, avec des gaz chauds qui circulent à une température de 1400 °C et qui portent la température des pales à 1000 °C.

Les ingénieurs doivent être certains que les pales peuvent supporter les conditions extrêmes trouvées à l'intérieur des turbines. Les matériaux des pales ne sont choisis qu'après avoir subi des tests exhaustifs de leur comportement pour déterminer quelles seront leurs performances. Les améliorations continues apportées aux matériaux et à la conception des pales de turbine augmentent sans cesse l'efficacité et la conversion énergétiques.

En plaçant les pales et d'autres composants des turbines dans un faisceau de neutrons, les ingénieurs peuvent réaliser des mesures in-situ en reliant le comportement sous charges appliquées des matériaux à la fine structure microscopique du composant. Les contraintes résiduelles internes provenant du processus de fabrication peuvent également être mesurées. Les contraintes résiduelles constituent des problèmes importants dans un composant car elles peuvent entraîner des fissures et des modifications imprévisibles des propriétés des matériaux.

Le PSI est un leader mondial pour les mesures des contraintes techniques in-situ en utilisant les faisceaux de neutrons et attire régulièrement des chercheurs des sociétés internationales d'ingénierie. Dans un projet récent d'étude de pales de turbine, les modifications de la microstructure d'une nouvelle conception de pale de turbine ont été imputées au processus de coulage utilisé pour fabriquer la pale. Les informations fournies par les expériences peuvent être utilisées pour optimiser les procédures de fabrication et modifier la conception aérodynamique afin d'obtenir la meilleure performance et une plus longue durée de fonctionnement.

<http://psi.ch/DdwH>



# Terre et environnement

**De nombreux enseignements peuvent être tirés des plantes et des animaux pour résoudre des problèmes courants et mieux appréhender notre place sur la Terre.**

## Assainir les sols avec des peupliers

**Le bore est l'un des éléments chimiques les plus légers que l'on trouve sur Terre et, à faibles doses, est un élément nutritif essentiel à la croissance des plantes. Des expériences réalisées avec des neutrons ont montré que les peupliers pouvaient collecter 20 fois plus de bore que les autres plantes et pouvaient être un moyen efficace de maintenir le bore aux niveaux adéquats dans les zones agricoles.**

En Turquie, les eaux usées, avec de fortes concentrations en bore, pompées des centrales électriques dans les rivières ont réduit les rendements des cultures des citronniers. En Californie, l'environnement aride et l'érosion des roches le long des chaînes côtières a entraîné une accumulation de bore dans le sol et dans les eaux souterraines et a mis l'agriculture durable en danger.

Avec les faisceaux de neutrons, il est facile de tester les plantes pour leur résistance au bore. Dans une étude, les chercheurs ont examiné l'assimilation du bore dans des peupliers, des saules pleureurs, de la moutarde brune et des lupins. Sur les quatre, le peuplier s'est révélé le plus tolérant au bore et le saule le moins tolérant. Ce résultat était surprenant étant donné que les peupliers et les saules appartiennent à la même famille.

Les chercheurs ont constaté que, dans les feuilles des peupliers, le bore s'accumulait sur les bords et aux extrémités. A des niveaux de bore élevés, la coloration verte sur les bords et aux extrémités des feuilles disparaît peu à peu et des parties de la feuille commencent à mourir. Mais éton-

namment, les parties mortes de la feuille continuent à absorber le bore. Le peuplier arrive ainsi à protéger les parties saines de l'arbre et à les empêcher d'être surchargées de bore. De cette manière, le peuplier peut stocker 20 fois plus de bore que la quantité tolérée par d'autres plantes.

Planter des peupliers à côté des récoltes dans des zones où le sol est pauvre et de mauvaise qualité est une manière de protéger la production alimentaire. Couper les arbres des sites contaminés empêche le bore de retourner dans le sol. Leur bois peut alors être utilisé pour la construction ou en tant que combustible.

## L'eau dans les argiles

**L'argile est souvent utilisée pour recouvrir les parois des décharges et sites d'enfouissement étant donné sa bonne capacité à empêcher l'eau et les autres liquides qui la traversent de se répandre dans le sol environnant. De nouvelles recherches, alliant la structure microscopique de l'argile avec la manière dont l'eau traverse l'argile, sont utilisées pour concevoir des sites de stockage à long terme des déchets radioactifs.**

Dans le monde entier, un consensus se dégage de plus en plus en faveur du stockage géologique en couche profonde comme la solution la plus appropriée pour gérer les déchets radioactifs. Dans des pays comme la Belgique, la France et la Suisse, le stockage dans les formations argileuses en profondeur est privilégié. La Suède et la Finlande, des pays qui n'ont pas des formations argileuses en profondeur, préfèrent les formations de roches dures avec des matériaux à base d'argile. Il est donc essentiel d'avoir une connaissance précise des propriétés de l'argile pour évaluer la performance et la sûreté de ces différentes conceptions de confinement des déchets radioactifs.



Les plantes vivantes ne sont pas endommagées par les faisceaux de neutrons qui permettent d'obtenir des images en 3D des plantes, racines et du sol pendant leur période de croissance.

L'argile a une structure complexe avec des couches de particules en forme de petites plaques séparées par un réseau de fines couches d'eau et de pores de différentes tailles.

En combinant les expériences neutroniques avec les mesures du taux de drainage des liquides à travers l'argile, il est possible de mesurer la «sinuosité» du réseau de pores et de suivre le déplacement local de l'eau lorsqu'elle se faufile à travers l'argile.



Les argiles qui pourraient être adaptées à cet usage incluent l'argile de kaolin non gonflante (l'argile de Chine), souvent utilisée pour la porcelaine et la poterie, et une forme de bentonite (l'argile à base de montmorillonite), qui gonfle en eau. Les études réalisées montrent que la bentonite obtient les meilleurs résultats pour ralentir la mobilité de l'eau. Ces nouvelles connaissances microscopiques peuvent être intégrées dans des simulations sur ordinateur pour estimer des écoulements d'eau dans les sites potentiels de stockage.

## Regarder pousser les plantes

**Il est normalement assez difficile de voir ce qui se passe sous une plante sans la déterrer. En projetant un faisceau de neutrons à travers les racines des plantes pendant leur période de croissance, il est possible de voir l'emplacement de l'eau dans le sol autour du système racinaire.**

Les faisceaux de neutrons étant un outil de mesure particulièrement délicat, les plantes vivantes ne sont pas endommagées lorsqu'elles sont illuminées par un faisceau de neutrons. Il est ainsi possible d'obtenir une image complète en 3D des

racines des plantes pendant leur période de croissance.

Les expériences ont révélé qu'autour des racines des plantes, le sol était modifié et contenait beaucoup plus d'eau que le sol situé plus loin. Les plantes peuvent créer un approvisionnement d'urgence en eau pour de courtes périodes de sécheresse. De telles mesures peuvent également jouer un rôle dans la sélection des plantes pour leur permettre de mieux survivre dans les régions sèches.

