

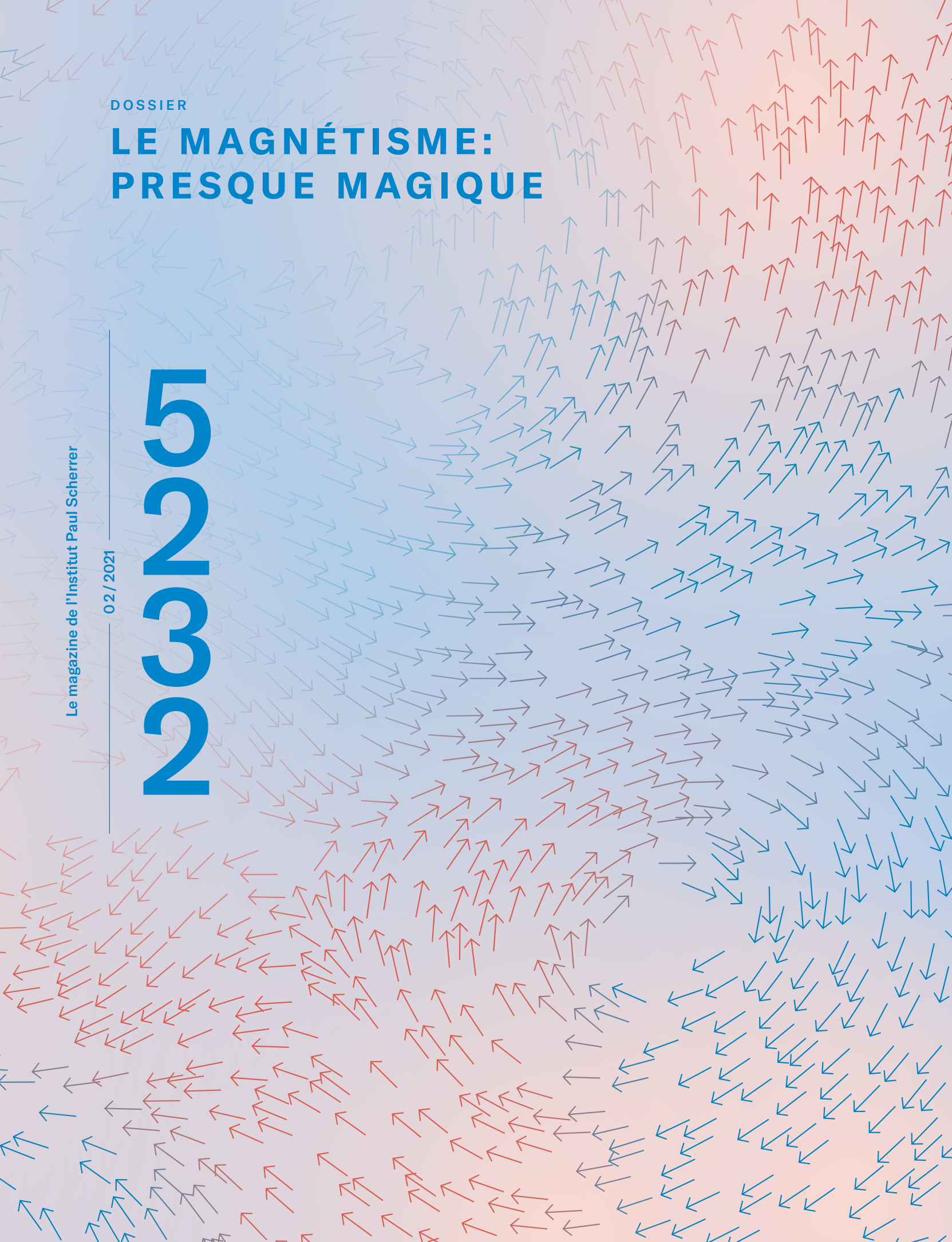
DOSSIER

LE MAGNÉTISME: PRESQUE MAGIQUE

Le magazine de l'Institut Paul Scherrer

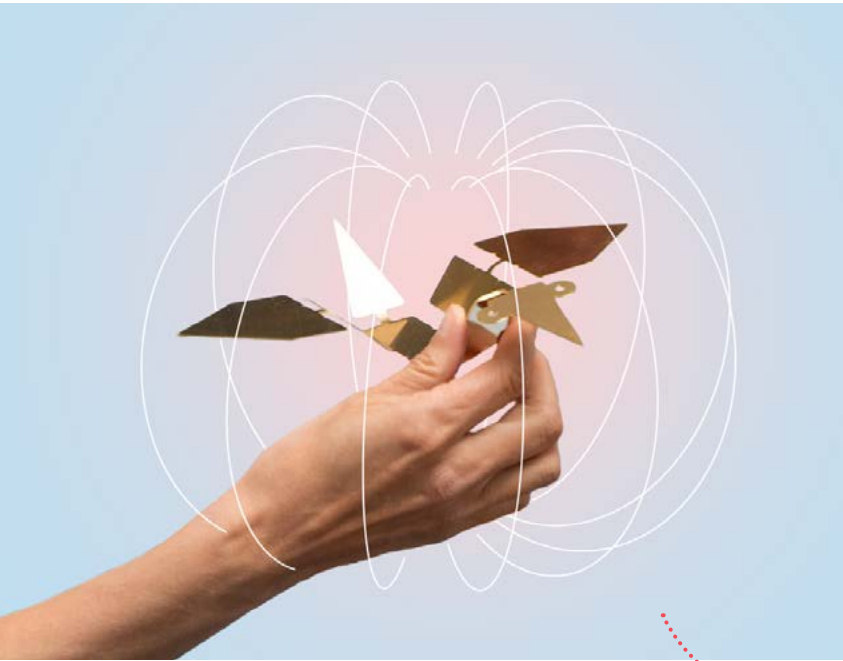
02 / 2021

2025



DOSSIER

LE MAGNÉTISME: PRESQUE MAGIQUE



TOILE DE FOND

Une force magique qui fait grand effet

Au PSI, les chercheurs s'efforcent de percer les derniers secrets du magnétisme. A cet effet, ils utilisent des aimants pour accélérer les électrons et les protons dans les grandes installations de recherche. Cela leur permet de développer des nanorobots et des matériaux à mémoire de forme ou encore d'étudier des tourbillons magnétiques destinés à l'électronique.

Page 10

1

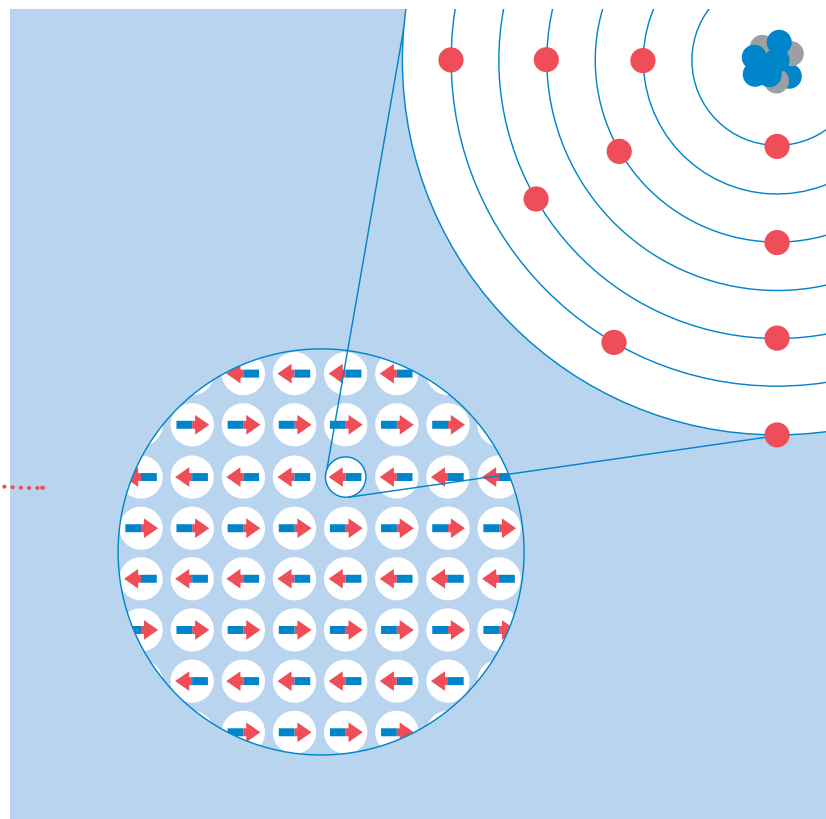
INFOGRAPHIE

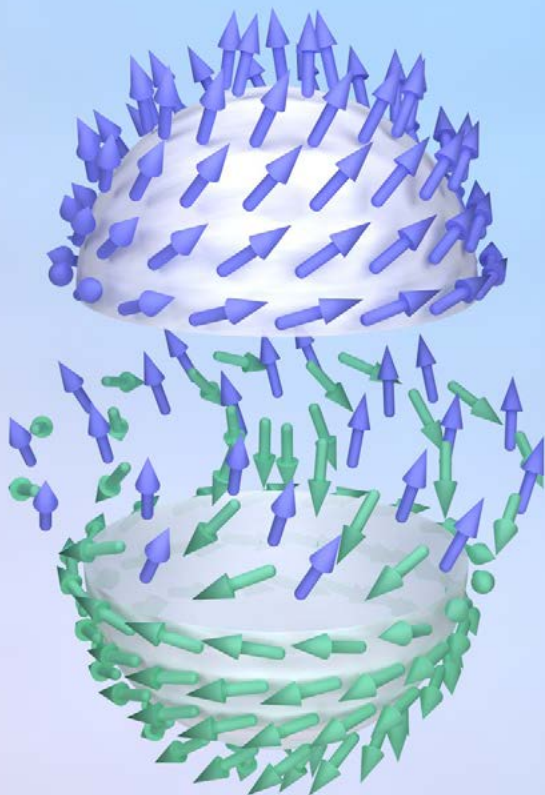
Magnétisme

Comment un matériau devient-il magnétique? Que sont les domaines? Qu'est-ce qui caractérise le ferromagnétisme, le ferrimagnétisme et l'antiferromagnétisme? Notre infographie explique les diverses facettes du magnétisme.

Page 16

2





3

REPORTAGE

Nanomonde magnétique

Scruter la matière en profondeur permet de faire d'étonnantes découvertes sur le magnétisme. Des chercheurs nous expliquent en quoi des skyrmions ou des aimants frustrés pourraient améliorer les technologies de l'information de demain.

Page 18

CONTENU

QUESTIONS-RÉPONSES	
Trois questions à Christian Rüegg	4
QUOTIDIEN	
Moche et désagréable	6
RECHERCHE	
Beaux et utiles	7
C DOSSIER	
LE MAGNÉTISME: PRESQUE MAGIQUE	8
C TOILE DE FOND	
Une force magique qui fait grand effet	10
C INFOGRAPHIE	
Magnétisme	16
C REPORTAGE	
Nanomonde magnétique	18
EN IMAGE	
Des électrolyseurs plus efficaces	21
EN SUISSE	
Coronavirus: dissiper le flou qui entoure les chiffres	22
L'Hôpital universitaire de Zurich étudie à l'aide de protéines «made in Villigen» combien d'individus en Suisse ont bel et bien été infectés par le Sars-CoV-2.	
EN BREF	
Actualité de la recherche au PSI	26
1 Particules fines nocives pour la santé	
2 Le noyau d'hélium précisément mesuré	
3 De meilleurs qubits	
4 Salle blindée contre le magnétisme	
GALERIE	
Le PSI de nuit	28
Des photos – réalisées lors d'une promenade nocturne sur le site du PSI – sont l'occasion de redécouvrir l'institut sous une lumière particulière.	
PORTRAIT	
«Il faut respecter les promesses qu'on se fait à soi-même»	34
Vaida Auzelyte a fondé, à Lausanne, une start-up qui munit d'hologrammes les produits en plastique. La physicienne lituanienne tire encore profit de son expérience au PSI.	
QUI SOMMES-NOUS?	38
IMPRESSUM	40
DANS LE PROCHAIN NUMÉRO	41

Christian Rüegg, le magnétisme est une force que chacun a déjà observée dans sa vie quotidienne. Quel est le rapport entre le PSI et ce phénomène presque magique?