<http://psi.ch/mroS>



# Alimentation, santé et médecine

**Une bonne alimentation, une bonne santé et une bonne médecine sont des ingrédients clés pour une vie heureuse et en bonne santé. Les expériences de diffusion neutroniques apportent une contribution unique pour réunir ces trois ingrédients.**

## La vie secrète des bulles

**Les produits laitiers comme les glaces, les mousses et les crèmes fouettées doivent garder un bel aspect et un goût délicieux de nombreux jours encore après avoir été ramenés du magasin à la maison. Un examen microscopique avec les neutrons pourrait être une manière novatrice pour les fabricants de produits alimentaires de trouver rapidement le mélange d'ingrédients le mieux adapté pour obtenir les résultats les plus délicieux.**

Bien qu'ils ne soient composés que de quelques ingrédients, les produits laitiers comme les glaces, les crèmes fouettées, les mousses et les yaourts ont une composition chimique étonnamment complexe. Les ingrédients de base sont habituellement de l'eau (ou des cristaux de glace), de la matière grasse du lait pour ajouter de la richesse et stabiliser le mélange de base et des sucres pour la douceur et pour améliorer la texture et la consistance. L'ingrédient le moins cher parmi ces produits est invisible: il s'agit de l'air. De minuscules cellules d'air fouettées dans le mélange de base sont en grande partie responsables de la consistance générale et ont un impact important sur la texture et le volume.

Des émulsifiants sont ajoutés pour lier les ingrédients ensemble et maintenir les bulles d'air en place. L'œuf est un émulsifiant couramment utilisé bien que d'autres, comme les monoglycérides et diglycérides, soient également très fréquents.

Pour maintenir les bulles en place, les molécules de l'émulsifiant revêtent les surfaces internes et externes des bulles en emprisonnant une fine couche aqueuse entre elles et donnent de la consistance à l'aliment.

Étudier la stabilité et la structure des bulles d'air dans le temps est une tâche exigeante et qui n'est pas encore très répandue. Cependant, avec les techniques de diffusion neutronique du PSI, il est facile d'obtenir des informations uniques de l'intérieur de la structure moléculaire.

Les fabricants disposent maintenant d'une voie novatrice pour savoir comment obtenir le bon mélange d'ingrédients avant d'étendre leurs gammes de produits.

## Une recette pour une alimentation saine

**Lorsque l'on parle de nourriture saine, les graisses sont toujours associées à une matière qu'il faut éviter à tout prix. Mais toutes les graisses ne sont pas mauvaises. Des études au PSI ont cherché à savoir comment les graisses étaient digérées afin de créer des recettes basses calories pour améliorer le bien-être personnel.**

En bonne quantité, les graisses sont des éléments essentiels d'un régime sain et équilibré. Elles fournissent des acides gras que notre corps n'est pas capable de produire par lui-même, aident à absorber les vitamines et, de manière générale, jouent un rôle pour maintenir les tissus, la peau et les fonctions immunitaires en bonne santé.

Les graisses ajoutent également du goût et de la texture aux aliments: des fromages et du beurre onctueux et crémeux, des gâteaux tendres et moelleux et des plats préparés croustillants et croquants. La digestion décompose les grandes mo-

lécules des aliments en molécules plus petites, relâchant de l'énergie et facilitant l'absorption de la nourriture dans le corps. Les acides présents dans l'estomac reconnaissent la structure superficielle des gouttelettes de graisse dans les aliments, s'y lient et les décomposent en gouttelettes plus petites jusqu'à ce qu'elles aient la bonne taille pour être absorbées par le corps.

Une alimentation trop riche en graisse peut déboucher sur l'obésité et d'autres problèmes liés à l'alimentation. Des



Avec des faisceaux de neutrons il est facile de voir la structure moléculaire de mousses, ingrédients alimentaires et médicaments.

scientifiques au PSI ont simulé les conditions acides présentes dans l'estomac et ont utilisé les neutrons pour étudier les modifications de la structure des gouttelettes de graisse au niveau moléculaire. Ils ont découvert que les gouttelettes de graisse avec un revêtement semblable à la cellulose des plantes résistaient à la décomposition acide et n'étaient pas absorbées par le corps. Déguiser ainsi les matières grasses pour qu'elles ne soient pas reconnues par le corps pourrait être une nouvelle voie pour diminuer la consommation de matières grasses et réaliser des recettes succulentes, saines et nourrissantes.

## Copier la nature pour la médecine

**En imitant la nature, les chercheurs ont développé de minuscules particules ar-**

**tificielles qui se comportent comme des protéines. Elles pourraient être utilisées pour libérer des médicaments dans le corps avec une grande précision ou pour faire des capteurs biologiques.**

Les protéines sont de grandes molécules biologiques qui effectuent une grande variété de tâches à l'intérieur du corps. Elles participent au bon fonctionnement des réactions chimiques, copient l'ADN et transportent les molécules d'un endroit à un autre.

Alors que les protéines sont considérées comme grandes à l'échelle biologique, elles sont en réalité de très petite taille – un grain de poussière pourrait en contenir des milliers. La forme des protéines est importante pour effectuer des tâches particulières et pour qu'elles soient reconnues dans le corps.

En s'inspirant des protéines naturelles, une équipe de chercheurs a trouvé un

moyen simple et efficace de fabriquer de minuscules molécules artificielles. Les expériences réalisées au PSI ont confirmé qu'elles se comportaient de manière similaire aux protéines.

Les molécules artificielles en forme de balle sont conçues pour se déplier dans des conditions particulières. L'objectif est d'utiliser ces molécules pour retenir les médicaments puis de les libérer à un endroit particulier du corps.

Un test effectué avec succès a examiné la libération de vitamine B9 (acide folique) pendant quelques heures pour un traitement potentiel d'une peau endommagée par le soleil.

Il a également été possible d'attacher les molécules artificielles à la surface d'une puce en silicium pour en faire un capteur biologique très sensible afin que les laboratoires des hôpitaux testent la présence de molécules particulières liées à une affection médicale.



# A l'intérieur de la Source de Neutrons de Spallation Suisse SINQ





# Héritage et culture

Il est facile d'examiner les objets précieux avec des faisceaux de neutrons. Ils ne causent aucun dommage et permettent de voir profondément à l'intérieur de ces objets. Ce sont des outils parfaits pour étudier des haches de l'âge du bronze ou examiner la corrosion dans des gravures ou des sculptures.

## Techniques de fabrication d'une hache de l'âge du bronze

Des études réalisées sur une hache rare de l'âge du bronze trouvée il y a près de 200 ans près du lac de Thoune ont révélé que l'Europe centrale à l'âge du bronze avait été fortement influencée par les cultures des Balkans et du Caucase.

En 1829, dans le quartier Buchholz de la ville de Thoune, des travaux de dragage ont mis à jour l'un des trésors les plus précieux du début de l'âge du bronze en Europe du Nord. Le trésor a été trouvé sur le versant sud de la colline de Renzenbühl, donnant sur le lac de Thoune, dans une sépulture en pierre d'une personnalité importante. Douze objets ont été trouvés à côté de restes humains, la sépulture faisait partie de plusieurs autres formant un petit cimetière dans cette zone.

L'un des objets les plus impressionnants de ce trésor est une hache incrustée avec une décoration remarquable: une lame ornée des deux côtés d'un double alignement de 198 incrustations d'or en forme de losanges. Les incrustations dorées sont insérées à l'intérieur de deux larges bandes de cuivre, qui sont elles-mêmes insérées dans des rainures prédécoupées des deux côtés de la hache. Les incrustations sont une technique rare pour le début de l'âge du bronze et ne sont présentes que dans sept artefacts en bronze trouvés dans le nord des Alpes.

La conception en forme de spatule de la hache est typique des haches trouvées

en Suisse occidentale. La hache possède un tranchant fortement recourbé qui montre qu'elle servait probablement d'arme ou était le symbole d'un statut social plutôt que d'outil pour couper ou travailler le bois. La hache a été datée du bronze ancien (bz A2a), soit environ 1800 avant JC, et était probablement attachée à un long manche en bois.

Les faisceaux de neutrons sont un outil parfait pour comprendre comment a été fabriqué un objet aussi exceptionnel étant donné qu'ils ne causent aucun dommage et permettent de voir clairement à l'intérieur des métaux.