Le magnétisme est un excellent exemple de la manière dont les phénomènes physiques imprègnent tout: de notre vie de tous les jours à la recherche fondamentale. Le magnétisme, tel que nous le connaissons, dans les fermoirs des étuis de téléphone portable et des sacs à main ou encore dans certains jouets, est le même que celui que nous utilisons dans notre recherche. Le PSI est un exemple éloquent de la recherche *sur et avec* le magnétisme, car, sans lui, nous ne pourrions pas exploiter nos grandes installations de recherche. Ainsi, tous nos accélérateurs de particules utilisent des aimants pour accélérer des protons ou des électrons et pour les diriger sur certaines trajectoires. Pour la mise à niveau de la SLS, nous sommes en train de développer des aimants complètement nouveaux, basés sur des matériaux fortement magnétiques.

Le PSI fait ensuite de la recherche à l'aide des accélérateurs de particules – entre autres sur le magnétisme.

C'est exact. Nous utilisons le magnétisme pour la recherche et, d'un autre côté, nous menons de la recherche sur le magnétisme. Nous utilisons par exemple des neutrons. Ces composants des noyaux atomiques possèdent un moment magnétique et se comportent donc quasiment comme une aiguille de boussole. Quand nous envoyons ces minuscules particules à travers un matériau, elles sont influencées pendant leur passage par les propriétés magnétiques des atomes qui le constituent. C'est une chose que nous pouvons mesurer et qui nous permet de déduire les propriétés du matériau, mais sans influencer ni détruire l'échantillon. Nous le faisons ici, à la SINQ, dont fait aussi partie le spectromètre CAMEA, que nous avons construit avec l'EPFL, près duquel je me trouve et où je mène moi-même des recherches. Nous explorons le magnétisme dans le cadre de nombreuses expériences: par exemple lorsque nous utilisons la SLS pour observer les processus qui se jouent dans un aimant à l'échelle de quelques nanomètres, soit quelques milliardièmes de mètre, et ainsi mieux comprendre comment le magnétisme apparaît et peut être contrôlé. Nous espérons que ces connaissances nous permettront de rendre l'électronique et l'informatique de demain encore plus performantes.

Y a-t-il des domaines où le magnétisme est un perturbateur?

C'est le cas dans la recherche que nous menons. Par exemple, le magnétisme perturbe la recherche du moment dipolaire électrique des neutrons, dont nous venons de parler. Jusqu'ici, personne n'a réussi à mesurer ce moment dipolaire. Si nous devions y arriver, cela indiquerait qu'il y a un problème dans le modèle standard de la physique des particules, tel que nous le connaissons, et cela nous fournirait des informations sur ce qui s'est passé au tout début de notre univers. Actuellement, nous sommes en train de mettre sur pied une expérience très délicate qui pourrait être perturbée par des influences magnétiques extérieures. C'est pourquoi nous achèverons, d'ici à la fin de l'année, au PSI, la construction d'une salle à blindage magnétique qui sera la meilleure du monde, du moins de cette taille. Nous pourrons alors commencer à installer les appareils et les capteurs pour l'expérience. Ces derniers sont si sensibles qu'ils sont capables de détecter le signal magnétique d'un camion qui passe à deux kilomètres du PSI.

Trois questions à Christian Rüegg

Lorsque l'on visite le PSI, on ne pense pas en premier au magnétisme. Pourtant, sans ce phénomène physique, l'institut n'existerait pas. Christian Rüegg, directeur du PSI, nous explique pourquoi il en va ainsi et dans quelles circonstances le magnétisme est un perturbateur.

Moche et désagréable

Qui ne connaît ce problème? Les robinets sont de nouveau recouverts d'une croûte blanche, alors que le dernier nettoyage remonte à peu de temps. Et une épaisse couche blanche tapisse aussi les parois et le fond de la bouilloire électrique.

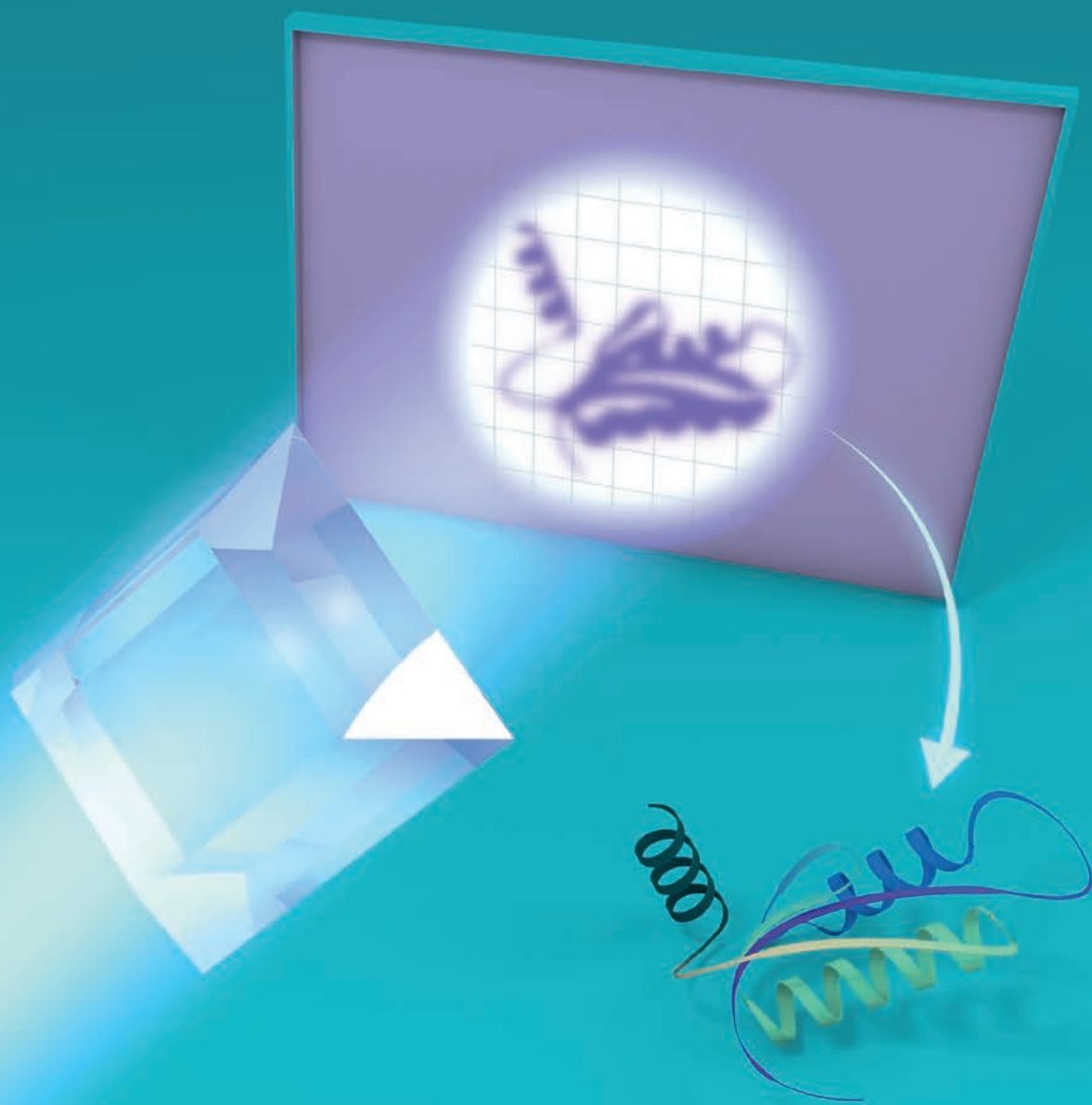
Ce calcaire tenace qui semble surgir de nulle part est un mélange de carbonate de calcium et de carbonate de magnésium. Ces sels commencent par former de petits cristaux, puis des cristaux de plus en plus gros qui se déposent sous forme de solide blanc sur les parois des appareils et sur les robinets.

Il est typique des cristaux que leurs composants s'ordonnent en fonction d'une structure tridimensionnelle très régulière. Le phénomène est extrêmement courant dans la nature. Sel de cuisine, sucre, neige,

métaux ou calcaire: toutes ces substances sont composées de cristaux. Même si ces derniers ne sont pas toujours aussi beaux à admirer que le cristal de roche du musée géologique.

Les carbonates de calcium et de magnésium apparaissent lorsque l'eau du robinet reste longtemps immobile ou quand on la chauffe. Le dioxyde de carbone dissous s'en échappe alors. En conséquence, l'hydrogénocarbonate de calcium et l'hydrogénocarbonate de magnésium se transforment en carbonates. Les hydrogénocarbonates sont solubles, mais pas les carbonates. Ce sont eux qui forment cette fameuse croûte blanche indésirable.





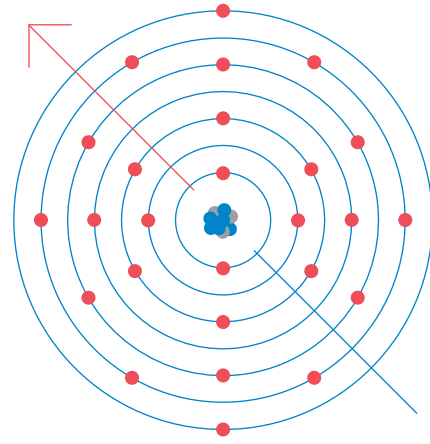
Beaux et utiles

Au PSI, les chercheurs radiographient des cristaux de protéines avec de la lumière de type rayons X à la Source de Lumière Suisse SLS. Ces protéines, ce sont par exemple celles du nouveau coronavirus Sars-CoV-2. Le diagramme de diffraction ainsi obtenu permet aux scientifiques de calculer la structure de ces biomolécules d'intérêt vital. La connaissance de ces structures contribue notamment au développement de nouveaux médicaments.

Mais on ne peut déterminer la structure d'une protéine que si l'on dispose d'un cristal. Autrement dit, lorsque les molécules de la protéine se sont ordonnées en fonction d'un schéma tridimensionnel régulier. Or, cela ne va pas toujours de soi. Ce qui fonctionne de manière plutôt simple et rapide dans le cas du sel de

cuisine, du sucre et du calcaire demande un grand art de persuasion dans le cas des protéines. Car ces molécules complexes présentent une structure tridimensionnelle compliquée. Elles ne forment qu'avec beaucoup d'hésitation des associations régulières et qui restent quand même relativement lâches – autrement dit, un cristal.

Jusqu'à présent, il n'existe pas de recette pour cultiver des cristaux de protéines. Le succès repose sur des essais et des erreurs, et nécessite surtout beaucoup d'expérience. Au site de production de cristaux du PSI, des expertes épaulent des chercheurs du monde entier pour faire apparaître de ravissants cristaux qui conviennent aux analyses à partir de «leurs» protéines.



TOILE DE FOND
Une force magique
qui fait grand effet
Page 10

1

2

INFOGRAPHIE
Magnétisme
Page 16

DOSSIER

Le magnétisme: presque magique

Sans aimants et sans magnétisme, le PSI n'existerait pas. C'est en effet grâce à cette force aux propriétés presque magiques que les chercheurs déchiffrent les dernières énigmes de la matière et remontent aux origines de notre univers.

REPORTAGE

Nanomonde magnétique

Page 18

3



Une simple sonde magnétique 3D permet de déterminer la direction du champ magnétique autour d'une barre magnétique, d'un câble ou d'une bobine. Au centre de la sonde se trouve un petit aimant monté sur un cardan, c'est-à-dire fixé à deux paliers rotatifs croisés et perpendiculaires l'un à l'autre. Une fois dans le champ magnétique, il s'aligne en conséquence.