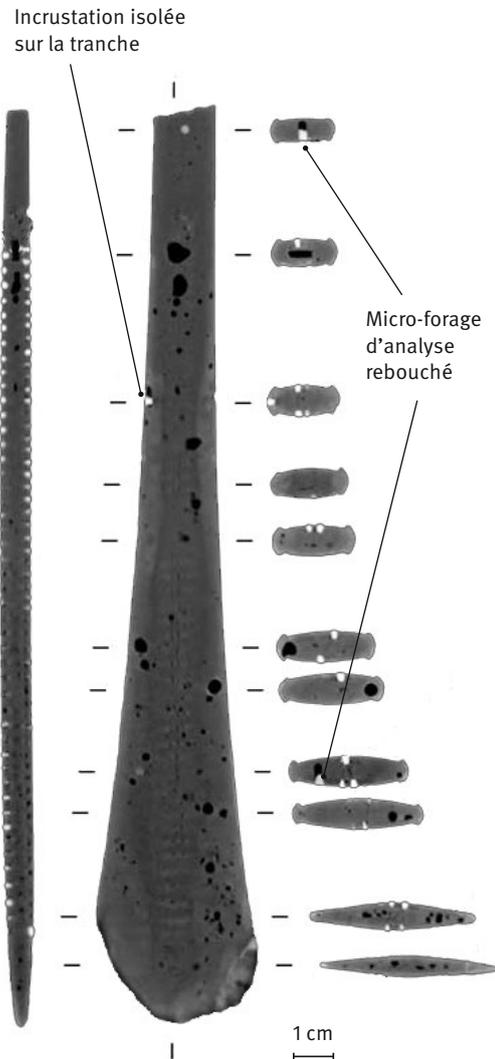
En faisant tourner la hache dans le faisceau de neutrons, les chercheurs ont pu déduire comment la hache avait été fabriquée. L'intérieur de la structure présente de nombreux espaces vides, ce qui suggère que le moule de la hache était en argile et que l'eau résiduelle s'est transformée en bulles de vapeur dans le bronze fondu. Les espaces vides étant toujours bien arrondis et non elliptiques, il est donc très peu probable que la surface de bronze ait subi des travaux de forgeage après le coulage de la hache.

Les incrustations d'or ont été découpées dans une mince baguette ronde et ont été enfoncées dans les trous percés dans les bandes de cuivre, qui elles-mêmes ont été martelées dans les rainures moulées dans la hache. Finalement, la surface inégale obtenue a été polie et meulée pour la rendre lisse.

Cette étude a apporté une nouvelle compréhension des techniques de fabrication à l'âge du bronze. Elle a révélé que l'Europe centrale de l'âge du bronze avait été fortement influencée par des cultures situées dans la péninsule des Balkans et la région du Caucase et beaucoup moins influencée par les cultures méditerranéennes que ce que l'on pensait précédemment.

<http://psi.ch/vHW4>





**A gauche:** Hache de l'âge du bronze de la collection du Musée d'Histoire de Berne.

**A droite:** Images produites par tomographie neutronique de l'intérieur de la hache de bronze montrant des coupes virtuelles de la hache. Les zones sombres correspondent aux inclusions gazeuses, et les points clairs aux dorures.

## Prédire les dommages dus au sel sur les bâtiments

Le calcaire, couramment utilisé pour la construction de façades et de sculptures, peut être endommagé par l'eau s'infiltrant à travers la pierre poreuse.

Les bâtiments et les sculptures peuvent être facilement endommagés par les sels qui s'infiltrent dans la pierre poreuse. Ces sels peuvent provenir de nombreuses sources, dont le dégivrage des routes, les inondations, le bétail, les chauves-souris ou les pigeons qui habitent dans les bâtiments.

Les sels dissous dans l'eau s'infiltrent dans la pierre à travers les pores et les fissures et forment des cristaux lorsque la pierre sèche. Ces cristaux peuvent engendrer des contraintes importantes à l'intérieur de la pierre et entraîner des fissures et des effritements.

Un nouveau programme informatique permet maintenant aux ingénieurs civils de tester des idées de techniques de réparation et de conservation ou de nouveaux matériaux de construction sans devoir réaliser des études à long terme sur de nombreuses années.

La radiographie neutronique permet d'identifier facilement le transport de solutions d'eau et de sel à travers la pierre ainsi que l'emplacement des cristaux de sel et des fissures.

Les résultats obtenus à partir d'expériences consistant à mouiller puis à sécher la pierre calcaire de Savonnières ont été utilisés pour tester le programme. Une découverte essentielle est que les dommages majeurs apparaissent lorsque que la pierre est remouillée.

Les développeurs du logiciel prévoient que le programme sera largement utilisé à travers l'Europe pour réduire le coût du cycle de vie des bâtiments et allonger la durée de vie des structures et des matériaux de construction.

# Électronique et technologie

La technologie moderne dépend entièrement de l'électronique pour fonctionner et du magnétisme pour stocker les données. La taille des composants électroniques diminuant constamment et les volumes d'informations augmentant rapidement, il est nécessaire de trouver de nouveaux moyens de combiner l'électronique et le magnétisme.

## Spintronique

La spintronique est largement perçue comme le moyen de modifier la façon dont les informations sont stockées et transmises à l'électronique et aux ordinateurs. Les dispositifs spintroniques devraient être plus petits et consommer moins d'énergie que les dispositifs électroniques actuels. La construction de composants permettant de contrôler et d'exploiter le «spin», une propriété physique de base des électrons, n'en est qu'à ses premiers pas, mais les faisceaux de neutrons et de muons du PSI sont des outils parfaits pour faciliter leur développement.

Depuis plus de 100 ans, les électrons circulent à l'intérieur des fils dans toutes sortes de circuits et de dispositifs électriques. Les champs électriques et magnétiques peuvent déplacer les électrons en interagissant avec leur charge, une propriété naturelle qu'ils possèdent avec la masse. Une troisième propriété naturelle est appelée le «spin» qui donne à l'électron son propre champ magnétique microscopique.

Contrôler l'orientation du spin dans des circuits électroniques et l'utiliser pour stocker et transmettre les informations nécessite un contrôle très minutieux de la conception des matériaux.

De nouveaux types de matériaux connus sous le nom de semi-conducteurs orga-

niques sont bien adaptés pour les applications spintroniques. Ces matériaux semblables aux plastiques conduisent l'électricité, émettent de la lumière, ils peuvent être facilement formés et possèdent également toutes les propriétés des semi-conducteurs traditionnels comme le silicium.

Les muons soigneusement implantés dans un dispositif spintronique sont capables de ressentir l'environnement local et de mesurer la direction du spin des électrons qui les traversent.

En utilisant cette technique, il a été possible de développer un dispositif qui permet de contrôler avec précision l'orientation des spins des électrons qui entrent ou sortent dans un matériau.

Les résultats sont particulièrement intéressants car ils montrent qu'il est possible de construire de nombreux dispositifs novateurs, comme des éléments de processeur d'ordinateur, des capteurs, de nouveaux types de mémoire informatique et des écrans luminescents intelligents, afin de leur donner des fonctions spécifiques.