Une force magique qui fait grand effet

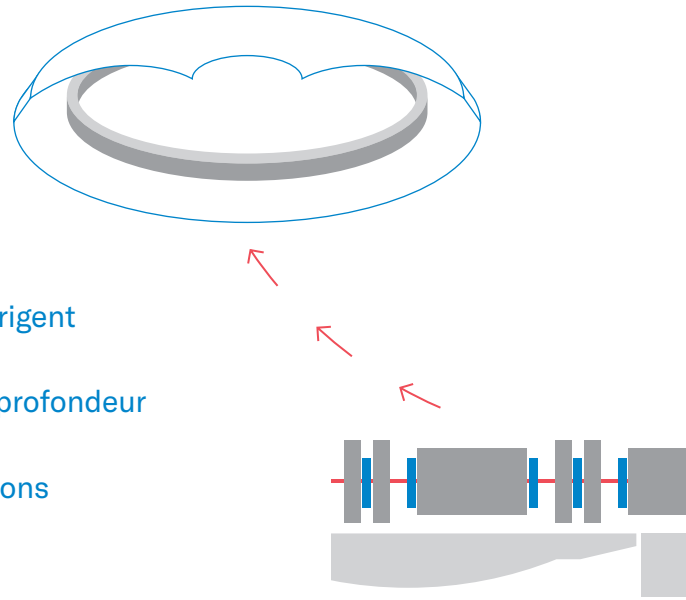
Dans les accélérateurs, ce sont de puissants aimants qui dirigent les particules élémentaires et qui fournissent aux stations expérimentales le rayonnement nécessaire pour scruter en profondeur l'intérieur des matériaux. Ces connaissances permettent aux chercheurs du PSI de développer de nouvelles applications dans le domaine technique et médical.

Texte: Barbara Vonarburg

Au milieu du grand hangar se dresse un cadre en métal de 50 centimètres, monté sur un bloc de béton. Ce cadre est le socle – aussi appelé «joug» – d'un nouvel aimant, plus précisément d'un prototype actuellement assemblé au PSI. «Nous remplissons le joug avec de petits blocs d'aimants permanents, mais nous devons être très prudents, explique Stéphane Sanfilippo, responsable de la section Aimants au PSI. Les forces qui agissent ici sont énormes. On peut facilement se briser la main.» La force avec laquelle deux de ces petits aimants adhèrent l'un à l'autre correspond à un poids de 180 kilogrammes. Les blocs, faits d'un alliage de néodyme, de fer et de bore, sont partie intégrante d'un design que des spécialistes du PSI ont développé par ordinateur. Presque mille aimants, dont les aimants permanents, sont en train d'être construits pour l'upgrade de la Source de Lumière Suisse SLS. L'accélérateur de particules, qu'abrite le grand bâtiment en forme d'OVNI à Villigen depuis 2001, est en cours de rénovation. Dès 2025, cette grande installation de recherche rebaptisée SLS 2.0 fournira une lumière de type rayons X d'une qualité encore supérieure. A la fin de l'année dernière, le Conseil fédéral a donné son feu vert pour le financement de ce projet à hauteur de 99 millions de francs. Cette mise à jour doit permettre de traiter mieux et, surtout, plus rapidement de nouvelles questions, par exemple dans le domaine de la recherche sur les biomolécules ou encore en sciences des matériaux.

De puissants aimants se trouvent dans tous les accélérateurs du PSI: l'accélérateur de protons HIPA, le plus puissant du genre au monde, qui alimente en protons certaines grandes installations de recherche – la source suisse de neutrons de spallation SINQ, la

La Source de Lumière Suisse SLS va bénéficier d'une mise à jour.

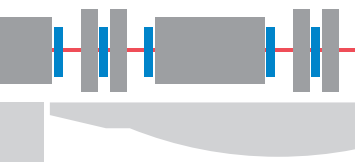


source suisse de muons $S\mu S$ et l'Infrastructure suisse pour la physique des particules CHRISP; le laser suisse à rayons X à électrons libres SwissFEL; le cyclotron COMET pour la protonthérapie ou encore la SLS. Dans les accélérateurs, ce sont normalement des électroaimants qui dirigent les particules sur leur trajectoire. Ces derniers sont composés d'une bobine de fil de cuivre enroulé. Lorsque le courant passe à travers la bobine, un champ magnétique se forme. L'avantage des électroaimants est le suivant: contrairement aux aimants permanents, ils peuvent être activés et désactivés, et il est possible de régler l'intensité de leur champ au moyen du flux du courant. Certains aimants destinés à la SLS 2.0 resteront des électroaimants, comme dans l'engin d'origine. «Mais c'est la première fois que nous construisons des aimants permanents pour un grand accélérateur du PSI, précise Stéphane Sanfilippo. Par ce biais, nous pouvons économiser de la place.» En effet, contrairement aux électroaimants, les aimants permanents n'ont besoin ni de raccordement électrique ni d'eau de refroidissement, ce qui permettra de réduire massivement la consommation d'électricité pour l'alimentation des aimants de la SLS 2.0 en comparaison de la SLS. Grâce aux aimants permanents, on économise environ 10 000 kilowatt-heures par journée d'exploitation, soit 1000 francs de frais d'électricité. Autrement dit, en exploitation, la SLS 2.0 sera «plus verte».

Développer, construire et tester

Dans la partie arrière du hangar, l'équipe de Stéphane Sanfilippo développe un troisième type d'aimants qui permet de générer des champs particulièrement in-

Stéphane Sanfilippo, responsable de la section Aimants, avec l'un des aimants qui équiperont la Source de Lumière Suisse SLS.



Coupe de l'anneau de stockage d'électrons de la SLS, qui sera nouvellement équipé d'aimants.



tenses. Le matériau utilisé ici est supraconducteur. Il conduit le courant sans perte, mais doit être maintenu à des températures extrêmement basses. Des aimants supraconducteurs compacts seront utilisés à la SLS 2.0, mais aussi dans l'étude de concept sur le futur collisionneur circulaire (étude FCC) au CERN, le centre européen pour la recherche nucléaire, situé dans la région genevoise. Le PSI contribue au développement de la technologie dans le cadre du réseau de recherche suisse CHART (Swiss Accelerator Research and Technology). «Nous construisons ici l'infrastructure et le savoir nécessaires au développement d'aimants supraconducteurs pour les accélérateurs, souligne Stéphane Sanfilippo. Pour ce faire, nous exploitons les synergies entre les projets du PSI et du CERN.»

De l'autre côté, séparée du reste du hangar, se trouve une salle qui abrite des installations très diverses et d'allure exotique au premier abord. Un panneau met en garde les porteurs de stimulateur cardiaque contre de puissants champs magnétiques. «Dans ce zoo d'instruments de mesure, nous testons les électroaimants que nous avons produits nous-mêmes et ceux qui nous ont été livrés par des entreprises», explique Stéphane Sanfilippo. Ce n'est que si les aimants remplissent véritablement les spécifications que les techniciens les intégreront à la SLS 2.0.

Dans l'accélérateur rénové, les nombreux aimants compacts dirigeront les électrons sur une trajectoire circulaire optimisée, avec des arrondis plus doux

qu'auparavant. Cela permettra d'améliorer de plusieurs ordres de grandeur la qualité des rayons X qui seront produits chaque fois que les électrons changeront de direction. Valerio Scagnoli s'en réjouit déjà. Ce scientifique expérimenté fait partie d'une équipe qui utilise la SLS pour visualiser des configurations magnétiques en 3D avec une précision spatiale inégalée. «Aujourd'hui, pour une expérience, nous avons besoin d'un ou deux jours, dit-il. A l'avenir, ce sera de dix à cent fois plus rapide. Et grâce à l'upgrade, la résolution spatiale des images va radicalement augmenter.»

Une boussole qui indique l'ouest

Valerio Scagnoli est membre du groupe de recherche Systèmes mésoscopiques, un laboratoire commun du PSI et de l'ETH Zurich, placé sous la houlette de Laura Heyderman. Par «mésoscopique», les spécialistes entendent la fourchette de dimensions entre

«Les forces qui agissent ici sont énormes. On peut facilement se briser la main.»

Stéphane Sanfilippo, responsable de la section Aimants

le millièème de millimètre (nanomètre) et le millièème de millimètre (micromètre). A l'aide de la SLS, les chercheurs du groupe de Laura Heyderman ont découvert une interaction magnétique particulière au niveau des structures nanoscopiques composées de quelques couches d'atomes.

En principe, les aimants se caractérisent par le fait qu'ils ont un pôle nord et un pôle sud. Lorsqu'on maintient deux aimants proches l'un de l'autre, les pôles opposés s'attirent et les pôles similaires se repoussent. C'est pourquoi, dans le champ magnétique terrestre, les aiguilles magnétiques des boussoles indiquent les points cardinaux nord et sud, ce qui permet de déduire l'est et l'ouest. Dans notre univers quotidien, tel que nous le percevons par le biais de nos sens, cette règle est correcte. Toutefois, si l'on quitte le monde macroscopique pour plonger dans les profondeurs de dimensions beaucoup plus petites, les choses changent.

Là, les atomes agissent comme de minuscules aiguilles de boussole et déploient leur effet sur des distances, extrêmement courtes, de quelques millièèmes de millimètre. C'est pourquoi les chercheurs parlent aussi de «nanoaimants».

Le phénomène que les chercheurs du PSI ont réussi à observer est fondé sur une interaction que les physiciens Igor Dzyaloshinskii et Toru Mariya avaient prédite il y a plus de soixante ans. Dans ce cadre, les aiguilles des atomes n'indiquent pas seulement la direction nord-sud, mais aussi est-ouest. La direction pointée dépend de l'orientation des atomes voisins. Si, par exemple, un groupe d'atomes indique le nord, le groupe voisin indique toujours l'ouest. Si un groupe d'atomes indique le sud, le groupe d'atomes voisin indique l'est.

Ces orientations peuvent être inversées par le biais de champs magnétiques et de courants électriques, c'est-à-dire du nord vers le sud et inversement. Les groupes d'atomes voisins se réorientent alors en conséquence, soit de l'ouest vers l'est, soit inversement. Ce qui est inhabituel en l'occurrence, c'est le fait que cette interaction s'exerce latéralement, autrement dit dans un seul plan. Jusque-là, en effet, des couplages comparables entre nanoaimants n'ont pu être observés qu'à la verticale, c'est-à-dire dans des groupes d'atomes superposés. Le phénomène qui vient d'être découvert pourrait permettre de construire

Laura Heyderman dirige le Laboratoire des systèmes mésoscopiques et étudie notamment les possibilités qu'offre le magnétisme pour construire des microrobots intelligents ou développer des matériaux à mémoire de forme. Elle tient ici un modèle fortement agrandi du microrobot en forme d'oiseau qu'elle a contribué à développer.



de nouvelles mémoires et de nouveaux commutateurs informatiques, plus efficaces, ce qui améliorerait la performance des microprocesseurs.

Microrobots intelligents

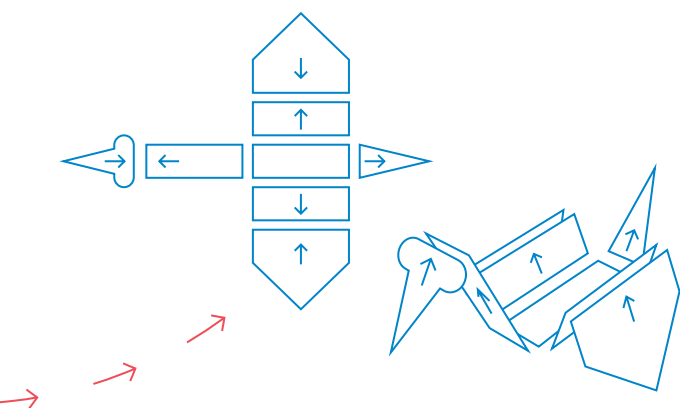
Toujours dans le groupe de Laura Heyderman, des chercheurs ont développé de minuscules systèmes magnétiques dotés de propriétés novatrices. «Dans le futur, des microrobots intelligents pourraient naviguer dans les vaisseaux sanguins du corps humain et y accomplir certaines tâches biomédicales», relève Jizhai Cui, un chercheur qui a travaillé pendant quatre ans comme postdoc dans le groupe de Laura Heyderman et qui monte, en ce moment, son propre groupe de recherche à l'Université Fudan de Shanghai. Ces minuscules machines pourraient par exemple éliminer des cellules cancéreuses de manière ciblée.