<http://psi.ch/GHc5>

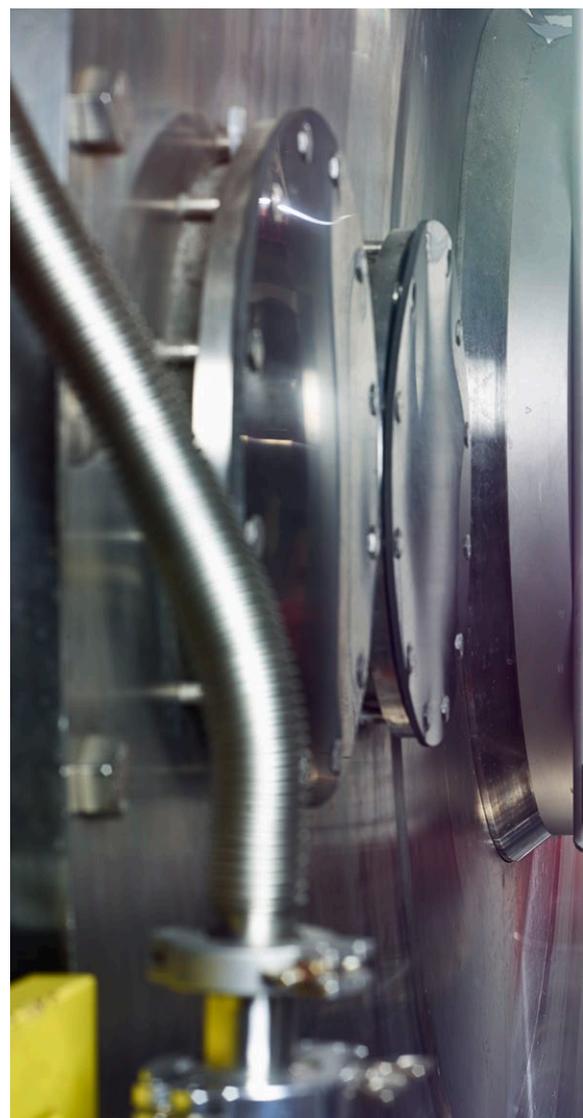


## Mesurer les grains magnétiques

Le stockage des données est un marché énorme en pleine croissance. Un fabricant de disques durs a récemment annoncé qu'il avait expédié 2 milliards de disques durs, en indiquant qu'il avait fallu 29 ans pour vendre le premier milliard et seulement quatre années supplémentaires pour en vendre un milliard de plus. Les fabricants cherchent en permanence de nouveaux moyens pour augmenter la quantité d'informations que leurs produits peuvent stocker.

La technique d'enregistrement magnétique est au cœur de la technologie informatique moderne. Les photos, la musique et les vidéos peuvent toutes être décomposées et stockées sous forme de séquences de 1 et de 0 sur de petits disques en rotation qui peuvent maintenant stocker 1 téraoctet (1To) d'informations.

Les 1 et les 0 sont stockés sur les disques dans de petits grains magnétiques dont les pôles nord et sud pointent de la surface du disque. Une minuscule tête d'écri-



ture est en suspension au-dessus de la surface et inverse les pôles lorsqu'elle stocke l'information.

Seule la diffusion neutronique permet d'étudier la manière dont les pôles des grains s'inversent dans un champ magnétique.

Les grains magnétiques sont typiquement composés d'un alliage cobalt-chrome-platine séparé par une fine enveloppe d'oxyde de silicium. Le diamètre moyen typique d'un grain est d'environ 8 nanomètres, environ 8 millions de fois plus petit que celui d'un grain de sable. Les grains sont conçus de manière à garantir que les particules magnétiques ne

puissent pas s'inverser du nord au sud à n'importe quel moment. Elles ne peuvent changer de direction que lorsque la tête d'écriture passe au-dessus d'elles.

Les disques durs seront bientôt capables de stocker 10 téraoctets de données sur un seul disque et il est maintenant prévu de fabriquer des disques durs pouvant stocker 60 téraoctets.

Pour contenir autant d'informations, il faudra utiliser différents matériaux magnétiques comme des alliages fer-platine associés à des champs magnétiques plus grands pour inverser les pôles des grains. Les fabricants de disques durs utilisent les résultats des expériences de diffusion neutronique pour développer les matériaux nécessaires à ces futures conceptions de disques durs.

L'électronique et le stockage des données reposent sur l'interaction de l'électricité et du magnétisme dans des composants minuscules. Les expériences de diffusion neutronique permettent d'observer des changements dans les composants.



## Sandwichs moléculaires

**Construire des sandwichs moléculaires avec des couches de seulement quelques atomes d'épaisseur peut créer des structures possédant des propriétés électriques et magnétiques entièrement nouvelles. La seule façon de comprendre ce qui se passe à l'intérieur est de réaliser des expériences.**

La superposition de différents composés de quelques atomes d'épaisseur seulement ouvre de nombreuses possibilités de nouvelles découvertes. Aux frontières entre les couches, des phénomènes étranges peuvent apparaître. Des isolants peuvent devenir conducteurs ou même supraconducteurs, là où le courant passe sans générer de chaleur. Des composés qui sont habituellement amagnétiques peuvent devenir magnétiques.

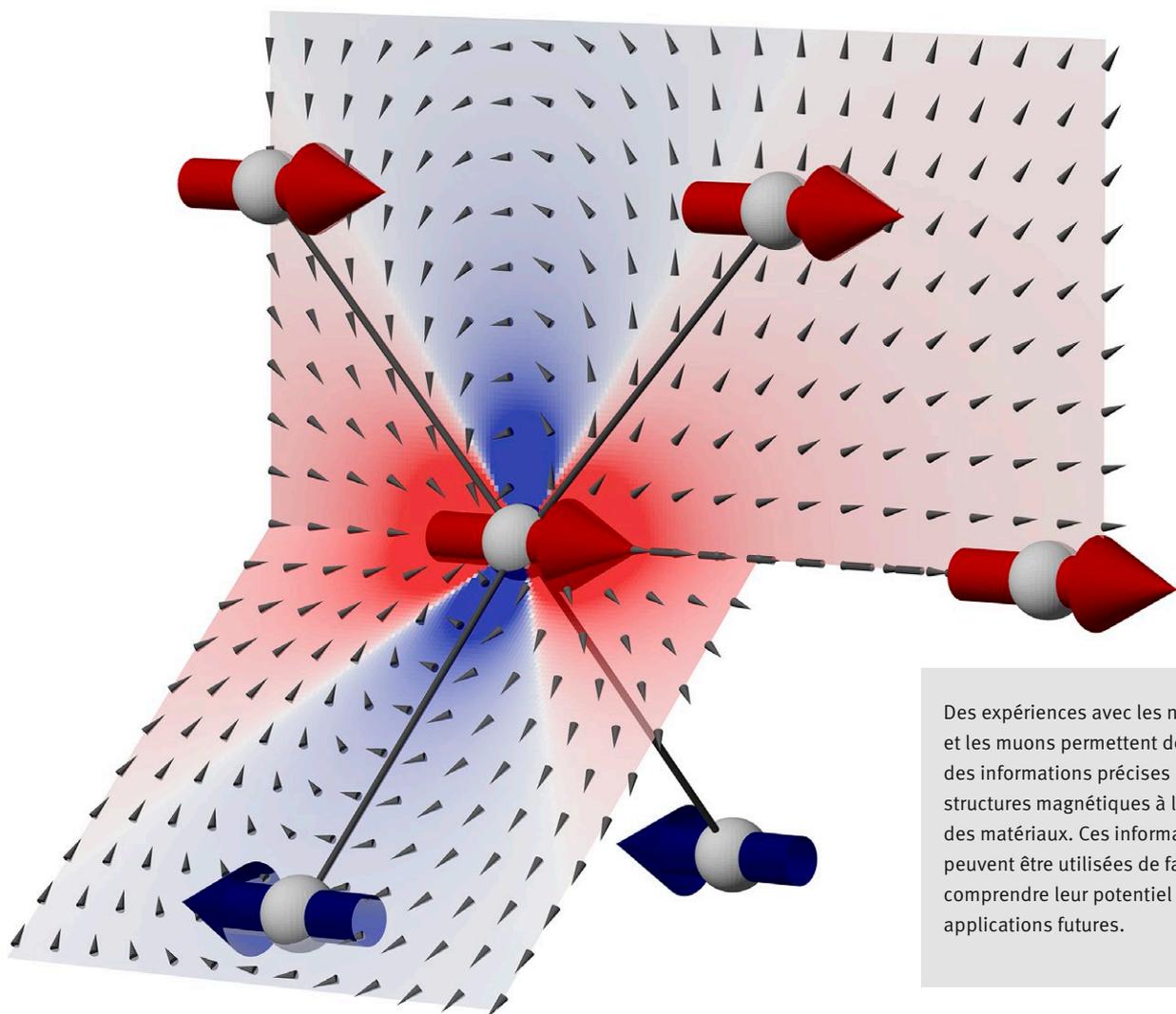
Poser une fine couche d'oxyde contenant du manganèse sur un oxyde contenant de l'aluminium entraîne la formation d'un champ magnétique externe à la frontière entre les deux composés.

Les faisceaux de neutrons sont capables de mesurer la manière dont la structure atomique et le magnétisme fluctuent à travers les couches et à leur frontière, fournissant ainsi des informations simples et uniques qui ne peuvent pas être obtenues d'aucune autre manière. Dans le cas présent, les chercheurs ont découvert que, pour que les structures atomiques des deux couches se lient entre elles, la couche contenant du manganèse était étirée et déformée par rapport à sa forme habituelle. En conséquence, de très grandes déformations se formaient à l'intérieur de la nouvelle structure.

En s'éloignant de la frontière entre les deux couches, la déformation dans les structures diminue et la taille du champ magnétique se réduit, ce qui indique que la force du magnétisme est étroitement liée à la déformation atomique dans la structure.

C'est une voie novatrice pour contrôler le magnétisme dans des dispositifs fabriqués à partir de couches minces et qui ouvre de nouvelles perspectives pour développer l'électronique.

# Découvrir des matériaux



Des expériences avec les neutrons et les muons permettent de fournir des informations précises sur les structures magnétiques à l'intérieur des matériaux. Ces informations peuvent être utilisées de façon à comprendre leur potentiel pour des applications futures.

De nouvelles technologies ou des avancées scientifiques ne sont possibles qu'après que des milliers et des milliers d'expériences ont été réalisées pour tester de nouveaux composants et comprendre leurs propriétés. Relever de grands défis intellectuels à la pointe des connaissances représente un test important pour les compétences d'un scientifique.

## Microgels

Les microgels sont de petites particules molles avec un noyau compact et une surface floue en suspension dans un liquide. Extrêmement mous et flexibles, ils présentent un potentiel important pour différentes applications.

Les microgels sont des particules molles constituées de longues molécules de polymère connectées entre elles de ma-

nière souple pour former un réseau. Ils réagissent à leur environnement en changeant de taille, se compactant lorsqu'ils sont écrasés et reprenant leur forme normale lorsqu'ils sont relâchés. Lorsqu'elles sont très étroitement serrées, les surfaces floues des microgels peuvent se superposer et fusionner en produisant de nombreuses propriétés physiques différentes et inhabituelles. Des expériences neutroniques réalisées au PSI explorent la structure interne et les

propriétés physiques des microgels en suspension. Les résultats ont révélé que la pression était un moyen plus précis que la température de contrôler la taille des microgels. L'augmentation de la pression évacue le liquide des microgels, ils se comportent alors comme des particules individuelles compactes au lieu de fusionner.

Les microgels sont constamment utilisés et leurs applications sont de plus en plus nombreuses, dont la purification de l'eau, la fabrication de muscles artificiels et comme minuscules valves ou commutateurs.

## Fabriquer des matériaux intelligents

**Les matériaux intelligents qui réagissent à leur environnement naturel peuvent être conçus en intégrant des molécules activées par la lumière ou la température dans un matériau hôte passif. L'une des premières étapes du développement est de tester si les molécules actives peuvent continuer à fonctionner à l'intérieur de leur nouveau domicile.**

Intégrer des molécules actives dans un cadre hôte neutre présente un intérêt dans de nombreux domaines scientifiques. En médecine, les molécules des médicaments pourraient être libérées lentement à partir d'implants. Dans les applications optiques, les matériaux photosensibles pourraient être utilisés comme commutateurs dans des dispositifs électroniques ou à laser pour bloquer ou amplifier la lumière d'une couleur particulière.

Les aérogels sont l'un des matériaux les plus utilisés pour héberger les molécules actives. Découverts en 1931, les aérogels sont les plus légers des matériaux solides dans le monde, environ 99% de leur volume étant constitué par un réseau de

minuscules bulles d'air. Les aérogels de silice composés de sable sont les plus couramment utilisés étant donné qu'ils sont chimiquement inertes et inoffensifs dans le corps humain. Ce sont des outils idéaux pour transporter des médicaments. Des expériences de diffusion neutronique permettent aux chercheurs développant de nouveaux matériaux de comprendre comment les molécules actives interagissent avec le matériau hôte.

Dans une expérience, les chercheurs ont pu identifier les molécules individuelles à l'intérieur de l'aérogel et confirmer que presque 80% des pores étaient remplis. Ils ont montré que chaque pore contenait une seule molécule et que les molécules avaient conservé leur forme et leur réponse habituelles après avoir été exposées à la lumière.

## Comprendre les supraconducteurs

**L'une des plus grandes découvertes du 20ème siècle, la propriété incroyable des supraconducteurs de laisser passer l'électricité sans résistance à basses températures, est constamment renforcée. Les expériences de diffusion neutronique et de spectroscopie avec les muons réalisées au PSI sont à l'avant-garde de la recherche mondiale pour comprendre comment ces supraconducteurs fonctionnent.**

La supraconductivité a été découverte en 1911 et apparaît dans de nombreux matériaux ordinaires comme le plomb et l'aluminium à très basses températures, environ 290 degrés en dessous de la température ambiante. Le courant électrique peut circuler librement dans un fil supraconducteur sans que ce dernier chauffe. Au contraire, en raison de sa résistance électrique, un fil normal en cuivre peut chauffer, devenir incandescent et même fondre.

Les supraconducteurs sont typiquement refroidis à basses températures en utilisant de l'azote ou de l'hélium liquide et peuvent transporter 100 fois plus de courant qu'un câble en cuivre de la même taille. Ils sont utilisés dans les appareils d'IRM des hôpitaux, comme filtres électroniques dans les stations de base de la téléphonie mobile, dans la séparation industrielle des impuretés du fer de l'argile kaolin pour améliorer sa pureté et sa blancheur, et dans des réseaux électriques pour transférer des quantités importantes d'énergie entre les installations avoisinantes.

Les matériaux supraconducteurs les plus simples sont bien compris, mais on découvre de plus en plus de supraconducteurs qui possèdent des propriétés qui défient toute explication.

Des expériences de diffusion neutronique au PSI ont récemment révélé qu'un matériau à base de cérium, cobalt et d'indium placé dans un champ magnétique intense créait un nouveau type de supraconductivité couplée avec des orientations du champ magnétique bien ordonnées des ions dans le matériau.

Ce résultat est surprenant étant donné que la supraconductivité et les champs magnétiques sont normalement considérés comme des concurrents, les champs magnétiques intenses détruisant l'état supraconducteur.

En repoussant constamment les frontières de la connaissance, les scientifiques du PSI font de nouvelles découvertes qui pourraient déboucher sur des ordinateurs fonctionnant à des vitesses dépassant les limites de la technologie du silicium ou transformer la performance de la production et de la distribution des énergies propres.