Les chercheurs du PSI ont déjà démontré comment le principe pourrait fonctionner avec un robot de quelques micromètres en forme d'oiseau, capable de battre des ailes, de fléchir le cou et de glisser sur le côté. Ils avaient placé de minuscules aimants de cobalt sur de fines couches de nitrure de sodium. «Lorsqu'on équipe un robot de nanoaimants, ces derniers peuvent réagir comme une boussole à des champs magnétiques appliqués de l'extérieur, explique Jizhai Cui. Les microrobots peuvent ainsi se mouvoir vers l'avant, comme s'ils étaient actionnés par un moteur, lorsque le champ magnétique tourne autour d'un axe.» Il s'agit maintenant de rendre ces microrobots biodégradables au cours d'une prochaine étape. «Je me réjouis beaucoup d'une collaboration entre l'Université Fudan et le PSI», poursuit le chercheur.

En coopération avec l'ETH Zurich, les chercheurs du PSI ont développé un autre matériau doté d'une propriété étonnante: la mémoire de forme. Lorsqu'on contraint ce matériau composite dans une forme donnée et qu'on l'expose ensuite à un champ magnétique, il conserve cette forme. C'est seulement si l'on ôte le champ magnétique qu'il retrouve sa forme d'origine. Jusqu'ici, les matériaux comparables étaient composés d'un polymère avec des particules métalliques

intégrées. À la place, les chercheurs du PSI et de l'ETH Zurich ont inséré des particules magnétiques dans le polymère à l'aide de gouttelettes composées d'eau et de glycérine. Ce faisant, ils ont produit une dispersion semblable à celle du lait. Les gouttelettes de liquide qui renferment les particules magnétiques se répartissent dans le nouveau matériau avec la même finesse. «Comme la phase magnétiquement sensible dispersée dans le polymère est un liquide, les forces produites lors de l'application du champ magnétique sont nettement plus importantes que ce que l'on connaissait jusqu'ici», explique Laura Heyderman. Lorsqu'un champ magnétique agit sur le matériau composite, ce dernier se rigidifie.

D'innombrables applications dans les domaines de la médecine, de la navigation spatiale, de l'électronique ou encore de la robotique sont envisageables pour les matériaux à mémoire de forme. Des cathéters insérés par voie sanguine dans l'organisme, lors d'interventions chirurgicales mini-invasives, pourraient ainsi modifier leur raideur, ce qui offrirait un avantage: ils ne se rigidifieraient qu'au moment nécessaire et provoqueraient donc moins d'effets indésirables du type «thromboses» lors de leur passage dans un vaisseau sanguin. Dans le domaine de la navigation spatiale, on a besoin de matériaux à mémoire de forme pour une espèce de pneu destiné aux véhicules d'exploration, qui soit capable de se gonfler et de se replier de manière autonome. Dans le domaine de l'électronique, les matériaux fonctionnels souples servent de fils électriques ou de lignes de données flexibles, par exemple dans ce qu'on appelle les «wearables», autrement dit des appareils que l'on porte dans les vêtements ou à même le corps. La mémoire de forme ouvre aussi de nouvelles possibilités dans le domaine de la robotique: par exemple, avec des matériaux capables d'exécuter des mouvements mécaniques sans moteur.



L'utilisation de champs magnétiques permet de programmer et de contrôler des microrobots comme ce prototype en forme d'oiseau. Ces minuscules auxiliaires pourraient un jour se déplacer dans le circuit sanguin jusqu'aux tissus qu'ils auraient pour mission d'opérer. De nouveaux matériaux, dont la mémoire de forme serait activée ou désactivée grâce au magnétisme, pourraient par exemple faire office de stents pour stabiliser des vaisseaux sanguins.

«Le matériau avec lequel je travaille est très spécial.»

Marisa Medarde, responsable du groupe de recherche
Propriétés physiques des matériaux

Colosses de 250 tonnes

Au PSI, dans le domaine du magnétisme, les sauts entre les différentes dimensions sont énormes et vont de l'infiniment petit au gigantesque. Pour s'en rendre compte, il suffit de pénétrer dans le complexe de bâtiments situé juste à côté du hangar où l'équipe emmenée par Stéphane Sanfilippo développe les nouveaux aimants pour l'upgrade de la SLS. C'est là que se trouve la plus ancienne installation de recherche du PSI encore en service: l'accélérateur de protons à haute intensité HIPA. Ses huit gigantesques aimants électroniques turquoise, qui datent de 1974, pèsent 250 tonnes chacun. «L'entretien de ces aimants et d'autres semblables qui se trouvent dans les accélérateurs et les laboratoires du PSI est l'une des tâches qui nous incombent, souligne Stéphane Sanfilippo. Notre objectif est de faire en sorte que les arrêts restent aussi brefs que possible.»

Découper les aciers électriques de manière optimale

A la source de neutrons à spallation SINQ, les protons accélérés par HIPA percutent un bloc de plomb et cette collision arrache des neutrons aux noyaux atomiques. «Les neutrons peuvent facilement pénétrer dans la matière et, de ce fait, ils sont idéaux pour scruter l'intérieur des matériaux, explique Markus Strobl, responsable du groupe Matériaux appliqués au PSI et professeur à l'Université de Copenhague. Et bien que les neutrons soient électriquement neutres, ils possèdent un moment magnétique et interagissent avec les champs magnétiques.» Il est ainsi possible de visualiser, dans un matériau, les domaines où la magnétisation se fait dans une direction uniforme: par exemple dans ce qu'on appelle les «aciers électriques», qui sont utilisés pour des moteurs électriques, des générateurs et des transformateurs. Ces produits représentent une importante part de marché.

«Le design des domaines magnétiques dans ces aciers est important pour l'efficacité des machines», souligne Markus Strobl. Or, des visualisations de l'intérieur des matériaux ont montré que la découpe des aciers électriques influençait de manière négative

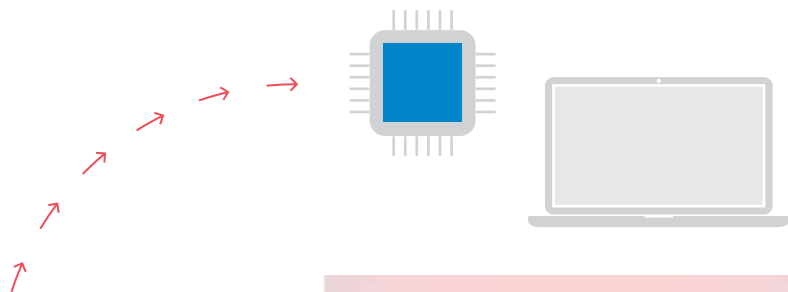
leurs propriétés magnétiques au niveau des bords. «Sur mandat d'une entreprise autrichienne, nous avons étudié comment améliorer la technique de découpe et éviter ainsi des pertes d'énergie», raconte Markus Strobl. Les études sur les aciers électriques doivent maintenant se poursuivre en collaboration avec le Fraunhofer-Institut d'Allemagne.

De petites spirales au grand potentiel

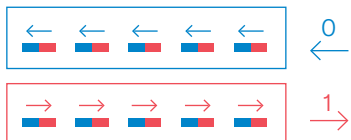
Les visualisations de Markus Strobl et de son groupe ont une résolution qui va du millième de millimètre au centimètre. L'échelle de longueur, à laquelle s'intéresse Marisa Medarde, relève quant à elle du millièmième de millimètre, soit la taille des atomes. «Le matériau avec lequel je travaille est très spécial», explique cette chercheuse, responsable du groupe Propriétés physiques des matériaux. Il contient de minuscules aimants qui s'ordonnent en spirales. Les neutrons de la SINQ permettent de mettre en évidence ces spirales. Les chercheurs supposent que cela s'accompagne d'une propriété particulièrement désirable: la magnétisation du matériau peut être contrôlée au moyen d'un champ électrique, ce qui est beaucoup plus simple et moins énergivore que le recours à un champ magnétique.

Ces matériaux sont donc considérés comme de bons candidats pour les futures mémoires informatiques. Celui de Marisa Medarde, dont la formule chimique est YBaCuFeO_5 , est particulièrement prometteur. Car, jusque-là, ces spirales magnétiques avaient été mises en évidence uniquement à des températures extrêmement basses. «Or, nos spirales existent à température ambiante, rappelle la chercheuse. Par ailleurs, on peut les modifier relativement facilement, ce qui est complètement inattendu.» Son astuce consiste à chauffer d'abord le matériau à plus de 1000 °C, avant de le plonger directement dans l'azote liquide à -200 °C. L'objectif de Marisa Medarde et de son équipe est de montrer lors d'une prochaine étape que ce matériau présente bel et bien les propriétés espérées. L'utilisation de ce genre de matériaux devrait permettre l'avènement d'ordinateurs plus économes en énergie.

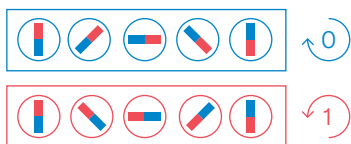
La force presque magique du magnétisme relie ainsi de très nombreux travaux de recherche au PSI. Peu importe que ceux-ci soient consacrés aux structures logées dans les ordinateurs, aux matériaux innovants destinés aux domaines médical et technique ou encore aux immenses installations qui accélèrent de minuscules particules. ◆



Bit ferromagnétique



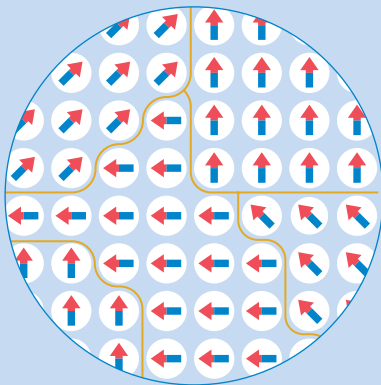
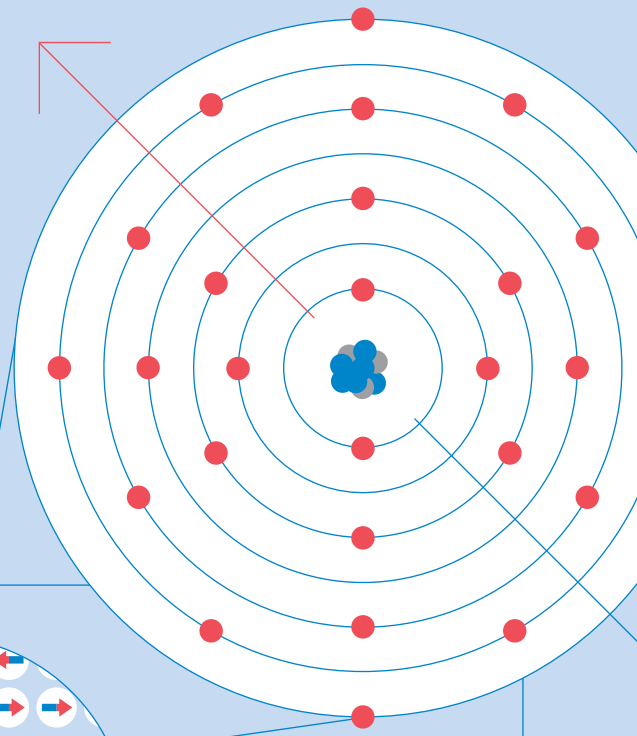
Bit en spirale



Marisa Medarde, responsable du groupe Propriétés physiques des matériaux, étudie de minuscules aimants qui s'ordonnent en spirale dans des matériaux bien particuliers. Elle commence par chauffer le matériau à plus de 1000 °C dans un four spécial, avant de le plonger directement dans l'azote liquide à -200 °C, que contient le récipient de son collègue.