<http://psi.ch/nJbN>



# S'engager avec l'industrie

Le PSI encourage activement l'industrie à utiliser ses installations de recherche, soit directement, soit en partenariat avec des équipes de recherche universitaires.

## Les universités, l'industrie et le PSI

Quand il s'agit de développer de nouveaux matériaux ou de comprendre le comportement de matériaux déjà commercialisés, des sociétés de Suisse mais aussi de toute l'Europe joignent fréquemment leurs forces avec des équipes de

recherche universitaires pour combiner leurs connaissances et leur expertise à celles du PSI.

Les projets de recherche vont de l'amélioration à long terme des procédures de développement de produits pour une utilisation ultérieure, à la construction d'une compréhension systématique de nouveaux matériaux.

Varta et Toyota utilisent les neutrons et les muons pour affiner leur compréhension des matériaux qui se trouvent dans les batteries NiMH et lithium-ion du commerce.

Des scientifiques de Hitachi sont maintenant en mesure de mesurer les grains minuscules qui stockent les données sur les disques durs et ce qui se passe physiquement à l'intérieur de chaque grain. Les matériaux de stockage de l'hydrogène sont un thème de recherche largement répandu chez les chercheurs. Parmi tous les éléments du tableau périodique, l'hydrogène est le plus visible pour les faisceaux de neutrons. La SINTEF, basée en Norvège, est la plus grande organisation de recherche indépendante en Scandinavie qui s'intéresse à la conversion énergétique et à son utilisation finale.



SwissNeutronics est une société fondée sur l'expertise développée au PSI. De nos jours, elle fournit des composants aux clients du monde entier. La société utilise des instruments à la SINQ à des fins d'essais et de développement.

Les chercheurs de la SINTEF utilisent les neutrons pour étudier l'assimilation de l'hydrogène dans les matériaux qui pourraient servir au stockage en vrac de l'hydrogène.

Le centre de recherche de Nestlé à Lausanne utilise régulièrement les installations neutroniques du PSI pour étudier le potentiel des différentes innovations qui pourraient être utilisées dans les processus de fabrication.

## Résoudre des problèmes industriels

**Souvent, les utilisateurs industriels souhaitent utiliser les faisceaux de neutrons ou de muons pour effectuer des mesures directes afin de résoudre des problèmes immédiats.**

Schaeffler/LuK a utilisé l'imagerie neutronique pour identifier les distributions d'huile en temps réel dans des prototypes d'embrayages multidisques et, grâce aux connaissances acquises, optimiser la conception afin de réduire la consommation de carburant.

Alstom utilise régulièrement la diffusion neutronique pour mesurer les contraintes internes des pales des turbines à gaz fabriquées avec de nouveaux alliages ou traitées de manières différentes après la fabrication.

Stihl travaille avec le PSI pour réduire les émissions des moteurs des tronçonneuses à 2 temps pour se conformer à la législation de l'UE. Les ingénieurs de Stihl ont pu étudier la distribution des carburants et lubrifiants dans un moteur tournant à 3000 tr/mn et comprendre les modifications qui pouvaient être apportées.

<http://psi.ch/uhcG>



## Développer de nouvelles technologies

**Construire de nouveaux instruments pour réaliser des recherches aux frontières de la connaissance sur un grand instrument nécessite des développements et un planning minutieux pour optimiser la performance et répondre aux plus hauts critères d'exigence scientifiques.**

Les scientifiques et ingénieurs de la Source de Muons Suisse  $\mu S$  ont travaillé pendant de nombreuses années en partenariat avec des sociétés comme Dubna Detectors, Photonique SA, Hamamatsu Photonics et Zecotek afin de développer des détecteurs de muons modernes, compacts et efficaces. Les nouveaux détecteurs peuvent fonctionner dans des champs magnétiques intenses et être regroupés les uns près des autres. Ils sont maintenant installés sur plusieurs instruments à muons au PSI et ouvrent de nouveaux domaines de recherche. La technologie sera partagée avec d'autres laboratoires de muons dans le monde.

## Compagnie d'essai

**SwissNeutronics a été fondée en 1999 en tant que compagnie d'essai du PSI pour commercialiser et exploiter les connaissances en construisant des composants optiques pour les instruments neutroniques.**

La performance des instruments neutroniques dépend du nombre de neutrons qui arrivent jusqu'à l'instrument. Ce nombre peut être fortement augmenté en installant des miroirs spéciaux qui guident efficacement les neutrons sur de longues distances, depuis la source jusqu'aux instruments.

Lors de la construction de la Source de Neutrons de Spallation Suisse SINQ, les scientifiques et les ingénieurs ont acquis une connaissance approfondie de la manière de faire des revêtements de haute qualité pour les supermiroirs neutroniques.

A l'heure actuelle, SwissNeutronics fournit des composants optiques à des clients dans le monde entier et est considérée comme une des compagnies leader dans ce secteur.

## Une future source neutronique pour l'Europe

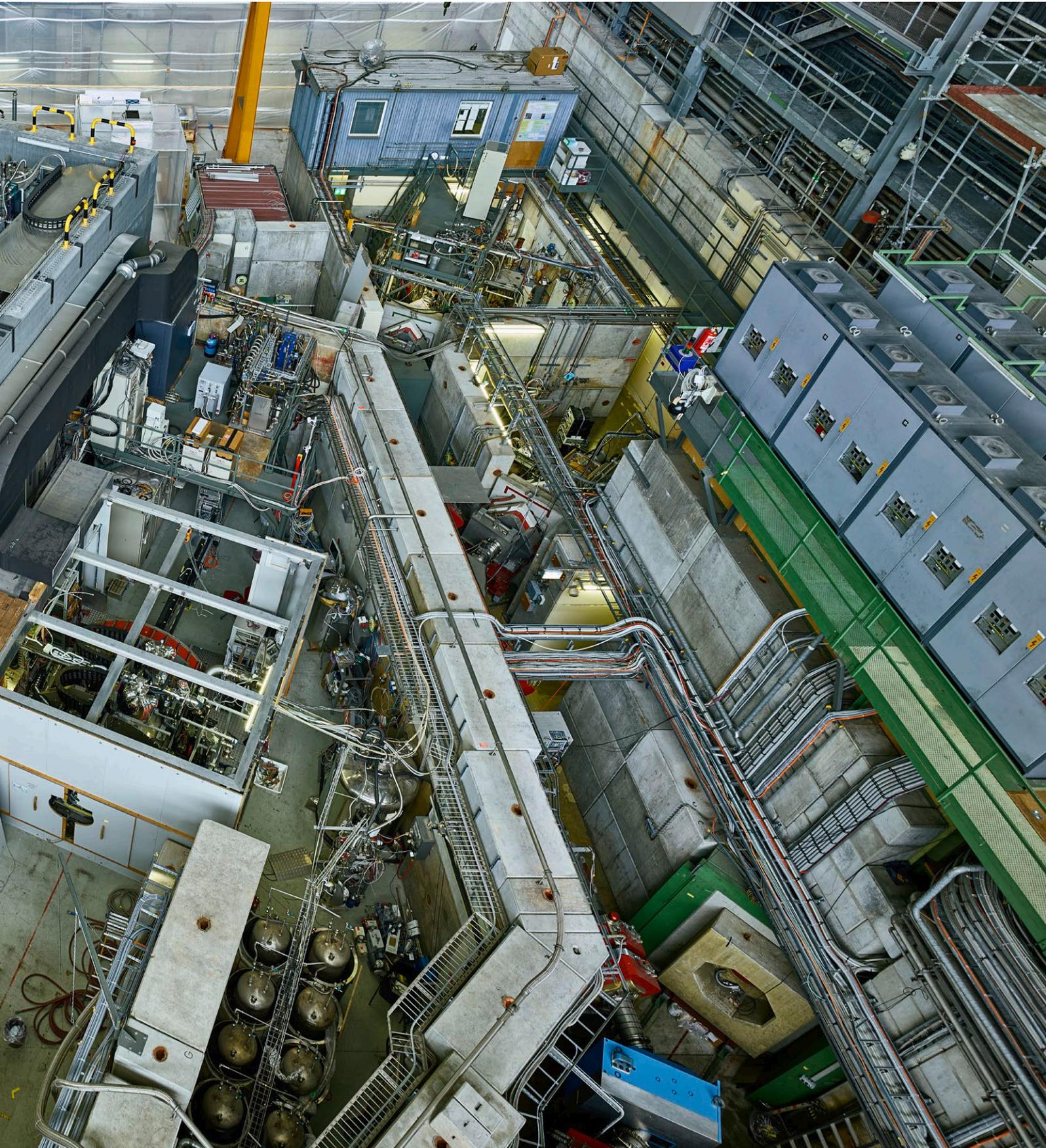
**Les scientifiques et ingénieurs suisses utilisent leur expertise pour contribuer à la construction de nouvelles installations scientifiques européennes qui répondront aux besoins futurs de la recherche.**