Magnétisme

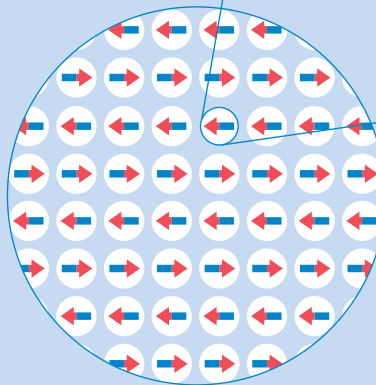
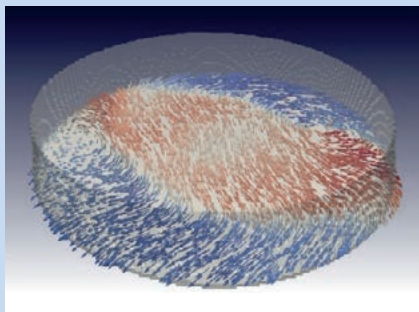
Les champs magnétiques du quotidien sont générés soit par les aimants élémentaires de matériaux magnétiques, soit par du courant électrique. Les aimants de maintien, les électroaimants ou encore l'imagerie par résonance magnétique en médecine et en recherche en sont autant d'applications répandues.



Domaines

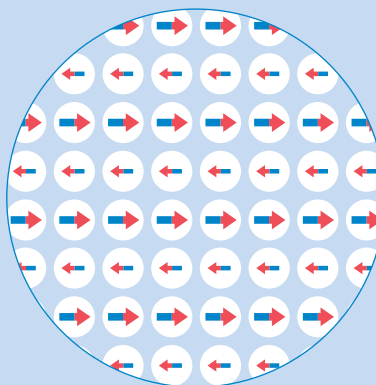
Les aimants élémentaires ont tendance à s'aligner de manière uniforme, du moins dans certaines zones. Ces zones sont appelées «domaines». Les limites des domaines sont ici indiquées en jaune.

Au PSI, les chercheurs ont réussi à enregistrer les tourbillons qui se produisent aux limites des domaines dans une sorte de film en 3D, dont est extraite l'image ci-dessous. Le domaine, représenté ici par des flèches rouges, s'étend seulement sur quelques nanomètres.



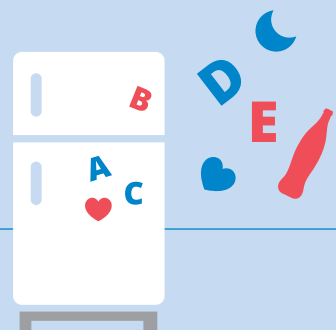
Antiferromagnétisme

Dans une structure antiferromagnétique, deux sous-réseaux d'aimants élémentaires sont orientés de manière antiparallèle dans le plus simple des cas, de telle sorte que leurs moments magnétiques s'annulent. Ces matériaux ne présentent aucun moment magnétique permanent. Si les moments magnétiques des deux sous-réseaux, alignés dans des directions opposées, n'ont pas la même force, cela peut générer du ferrimagnétisme. Une force magnétique agit vers l'extérieur, mais plus faiblement que dans le cas du ferromagnétisme.



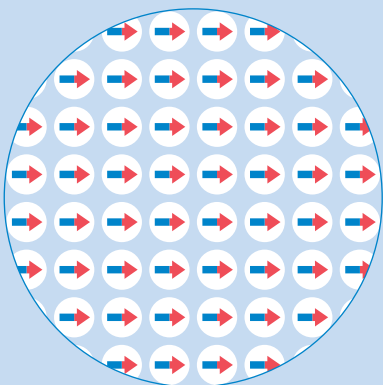
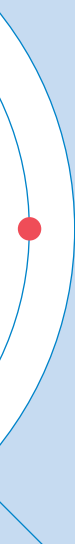
Ferrimagnétisme

Les matériaux ferrimagnétiques sont utilisés par exemple pour fabriquer les aimants qui collent à la porte du réfrigérateur.



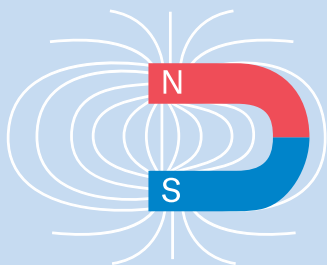
Aimant élémentaire

Exemple: un atome de fer



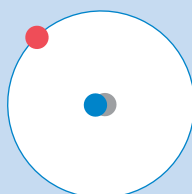
Ferromagnétisme

Les différents aimants élémentaires sont alignés de manière uniforme. Ce phénomène peut être déclenché par un champ magnétique externe, par exemple.



Le matériau magnétisé reste dans cet état et devient un aimant permanent.

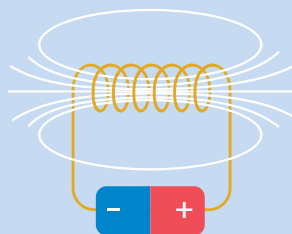
Imagerie par résonance magnétique



Chaque noyau atomique possède ce qu'on appelle un «spin», c'est-à-dire un moment angulaire qui résulte de la somme des spins des composants du noyau. Il en découle un moment magnétique.

L'imagerie par résonance magnétique exploite le moment magnétique de certains noyaux atomiques, par exemple celui de l'hydrogène. Cela permet d'obtenir des images en haute résolution des tissus organiques.

Electromagnétisme



Electroaimants: une bobine où circule du courant génère le champ magnétique.

Les électroaimants possèdent l'avantage de pouvoir être facilement activés puis arrêtés par du courant électrique. Et leur puissance peut être réglée par l'intensité du courant. L'aimant le plus puissant, travaillant de manière durable, est un électroaimant.

Nanomonde magnétique

Au PSI, les chercheurs étudient le magnétisme à l'échelle du millionième de millimètre. Ce faisant, ils rencontrent des phénomènes exotiques: des aimants frustrés et des nano-tourbillons qui pourraient permettre un jour de mieux stocker les données.

Texte: Barbara Vonarburg

D'où provient cette force apparemment magique qui maintient l'aimant collé à la porte du réfrigérateur? Pour répondre à cette question, il faut scruter la matière en profondeur. «Imaginez un atome avec des électrons qui gravitent autour du noyau, explique Frithjof Nolting, directeur du Laboratoire de matière condensée au PSI et professeur à l'Université de Bâle. D'un point de vue strictement scientifique, cette image classique est fautive, mais elle est très utile pour la compréhension.» Car ce sont les électrons qui produisent un champ magnétique. Les particules chargées électriquement se meuvent sur leur trajectoire autour du noyau atomique, mais elles ont aussi leur moment cinétique intrinsèque appelé «spin». Ces deux composantes produisent un moment magnétique, que l'on peut se représenter de manière simplifiée comme un bâtonnet magnétique.

«Pour qu'un matériau devienne magnétique vers l'extérieur, il faut que les moments magnétiques de tous les atomes pointent dans la même direction, relève Frithjof Nolting. C'est un mécanisme très compliqué.» Lorsque les moments magnétiques pointent tous dans la même direction, on parle de «ferromagnétisme». Lorsque des moments magnétiques voisins pointent dans des directions opposées, le matériau est antiferromagnétique et non magnétique vers l'extérieur. Les zones où les moments magnétiques sont alignés dans la même direction sont appelées «domaines» et chaque domaine est séparé du voisin par une paroi de domaine.

Dans le stockage magnétique de données sur des disques durs, les bits d'information sont enregistrés sous forme de domaines en couches minces. Un électroaimant qui sert de tête d'écriture modifie chaque fois la direction de magnétisation. Or, Frithjof Nolting et son groupe de recherche ont découvert comment l'on pouvait se passer de ce champ magnétique pour l'écriture: une impulsion laser permet de commuter de manière ciblée la direction de magnétisation des petites structures. Cette méthode serait beaucoup plus rapide que celle qui nécessite un élec-

troaimant et elle consommerait aussi moins d'énergie: un passionnant champ de recherche pour de futures analyses au SwissFEL. Mais on est encore très loin d'une application de cette nouvelle méthode, avertit le physicien, qui s'intéresse avant tout aux connaissances fondamentales que les explorations du nanomonde – de l'ordre du millionième de millimètre – permettent d'accumuler: «C'est un univers où il se produit des phénomènes exotiques qui sont à l'origine des drôles de propriétés de ces nanoaimants», précise-t-il.

Aimants frustrés

Les aimants frustrés en sont un bon exemple. L'idée qui vient spontanément à l'esprit – où l'on transpose dans l'univers de la physique l'état d'âme humain lié à l'impossibilité d'atteindre un état désiré – n'est pas fautive. Mais il n'est pas facile d'expliquer ce que les experts entendent vraiment par là. Frithjof Nolting se sert de ses mains pour illustrer son propos. Il pointe l'index de sa main droite vers le haut et celui de la gauche vers le bas. «Admettons que des moments magnétiques dans un matériau soient orientés de manière antiparallèle, explique-t-il. Comme on le voit ici, avec deux éléments, cela fonctionne. Mais si un troisième élément vient se glisser au milieu, il ne sait pas quelle direction indiquer; il est frustré.»

Les aimants frustrés sont le domaine de spécialité d'Oksana Zaharko, responsable du groupe de recherche Structure des solides au PSI. Elle poursuit la comparaison avec les trois éléments: «Nous avons un système où deux grandes forces s'affrontent, dit-elle. Et quand les deux grandes se font la guerre, la petite troisième en profite. C'est précisément ce qui se passe dans les systèmes frustrés.» Le système d'Oksana Zaharko est un minuscule cristal, un joli octaèdre métallique, tout juste visible à l'œil nu, qui réunit trois éléments: du manganèse, du scandium et du soufre. Vu le conflit qui existe entre les directions des moments magnétiques dans ce cristal antiferromagnétique, une dépendance de la direction apparaît: c'est

«Nous avons un système où deux grandes forces s'affrontent.»

Oksana Zaharko, responsable du groupe de recherche Structure des solides

ce qu'on appelle une «anisotropie». «C'est elle, notre troisième larronne», explique Oksana Zaharko. L'anisotropie entraîne la formation de minuscules tourbillons dans l'alignement des moments magnétiques.

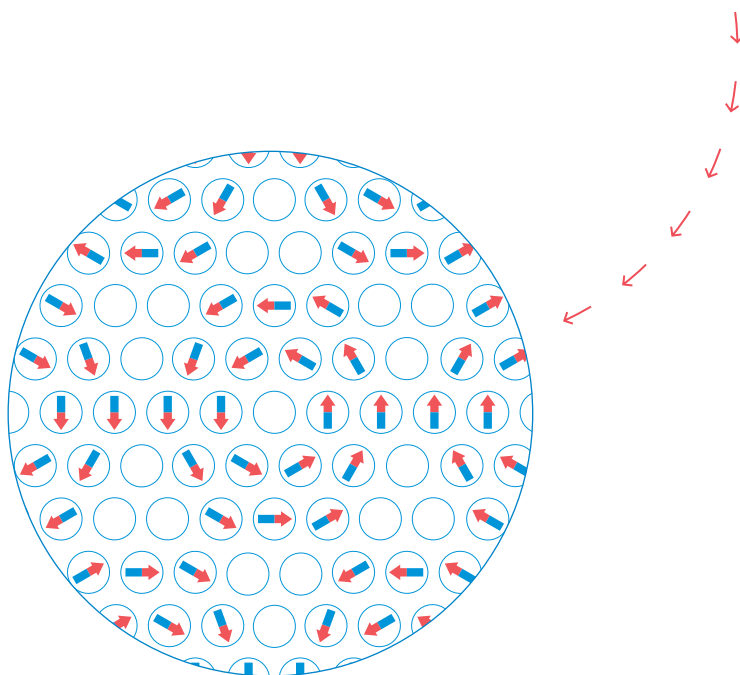
Minuscules tourbillons

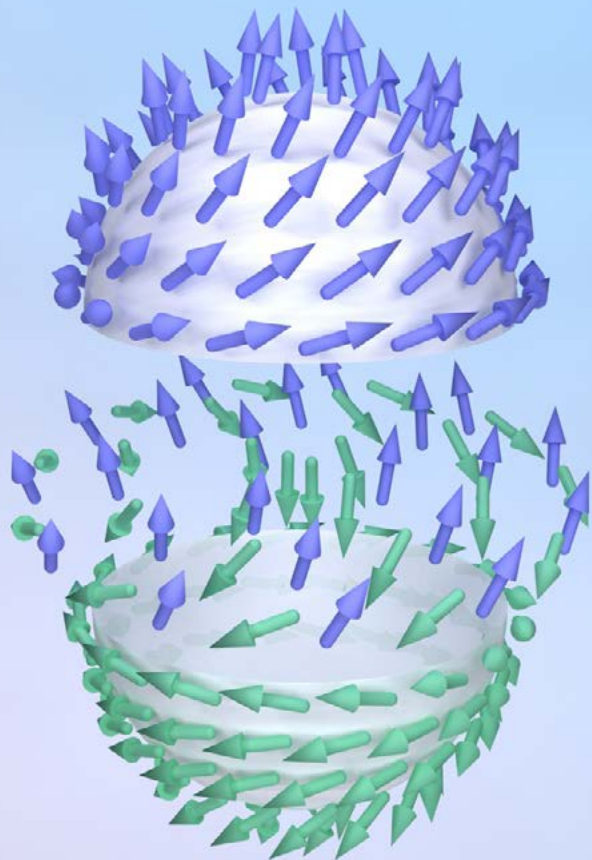
Ces étonnantes nanostructures qui résultent de la frustration portent le nom exotique de «skyrmions». «Dans la communauté scientifique, certaines idées se propagent comme un virus, mais un gentil virus, relève la physicienne. C'est le cas des skyrmions. Dans le monde entier, d'intenses recherches sont en cours dans ce domaine et je me suis laissé gagner par l'enthousiasme pour ces objets et leurs intéressantes propriétés.» Avec leur cristal, Oksana Zaharko et son groupe ont réussi, en 2020, à générer pour la première fois des skyrmions antiferromagnétiques: une étape importante pour de futures applications potentielles de ces nano-tourbillons dans les technologies de l'information.

Les skyrmions sont considérés comme des unités prometteuses pour un nouveau genre de mémoire informatique. Ils sont nettement plus petits que les domaines qui servent de bits dans les mémoires informatiques conventionnelles. Leur utilisation permettrait de comprimer plus étroitement les données, mais aussi de les écrire et de les lire plus rapidement. «Nos skyrmions sont minuscules et satisfont particulièrement bien à ces exigences», explique Oksana Zaharko. Par ailleurs, les nano-tourbillons récemment découverts sont antiferromagnétiques, comme le cristal. Cela signifie que les moments magnétiques voisins présentent l'alignement suivant: l'un pointe vers le haut et le suivant vers le bas – alors que les moments des skyrmions connus étaient jusqu'à présent parallèles. «Les skyrmions antiferromagnétiques sont plus facilement contrôlables, car, lorsqu'on applique du courant, ils sont moins déviés de leur trajectoire rectiligne que des skyrmions ferromagnétiques, détaille la chercheuse. C'est très utile lorsqu'on cherche à fabriquer un produit.»



Oksana Zaharko étudie, au PSI, les systèmes frustrés et les skyrmions. Elle exploite à cet effet les différences de direction magnétique d'aimants élémentaires. Les réalités désignées par ces termes cryptiques pourraient un jour rendre les ordinateurs plus puissants.





Les skyrmions sont des nanostructures: de minuscules tourbillons dans l'alignement magnétique des atomes. Les chercheurs du PSI ont été les premiers à générer ce qu'on appelle des «skyrmions antiferromagnétiques», où des spins décisifs sont alignés dans des directions différentes. L'illustration ci-dessus est une vue d'artiste de cet état.

Tout cela n'est encore qu'une vision utopique. Car, pour faire apparaître les minuscules tourbillons en question, les chercheurs doivent refroidir leur cristal jusqu'au zéro absolu et le placer dans un champ magnétique très puissant. Oksana Zaharko décrit ainsi la station de mesure à la grande installation de recherche SINQ: «Nous avons ce tout petit échantillon de quelques millimètres et, tout autour, un gigantesque appareillage avec des aimants de plusieurs tonnes. Un contraste incroyable!» C'est là que le cristal est bombardé de neutrons qui se dispersent. A partir des données obtenues, des algorithmes calculent comment les choses se présentent dans le matériau. «Cela nous permet de déterminer la présence de skyrmions, explique la chercheuse. Car nous ne pouvons pas les voir directement.»

Images et films en haute résolution

Les chercheurs peuvent visualiser directement les skyrmions à la Source de Lumière Suisse SLS. «Le point fort de notre travail à la SLS réside dans la mi-

croscopie à rayons X, avec des résolutions spatiales pouvant atteindre 20 nanomètres», explique Jörg Raabe, responsable du groupe Microspectroscopie. Outre des images en très haute résolution, son équipe crée des films: «Dans le cadre de certaines expériences, nous travaillons également avec une résolution temporelle de l'ordre de 100 picosecondes, autrement dit de 100 billionièmes de seconde», poursuit le physicien. Cela permet de montrer comment les skyrmions magnétiques sont produits et comment ils se meuvent. Cet aspect intéresse des équipes de Grande-Bretagne, d'Allemagne, de Corée, de Chine, de Russie et des Etats-Unis. Avec leurs expériences au PSI, les chercheurs ont mis en évidence que, dans un matériau composé de plusieurs couches d'iridium-cobalt-platine, les skyrmions étaient stables, même sans champ magnétique extérieur, ce qui est important pour des applications potentielles.

Des chercheurs, au PSI, qui utilisent la source suisse de muons $S\mu S$ étudient, eux aussi, le magnétisme frustré. Les muons sont des particules élémentaires instables qui ressemblent aux électrons, mais qui sont au moins deux cents fois plus lourdes que ces derniers. Si l'on bombarde un matériau de muons, ceux-ci peuvent servir d'autant de sondes locales pour explorer leur environnement magnétique. «Cette méthode est de cent à mille fois plus sensible que d'autres procédés, souligne Hubertus Luetkens, responsable de groupe au Laboratoire de spectroscopie de spin muonique. Au PSI, nous avons d'excellentes possibilités de recherche, avec des installations expérimentales dont certaines sont uniques au monde.» Les chercheurs y ont étudié un cristal fait de cobalt, d'étain et de soufre, qui présente un étrange comportement magnétique. A basses températures, l'alignement des atomes de cobalt est ferromagnétique, alors qu'à des températures plus élevées leur alignement est antiferromagnétique. Les ordres magnétiques rivaux influencent le comportement électronique des matériaux et sont aussi contrôlables par la composition chimique, la pression et un champ magnétique extérieur.

Un tel matériau pourrait se prêter un jour à la fabrication de composants électroniques innovants. Mais la route qui y mène est encore longue. «Du point de vue de la physique, toutes ces études sont très intéressantes, relève Frithjof Nolting. Dans la pratique, en revanche, cela impliquerait un changement complet de technologie et, donc, un travail d'ingénieur gigantesque et des obstacles extrêmement importants. Mais qui sait? Des obstacles, nous en avons déjà franchi beaucoup et, parfois, les choses sont allées plus vite que prévu.» ♦



Des électrolyseurs plus efficaces

Emiliana Fabbri développe en laboratoire des matériaux qui servent à scinder efficacement l'eau en hydrogène et oxygène dans ce qu'on appelle des «électrolyseurs», avec du courant issu du solaire et de l'éolien. Pour que la production d'hydrogène reste attractive d'un point de vue économique, ces matériaux doivent être bon marché. La Source de Lumière Suisse SLS est utile pour les analyser, car elle permet de les observer précisément puis de les optimiser. Emiliana Fabbri espère qu'elle mettra bientôt au point un matériau dont la composition particulière sera susceptible de rendre l'hydrogène encore plus intéressant pour stocker l'énergie à long terme.

Coronavirus: dissiper le flou qui entoure les chiffres

Dans les laboratoires du PSI, les chercheurs produisent des protéines du nouveau coronavirus Sars-CoV-2. Muni de celles-ci, l'Hôpital universitaire de Zurich étudie, dans le cadre d'une étude à long terme, combien de personnes en Suisse ont été véritablement infectées par le virus.

Texte: Brigitte Osterath



Jacopo Marino, biologiste au PSI, en train de vérifier la bonne croissance de ses cultures cellulaires, où sont produites des protéines de coronavirus pour l'Hôpital universitaire de Zurich.

Nous sommes en mars 2020, le mois au cours duquel le monde a changé pour de bon: des experts comprennent que le nouveau coronavirus Sars-CoV-2 est en train de se répandre et qu'il est pandémique. Le Conseil fédéral déclare la situation extraordinaire, conformément à la loi sur les épidémies, ferme les commerces et les services non essentiels, et boucle les frontières du pays.

Peu après, Gebhard Schertler, directeur de la division de recherche Biologie et Chimie au PSI et professeur de biologie structurale à l'ETH Zurich, est sollicité par Adriano Aguzzi. Directeur de l'Institut de neuropathologie à l'Hôpital universitaire de Zurich (USZ), celui-ci planifie une étude de grande envergure: son objectif est d'utiliser une méthode à haut débit pour tester de nombreux individus de l'agglomération zurichoise afin de déterminer si leur sang contient des anticorps que le système immunitaire d'une personne infectée produit pour lutter contre le virus. Avec son projet de recherche, il veut dissiper le flou qui entoure le nombre de contaminations. «Beaucoup d'infections au coronavirus restent asymptomatiques, rappelle Adriano Aguzzi. Les personnes ne remarquent pas qu'elles sont infectées et ne se font donc pas tester. Mais une étude sur les anticorps révèle la véritable dissémination du virus dans la population.»

Pour ses séries de tests, le médecin a besoin de fragments de virus sous une forme pure et, plus précisément, de ses protéines. Car, dans le système immunitaire humain, c'est le contact avec ces protéines virales qui déclenche la formation d'anticorps. Les anticorps sont de grandes biomolécules qui se lient aux protéines d'agents pathogènes comme le Sars-CoV-2 et qui les mettent hors d'état de nuire. Ils peuvent aussi être détectés dans le sang plusieurs mois après le contact avec le virus. Autre aspect pratique: ils s'arriment aussi bien à des protéines virales produites artificiellement qu'à des protéines virales naturelles.

Sans hésiter une seule minute

Mais à cette époque, les protéines du coronavirus ne sont pas disponibles sur le marché en qualité et en quantité suffisantes. Adriano Aguzzi se tourne donc vers son vaste réseau de chercheurs en Suisse et dans le monde, y compris au PSI. «Il n'est guère surprenant que, dans cette situation d'urgence, ce soit Gebhard Schertler qui ait été sollicité, explique Jacopo Marino, postdoc au Laboratoire de recherche biomoléculaire du PSI. Nous travaillons, depuis de nombreuses années, avec des protéines qui représentent un vrai défi.»

Gebhard Schertler n'hésite pas: «Nous coopérons depuis longtemps avec l'USZ, rappelle-t-il. A l'origine, dans le domaine des maladies neurodégénératives pour l'étude de certaines protéines du système nerveux. Il allait de soi que nous mettrions cette expérience à profit pour soutenir l'étude d'Adriano Aguzzi.»

Gebhard Schertler demande à son collaborateur Jacopo Marino de monter une équipe afin de produire des protéines de coronavirus pour son collègue de Zurich.

En dépit du confinement, les chercheurs du PSI se mettent immédiatement au travail. Officiellement, à ce moment-là, personne n'est autorisé à travailler au laboratoire, car le PSI est au troisième niveau – le plus élevé – de restriction opérationnelle. «Mais nous avons obtenu une dérogation pour nos travaux sur le coronavirus», raconte Jacopo Marino. Le PSI soutient aussi financièrement les recherches sur le Covid-19.

Du gène à la protéine

Le matériel génétique du Sars-CoV-2 est composé d'une molécule d'ARN monocaténaire qui contient le plan directeur pour différentes protéines du virus. Lors de tests préliminaires au laboratoire d'Adriano Aguzzi, trois de ces protéines ont provoqué une forte réaction du système immunitaire; autrement dit, après être entré en contact avec elles, le corps humain a produit beaucoup d'anticorps, facilement détectables lors de tests sanguins. Après avoir consulté ses collègues, l'équipe emmenée par Jacopo Marino décide de se consacrer à la production de ce qu'on appelle la «protéine de nucléocapside».

Cette protéine forme une enveloppe protectrice autour du génome du virus. Elle est donc essentielle à son fonctionnement comme à sa réplication. A l'état naturel, elle constitue, avec le matériel génétique du virus, de grands complexes de nombreuses molécules.