La Source de Spallation Européenne est un nouveau centre de recherche qui sera construit à Lund, en Suède, dans le cadre d'un partenariat composé de 17 pays, dont la Suisse. Elle devrait être opérationnelle en 2019. La nouvelle source étant basée sur une technologie très similaire à celle de la Source de Neutrons de Spallation Suisse SINQ, le personnel du PSI, avec des organismes partenaires au Danemark, joue un rôle clé dans le développement et les essais des composants pour le nouveau centre, ainsi que dans la conception des instruments de recherche.

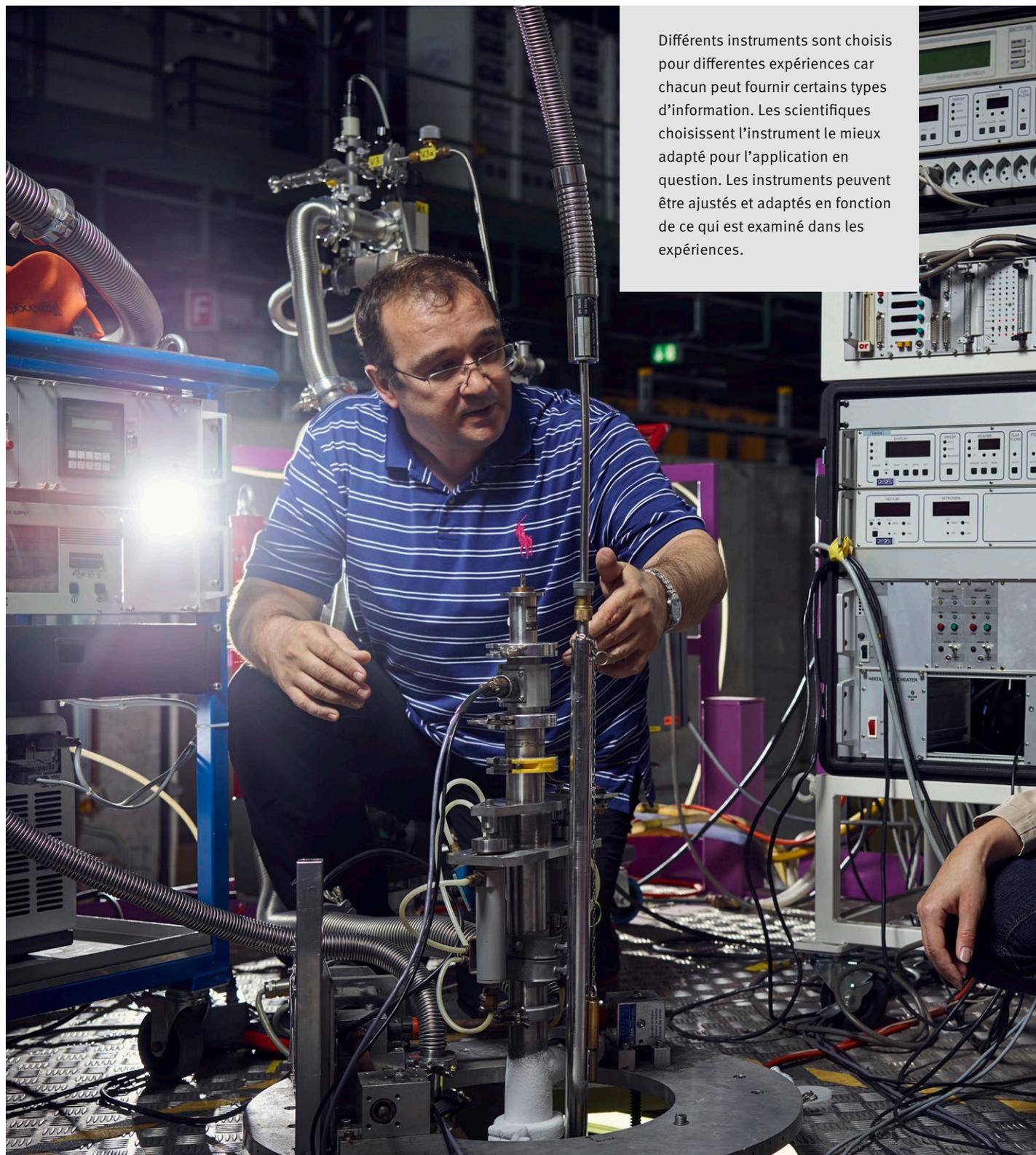




# A l'intérieur de la Source de Muons Suisse S $\mu$ S



# Utiliser les neutrons et les muons



Différents instruments sont choisis pour différentes expériences car chacun peut fournir certains types d'information. Les scientifiques choisissent l'instrument le mieux adapté pour l'application en question. Les instruments peuvent être ajustés et adaptés en fonction de ce qui est examiné dans les expériences.



**Tout est fait d'atomes et les atomes sont minuscules. Un grain de poussière pourrait en contenir des millions. Au PSI, les chercheurs utilisent les faisceaux de neutrons et de muons pour découvrir où se trouvent les atomes et ce qu'ils font.**

### Qu'est-ce qu'un neutron?

Les neutrons sont partout. Avec les protons et les électrons, ils forment les atomes, les composants élémentaires du monde naturel. Les neutrons sont fortement liés avec les protons dans le noyau atomique. Libérés de l'atome, les neutrons sont des outils précieux pour la recherche sur les matériaux.

Dans la Source de Neutrons de Spallation Suisse SINQ, des faisceaux de neutrons sont produits et utilisés pour illuminer des échantillons afin de découvrir leurs propriétés microscopiques.

Les neutrons possèdent des caractéristiques uniques qui les rendent particulièrement précieux pour la recherche. Ils possèdent exactement la bonne taille pour mesurer avec exactitude les distances entre les atomes dans un matériau et peuvent sentir comment les atomes se déplacent et mesurer la puissance des forces qui les lient entre eux.

Ils n'ont pas de charge électrique, ce qui leur permet de voir profondément à l'intérieur d'objets épais et de ne pas seulement regarder à la surface. Leur interaction douce est parfaite pour examiner des matériaux fragiles, précieux ou rares.

Ils se comportent également comme un minuscule aimant, ce qui en fait un outil idéal pour explorer le magnétisme à une échelle microscopique. En fait, la majorité de nos connaissances en magnétisme microscopique ont été acquises grâce à des expériences avec les faisceaux de neutrons.

Quand un objet est placé dans un faisceau de neutrons, il est traversé par les neutrons qui sont alors diffusés par les atomes à l'intérieur de l'objet. Les neutrons diffusés sont captés par des détecteurs ou des caméras placés autour de

l'objet et qui permettent de déterminer les positions et les mouvements des atomes.

Par ailleurs, les neutrons peuvent générer des images. Le PSI est leader mondial pour l'exploitation de cette approche d'«imagerie neutronique» pour les expériences.

<http://psi.ch/CaDJ>



### Qu'est-ce qu'un muon?

Ils pourraient sembler exotiques mais des centaines de muons tombent sur chacun de nous à chaque seconde. Formées par les rayons cosmiques qui frappent l'atmosphère, ces particules élémentaires peuvent également être produites par des accélérateurs de particules et utilisées pour la recherche sur les matériaux.

Dans la Source de Muons Suisse SpS, les faisceaux de muons sont produits et utilisés pour illuminer des échantillons afin de découvrir leurs propriétés microscopiques.

Les muons sont des particules chargées qui possèdent également une petite boussole magnétique.

Lorsqu'un objet est placé dans un faisceau de muons, les muons s'implantent à différentes profondeurs. Les charges électriques des atomes à l'intérieur des matériaux arrêtent les muons dans les espaces interstitiels entre les atomes.

Les muons sont très sensibles à leur environnement local et peuvent sentir de faibles champs magnétiques ou des mouvements atomiques. Leur boussole magnétique tourne à une fréquence qui reflète ce qui les entoure.

En mesurant cette fréquence, les chercheurs obtiennent des informations sur les propriétés des champs magnétiques ou des environnements chimiques qui les entourent.

<http://psi.ch/Z1cq>



# Produire des neutrons et des muons

Produire des faisceaux de particules nécessite d'énormes machines combinant la science et l'ingénierie. La Source de Neutrons de Spallation Suisse SINQ et la Source de Muons Suisse  $\mu$ S sont implantées à l'intérieur de trois énormes bâtiments sur le site ouest du PSI.

Se promener à l'intérieur des énormes bâtiments qui abritent les sources de neutrons et de muons est une chance rare de pénétrer dans un monde qui, à première vue, peut sembler chaotique: un dédale de couloirs et de parois, des câbles et des grues, des équipements étranges et fabuleux à chaque tournant, des canaux dans toutes les directions qui transportent des faisceaux de particules. Mais, très rapidement, la logique stricte et l'ordre commencent à apparaître.

## Accélérer les protons

Les faisceaux de neutrons et de muons sont générés au PSI en projetant un courant continu de protons voyageant à une vitesse correspondant à 80% de la vitesse de la lumière sur une série de cibles en plomb ou en carbone.

Les protons sont envoyés sur les cibles par l'accélérateur de protons à haute intensité. Les protons sont produits en séparant les molécules du gaz d'hydrogène.

L'accélérateur et les sources de neutrons et de muons fonctionnent en continu 24 heures sur 24 plus de 220 jours par an. L'accélérateur de protons du PSI produit le faisceau de protons le plus intense au monde.

<http://psi.ch/4Ais>



## Produire des neutrons

Les neutrons sont libérés lorsque le faisceau de protons est projeté sur une cible de plomb dans le hall des cibles. Pour chaque proton qui frappe la cible, 10 neutrons sont libérés.

Le faisceau de protons traverse le sol et vient frapper la cible en plomb qui se trouve au centre de l'énorme structure au milieu du hall. La cible est de forme cylindrique et mesure 50 cm de long et 15 cm de large. Elle est refroidie par de l'eau pour l'empêcher de fondre lorsqu'elle est frappée par le faisceau de protons.

Les neutrons sont guidés vers les différents instruments dans le hall des cibles et le hall des guides de neutrons dans des canaux revêtus de miroirs spéciaux qui guident les neutrons.

18 instruments sont opérationnels à la Source de Neutrons de Spallation Suisse SINQ.

<http://psi.ch/LDJ9>



## Produire des muons

Les muons sont engendrés lorsque le faisceau de protons traverse deux cibles en carbone dans le hall expérimental.

Les muons sont extraits des cibles par des champs électriques et magnétiques puis dirigés vers les différents sites de mesures pour des expériences avec les muons.

La Source de Muons Suisse  $\mu$ S dispose de six sites de mesure.

<http://psi.ch/QxCK>



A l'intérieur du hall des cibles de la Source de Neutrons de Spallation Suisse SINQ. Les neutrons sont libérés au centre de l'énorme structure bleue et sont guidés vers les différents instruments autour.



# C'est grâce à nous

**Ingénieur en électronique**  
Construit du hardware pour traiter les signaux des détecteurs

De nombreuses personnes possédant des expertises différentes font fonctionner les installations du PSI nuit et jour. Rencontrez quelques unes d'entre elles:

**Conducteur de grues**

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

**Technicien radioprotection**

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

**Plombier**

Améliore les canalisations qui transportent l'eau de refroidissement et l'air comprimé

**Électricien**

Installe des câbles basse tension pour le contrôle commande ainsi que pour le transfert de signaux et de données

**Développeur logiciels**

Écrit des codes pour extraire le maximum des données collectées

**Polymécanicien**

Crée des composants de haute précision pour des équipements scientifiques uniques

**Agent de nettoyage**

Nettoie minutieusement autour des équipements fragiles et coûteux

**Technicien**

Assure la maintenance des équipements pour les maintenir à une température inférieure à celle de l'espace

**Ingénieur du Vide**

Met sous vide la trajectoire du faisceau de particules

**Ingénieur accélérateur**

Assure la production de faisceaux de particules de haute qualité pour les expériences

**Administrateur réseaux informatiques**

Fait en sorte que les ordinateurs et les équipements communiquent correctement entre eux

**Ingénieur mécanique**

Transforme des idées d'instrument en réalités

**Ingénieur en électronique**

Rend rapide les caméras et systèmes de détection pour capter les nouvelles sciences

**Scientifique**

Conçoit des expériences pour faire de nouvelles découvertes



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/texte

Dr. Martyn J. Bull

### Comité d'édition

Dagmar Baroke, Dr. Martyn J. Bull,  
Dr. Paul Piwnicki

### Photos et illustrations

Toutes les photos Scanderbeg  
Sauer Photography, sauf:  
page 1/30: Markus Fischer  
page 6: Frank Reiser  
page 15: Daniel Berger  
page 18: illustration H. M. Rønnow

### 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  
Tél. +41 56 310 21 11

Villigen PSI, novembre 2018

## Contacts

### Chef de la division de recherche Recherche avec neutrons et muons

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

### Chef du laboratoire de Diffusion neutronique et imagerie

Prof. Dr. Michel Kenzelmann  
Tél. +41 56 310 53 81  
michel.kenzelmann@psi.ch

### Chef du laboratoire de Spectroscopie muonique

Dr. Thomas Prokscha a.i.  
Tel. +41 56 310 42 75  
thomas.prokscha@psi.ch

### Chef du laboratoire de Instrumentation Neutron et Muon

Prof. Dr. Marc Janoschek  
Tel. +41 56 310 49 87  
marc.janoschek@psi.ch

### Responsable PSI User Office

Dr. Stefan Janssen  
Tél. +41 56 310 28 75  
stefan.janssen@psi.ch

### Chef du département Communication

Dr. Mirjam van Daalen  
Tel. +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](http://www.psi.ch)

SINQ/SpS\_f, 2/2024