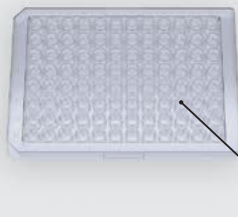
Les chercheurs insèrent le matériel génétique de la protéine de nucléocapside dans l'ADN de cellules de mammifères; c'est aussi ce que fait le virus lors d'une infection. Ensuite, on laisse ces cellules pousser et prospérer dans une solution nutritive contenue dans des ampoules de verre pendant quelques jours. Ce faisant, elles produisent la protéine. L'obstacle suivant: obtenir cette même protéine sous forme pure, à partir de la culture cellulaire. Filip Karol Pamula, doctorant au PSI, finit par développer une méthode pour y arriver.

«A l'instar de beaucoup d'autres groupes de recherche, il nous a littéralement fallu devenir des experts du coronavirus en quelques semaines, raconte Jacopo Marino. Heureusement qu'il existait déjà une grande quantité d'informations scientifiques sur d'autres types de coronavirus.»

4000 tests en vingt-quatre heures

En l'espace de quelques mois, les chercheurs produisent environ 5 milligrammes de protéine de nucléocapside, qu'ils congèlent dans de l'azote liquide et livrent à l'USZ. Dans le même temps, des groupes de recherche à l'ETH Zurich, à l'EPFL, à Oxford en Grande-Bretagne et à Yale aux Etats-Unis mettent les

Test pour la détection d'anticorps contre Sars-CoV-2



- Protéine de coronavirus
- ▲ Anticorps contre Sars-CoV-2
- ▲ Anticorps de détection
- Enzyme couplée

La protéine du virus Sars-CoV-2 est déposée dans les puits d'une plaque microtitre

Ajout de plasma sanguin → Les anticorps se lient à Sars-CoV-2

Ajout d'un autre anticorps qui se lie aux anticorps contre Sars-CoV-2

Détection du second anticorps par une réaction colorée déclenchée par une enzyme

bouchées doubles pour produire les molécules protéiques nécessaires à l'étude.

L'équipe placée sous la houlette d'Adriano Aguzzi mélange des échantillons de sang avec les solutions de ces protéines pour voir s'ils contiennent des anticorps contre le virus. Si les scientifiques en détectent, cela signifie que la personne chez qui l'échantillon a été prélevé a déjà été infectée par le coronavirus. Comme les tests s'effectuent avec de très faibles quantités de liquide, le médecin a besoin de peu de protéines. Par ailleurs, l'ensemble du processus est très rapide: les chercheurs peuvent réaliser 4000 tests en vingt-quatre heures.

Les échantillons de sang proviennent de départements très divers de l'USZ. Ils ont donc été analysés indépendamment d'un diagnostic de Covid-19. Les chercheurs recourent aussi aux dons de sang qui proviennent de personnes censées être en parfaite santé. C'est là que réside la grande différence par rapport aux tests par frottis nasopharyngé, que les gens n'effectuent en principe que s'ils présentent des symptômes ou s'ils ont été en contact avec un individu infecté.

Comme les échantillons de sang ont été collectés indépendamment de l'étude sur les anticorps, il est possible de remonter par la suite à l'origine de l'infection. Les chercheurs analysent même des échantillons qui datent de 2019 afin de s'assurer que leur test ne se révèle pas positif aux anticorps contre d'autres coronavirus, ce qui fausserait leur résultat.

La deuxième vague frappe massivement

Une fois que les protéines de coronavirus issues de laboratoires du monde entier sont arrivées à Zurich, l'équipe de l'USZ démarre les tests d'anticorps proprement dits. Durant le mois de mars 2020, le nombre d'échantillons de sang positifs augmente lentement et atteint son maximum en avril. A ce moment, environ 1,5% de la population de l'agglomération zurichoise a eu un contact avec le virus. Puis ce taux retombe

à 0,7% en juillet. Les anticorps contre le coronavirus peuvent être détectés dans le sang pendant seulement 100 jours environ.

«Que la dissémination du virus dans la population ait été si faible pendant la première vague nous a tous surpris», reconnaît Adriano Aguzzi. Elle était plus élevée dans d'autres régions de Suisse, d'après d'autres études: début mai, dans le canton de Genève, par exemple, des anticorps étaient détectables chez tout juste 10% des habitants. «Le confinement a donc permis d'empêcher la propagation du virus dans toute la Suisse.»

A partir de novembre 2020, la situation change beaucoup: le taux d'échantillons de sang testés positifs dans le canton de Zurich atteint 6% à la mi-décembre. «La deuxième vague a frappé massivement», conclut Adriano Aguzzi. Dans le canton de Genève, ce taux atteint 21% et est donc de nouveau plus élevé. De manière générale, l'étude montre que «la dissémination véritable du coronavirus dans la population est au moins trois fois plus élevée que ce que les tests officiels par frottis laissent supposer», estime Adriano Aguzzi.

Entre-temps, l'équipe dirigée par Adriano Aguzzi a testé plus de 80 000 échantillons de sang pour détecter des anticorps contre le coronavirus. L'étude va se poursuivre encore deux ans au moins. Et la promesse tient toujours: quand le médecin aura besoin d'une nouvelle protéine de nucléocapside pour ses travaux, le PSI répondra présent. ◆

«Il nous a littéralement fallu devenir des experts du coronavirus en quelques semaines.»

Jacopo Marino, biologiste au Laboratoire de recherche biomoléculaire du PSI

Actualité de la recherche au PSI

1 Particules fines nocives pour la santé

Avec des collègues de plusieurs institutions européennes, les chercheurs du PSI ont étudié si les particules fines issues de certaines sources pouvaient être particulièrement nocives pour la santé. Ce qu'ils ont découvert indique que ce n'est pas la quantité de poussières fines, à elle seule, qui représente le plus grand risque pour la santé. Il se pourrait que ce soit surtout ce qu'on appelle leur «potentiel oxydatif» qui rende les particules fines si nocives. Le potentiel oxydatif des particules fines est leur capacité à dégrader les antioxydants, ce qui peut endommager les cellules et les tissus de l'organisme. Le potentiel oxydatif des particules fines est déterminé par les aérosols organiques secondaires d'origine anthropique, qui proviennent surtout des chauffages au bois, et par les émissions de métal issues de l'abrasion des freins dans la circulation routière. D'après ces résultats de recherche, les poussières fines en zone urbaine ont un potentiel oxydatif plus élevé – et sont donc plus nocives pour la santé – que les particules fines en zone rurale.

Informations supplémentaires:
<http://psi.ch/fr/node/42438>

Les particules fines figurent parmi les **5** principaux facteurs de risque pour la santé à l'échelle mondiale.

Les particules de moins de **10** micromètres sont considérées comme des particules fines.

Passant de **25,8** tonnes en 1990 à 14,2 tonnes en 2019, les émissions de particules fines ont diminué en Suisse.

2 Le noyau d'hélium précisément mesuré

Dans le cadre d'expériences conduites au PSI, une collaboration internationale de recherche a mesuré le rayon du noyau atomique d'hélium de manière cinq fois plus précise que tous les chercheurs auparavant. Selon ces travaux, ce qu'on appelle «rayon moyen de charge du noyau d'hélium» mesure 1,67824 femtomètre (il faut 1 million de milliards de femtomètres pour faire 1 mètre). Ce nouveau résultat permettra de tester certaines théories fondamentales en physique et de déterminer des constantes naturelles de manière encore plus exacte. En physique fondamentale, connaître les propriétés du noyau d'hélium se révèle également décisif, si l'on veut comprendre les processus qui se jouent dans d'autres noyaux atomiques, plus lourds que celui de l'hélium. Pour leurs mesures, les chercheurs avaient besoin de muons: ces particules ressemblent aux électrons, mais sont environ deux cents fois plus lourdes. Le PSI est le seul site de recherche au monde qui fournisse suffisamment de muons dits «de basse énergie» pour de telles expériences.

Informations supplémentaires:
<http://psi.ch/fr/node/43551>

3 De meilleurs qubits

Les ordinateurs quantiques promettent une énorme accélération de la puissance de calcul pour certaines applications. Le chemin qui y mène passe nécessairement par ce qu'on appelle les «bits quantiques» ou qubits: contrairement aux bits classiques, qui peuvent stocker uniquement les valeurs 0 et 1, les qubits sont des bits de mémoire qui peuvent stocker n'importe quelle combinaison de ces états.

Des chercheurs au PSI viennent de présenter un plan qui détaille comment créer des qubits plus rapides et plus précis. Leur idée centrale est d'introduire de manière ciblée des atomes magnétiques de la classe des terres rares dans le réseau cristallin d'un matériau. Chacun de ces atomes représente alors un qubit. Les chercheurs ont montré comment ces qubits pourraient être activés au moyen d'impulsions laser, être croisés les uns avec les autres, être utilisés comme bits de mémoire et être lus.

Informations supplémentaires:
<http://psi.ch/fr/node/43488>

4 Salle blindée contre le magnétisme

Une salle blindée contre le magnétisme est actuellement en construction au PSI. Il s'agit de la plus grande et de la plus performante du genre au monde. Lors d'une prochaine étape, des chercheurs y installeront une expérience dont le but est de mettre en évidence le moment dipolaire électrique du neutron, une grandeur physique qui n'a pas encore été découverte à ce jour. À l'extérieur, le neutron est une particule électriquement neutre, mais, à l'intérieur, il se pourrait qu'il y ait une séparation des charges positives et négatives. Or, une charge positive séparée d'une charge négative (de même valeur absolue mais de signe opposé) constitue un moment dipolaire électrique. Ce dipôle s'aligne sur la direction du champ électrique où il est placé, de la même manière que l'aiguille d'une boussole s'aligne dans un champ magnétique en indiquant l'axe nord-sud. Le but de l'expérience est d'établir si le neutron interagit avec le champ électrique, autrement dit s'il existe ou non un tel moment dipolaire électrique. D'après la théorie actuelle de la physique des particules élémentaires, le neutron ne devrait pas présenter de moment dipolaire électrique mesurable. Mais ce modèle – appelé «modèle standard de la physique des particules» – est incapable d'expliquer certaines observations majeures. Réussir à mesurer un moment dipolaire électrique pourrait permettre l'émergence de nouvelles connaissances sur le commencement de l'univers.

Informations supplémentaires:
<http://psi.ch/fr/node/43373>



GALERIE

Le PSI de nuit

Quand le soleil disparaît derrière l'horizon et que l'obscurité envahit le PSI, de nouvelles perspectives s'offrent sur ce qui semble familier pendant la journée. La lumière artificielle des lampadaires, des véhicules et des intérieurs plonge le terrain et les bâtiments dans une splendeur particulière. Suivez-nous le temps d'une exploration nocturne.

Texte: Christian Heid

Sur le site du PSI, les détecteurs de luminosité enregistrent l'approche du crépuscule et, partout, l'éclairage s'allume. Vu du ciel, le plus grand institut de recherche de Suisse – qui compte quelque 2000 collaborateurs – s'apparente à une petite localité.

Les conteneurs de la plate-forme ESI (*Energy System Integration*) reflètent le concept modulaire de l'installation. La plate-forme ESI permet aux chercheurs du PSI d'examiner comment l'approvisionnement énergétique du futur pourrait fonctionner de manière fiable et garantir que nous ne nous retrouvions pas dans le noir, au sens littéral du terme.





Seules l'entrée et quelques salles situées à l'avant sont éclairées: les 740 mètres restants du laser à rayons X à électrons libres SwissFEL sont enfouis sous un talus, au milieu de la forêt de Würenlingen, sous le ciel étoilé. Les chercheurs qui travaillent à l'intérieur observent des processus ultrarapides à l'aide d'impulsions lumineuses, comme il y en a dans seulement quatre autres grandes installations de recherche au monde.



47° 32' 15" Nord, 8° 13' 30" E: Le pont sur l'Aar constitue d'une certaine manière le centre géographique du PSI. Il relie, comme une attache, les sites du PSI-Est et du PSI-Ouest. La nuit, il constitue un lien indispensable entre les deux parties de l'institut qui se font face d'un côté et de l'autre du fleuve.

La Source de Lumière Suisse SLS, avec ses nombreux postes de mesure, est en service 24 heures sur 24. Vu d'en haut, au crépuscule, le bâtiment circulaire en forme d'OVNI est plutôt discret, comme le montre la photo aérienne de la page 28 (où il apparaît en haut à gauche). L'entrée éclairée, en revanche, donne une impression plus juste de la taille de l'installation.



«Il faut respecter les promesses qu'on se fait à soi-même»

Vaida Auzelyte a fondé la start-up Morphotonix à Lausanne, sur le campus de l'EPFL. Son idée: utiliser des hologrammes pour protéger les produits en plastique des contrefaçons. La physicienne lituanienne profite encore des années qu'elle a passées au PSI.

Texte: Daniel Saraga

«Je ne l'ai jamais regretté, dit Vaida Auzelyte. Fonder une start-up n'a pas été du tout une décision difficile.» Après deux postes dans la recherche, elle a su que quelque chose lui manquait professionnellement. «Je me suis lancée dans cette nouvelle vie sans arrière-pensée.» Elle quitte l'EPFL en 2013 et devient la cofondatrice de la start-up Morphotonix – un mot-valise construit sur «morpho-», la forme, et «photonique», qui décrit les technologies fondées sur la lumière.

La physicienne de 43 ans est spécialiste de nanolithographie, c'est-à-dire l'art de graver de minuscules dessins dans des matériaux. Répétées de manière régulière, ces gravures peuvent réfléchir la lumière pour créer des hologrammes similaires à ceux d'une carte d'identité ou d'un billet de banque.

Vaida Auzelyte a grandi dans une petite ville de Lituanie, située au bord de la mer Baltique. Elle passe ses étés à la plage et se décide pour la physique, qu'elle étudie à l'Université de Vilnius. Un séjour Erasmus à Amsterdam et un doctorat à Lund, en Suède, la plongent dans la physique nucléaire, ce qui la mènera à développer de nouvelles techniques de lithographie – et notamment à l'Institut Paul Scherrer.

Elle fait son premier postdoc au PSI, entre 2006 et 2009, en travaillant en particulier sur une installation de lithographie par ultraviolets extrêmes. «J'étais responsable des tests de performance des matériaux au rayonnement ultraviolet extrême pour les industriels.» Elle a toujours été curieuse d'en apprendre davantage

sur l'industrie. «Il faut comprendre les différences entre la science, d'un côté, et l'économie privée, de l'autre, pour pouvoir coopérer.»

De la salle blanche à la nature

Elle dit garder de très bons souvenirs du PSI, avec «des collègues fantastiques et très ouverts, une équipe soudée, une bonne éthique de travail et une excellente organisation». Depuis l'Argovie, elle découvre les Alpes suisses qu'elle rejoint aussi souvent que possible pour faire des randonnées, du ski et, plus récemment, du canyoning, un sport «très technique» qui fait explorer les rivières, gorges et cascades en mélangeant grimpe, rappel et plongeon dans l'eau glacée. «On peut explorer des coins de nature normalement inaccessibles. C'est plus que beau, c'est magnifique!»

Elle rejoint l'EPFL en 2010, pour un second postdoc, et s'installe avec son conjoint à Orbe, une petite ville sise entre Lausanne et Yverdon. «Un grand jardin, c'était important pour nous. Je veux retrouver un peu de nature, après avoir passé la journée dans une salle blanche pour la nanofabrication, en étant équipée d'une blouse stérile et de lunettes de protection.» Pour elle, cultiver des plantes, ce n'est pas seulement cueillir les fruits et légumes du jardin, mais aussi surveiller comment ils poussent. Vaida Auzelyte aime observer et analyser les processus naturels. «Je le fais tout le temps, durant tous mes hobbies. Je profite de mes





**«Je fais moi-même mon pain,
très compact, comme en Lituanie.»**

Vaida Auzelyte, directrice technique de Morphotonix

randonnées pour récolter des plantes médicinales. Je cuis mon propre pain lituanien, très compact. Je fabrique du fromage et je m'essaie avec succès à la fermentation du vinaigre et de la choucroute.»

Cette capacité d'observation se révèle également utile pour sa start-up, où il s'agit d'être «attentif et réactif», dit-elle. Ses compétences, acquises entre autres au PSI, l'ont aidée à développer le concept de Morphotonix: créer des hologrammes de haute sécurité lors de la production complexe de plastique dur.

Du chocolat à la sécurité high-tech

Vaida Auzelyte et sa collègue, Veronica Savu, cherchent d'abord le succès au sein d'une branche inattendue: le chocolat. Leur idée est de transférer des hologrammes à la surface de pralinés afin de leur prodiguer de la couleur – une décoration chatoyante sans additif chimique. Elles développent des prototypes en collaboration avec des fabricants de moules de chocolat. Ceux-ci font les gros titres de nombreux journaux autour de la planète, mais ne se transforment que très lentement en produit commercial. «Peut-être que l'idée d'hologrammes sur un aliment était trop radicale», dit-elle. Mais, en tout cas, elle a jugé passionnant de travailler avec les départements de R&D des producteurs de chocolat. «Et c'était un plaisir de goûter leurs produits!»

Toutefois, les deux entrepreneuses sont fondamentalement convaincues du potentiel de leur technologie. Elles analysent le marché et trouvent leur niche: le domaine de la sécurité. Des hologrammes sont utilisés pour authentifier les produits commerciaux et les protéger des contrefaçons. Certains faussaires sont capables de copier les hologrammes collés sur un objet ou un emballage, explique Vaida Auzelyte. «Notre technologie va plus loin: elle permet de transférer les hologrammes directement dans le plastique du produit. C'est impossible à copier.»

Morphotonix grave des nanostructures dans des moules en métal, utilisés pour produire en masse des hologrammes dans le plastique dur. Ceux-ci réfléchissent la lumière et font scintiller le matériau (voir image ci-contre).

Mais, contrairement au chocolat, ce n'est pas l'esthétique qui importe, souligne Vaida Auzelyte: «La sécurité que nous pouvons assurer avec notre technologie est du niveau de la protection d'un passeport.» Ses clients comptent des producteurs d'aliments, d'équipements médicaux et de pièces détachées pour l'automobile.

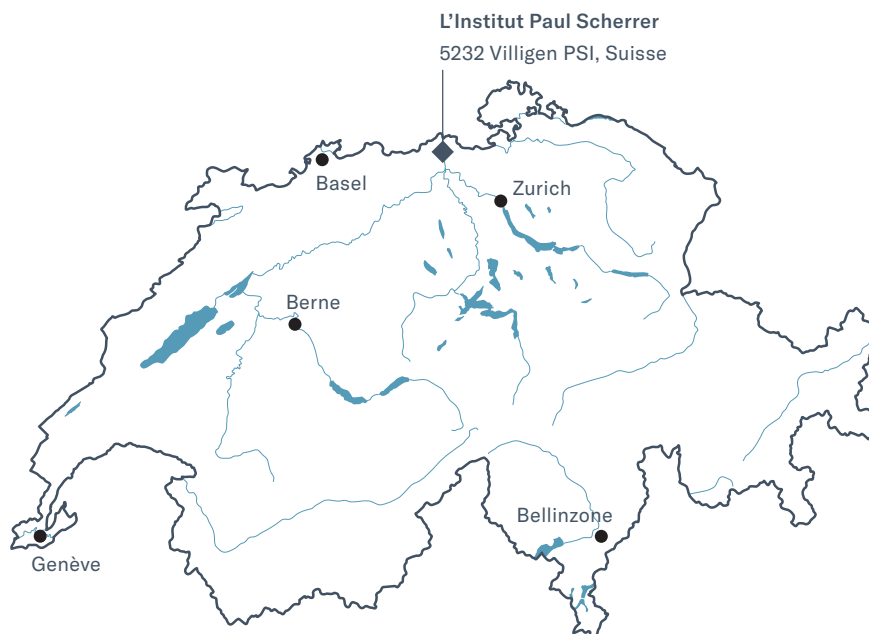
La start-up a pu se passer d'investisseurs externes et garder son indépendance. «C'est plutôt rare pour une jeune entreprise de technologie, mais oui: nos ventes sont là et financent notre croissance», sourit Vaida Auzelyte. Elle s'occupe des processus et des opérations de fabrication, alors que sa collègue, Veronica Savu, CEO de l'entreprise, développe les affaires et la communication. «Cette configuration nous va bien.» Vaida Auzelyte aime le concret: faire avancer les choses et résoudre les problèmes. «Nous sommes très complémentaires et nous communiquons très bien. C'est essentiel et primordial dans une start-up!»

Si les premières années de la start-up ne lui ont laissé que peu de temps pour ses activités, elle n'a jamais abandonné la pratique de l'aïkido, qu'elle enseigne chaque semaine à Renens, près de Lausanne: «Il y a le travail et il y a le reste. Je m'étais promis une chose, lorsque j'ai lancé Morphotonix: ne pas sacrifier l'aïkido.» Elle a tenu. «Il faut respecter les promesses qu'on se fait à soi-même. Sinon, comment respecter celles qu'on fait aux autres?» ♦

QUI SOMMES-NOUS?

Depuis chez nous, en Argovie,
nous faisons de la recherche pour la Suisse
en coopération mondiale.





L'Institut Paul Scherrer
5232 Villigen PSI, Suisse

5

grandes installations de recherche
uniques en Suisse

800

articles scientifiques publiés chaque
année dans des revues spécialisées
qui reposent sur des expériences
menées aux grandes installations de
recherche

5000

visites annuelles de scientifiques
venus du monde entier pour
mener des expériences à ces grandes
installations de recherche

5232 est l'adresse où l'on fait de la recherche en Suisse à de grandes installations de recherche. Car l'Institut Paul Scherrer PSI a son propre code postal. Une particularité justifiée, d'après nous, pour un institut qui s'étire sur 342 000 mètres carrés, qui possède son propre pont sur l'Aar et qui compte 2100 collaborateurs, autrement dit plus d'employés que certains villages des environs n'ont d'habitants.

Le PSI est sis dans le canton d'Argovie, sur les deux rives de l'Aar, entre les communes de Villigen et de Würenligen. C'est un institut de recherche fédéral pour les sciences naturelles et les sciences de l'ingénieur, qui fait partie du domaine des Ecoles polytechniques fédérales (EPF), les autres membres étant l'ETH Zurich, l'EPF Lausanne, l'Eawag, l'Empa et le WSL. Avec notre recherche fondamentale et notre recherche appliquée, nous œuvrons à l'élaboration de solutions durables pour répondre à des questions majeures, tant sociétales que scientifiques et économiques.

De grandes installations de recherche complexes

Nous avons reçu de la Confédération suisse le mandat de développer, de construire et d'exploiter de grandes installations de recherche complexes. Ces dernières sont uniques en Suisse et certains équipements sont même uniques au monde, car ils n'existent qu'au PSI.

De nombreux chercheurs, actifs dans les disciplines les plus diverses, ont la possibilité de faire des découvertes essentielles pour leur travail en menant des expériences à nos grandes installations de recherche. En même temps, la construction et l'exploitation d'installations pareilles sont si complexes et coûteuses qu'au niveau de leur propre infrastructure les groupes de recherche dans les hautes écoles et dans l'industrie ne peuvent pas disposer de ce genre d'instruments de mesure. C'est pourquoi nos installations sont ouvertes à tous les chercheurs.

S'ils veulent obtenir du temps de mesure pour leurs expériences, les chercheurs de Suisse et de l'étranger doivent toutefois faire acte de candidature auprès du PSI. Le comité de sélection, composé d'experts, évalue ces demandes en fonction de leur qualité scientifique et recommande au PSI les scientifiques auxquels il faut véritablement l'allouer. En effet, même si le PSI dispose d'une quarantaine de postes de mesure auxquels des expériences peuvent être menées simultanément, il n'y a pas assez de temps disponible pour toutes les candidatures. Entre un tiers et la moitié des demandes doivent être refusées.

Chaque année, quelque 1900 expériences sont conduites aux grandes installations de recherche au PSI. Le temps de mesure au PSI est gratuit pour tous les chercheurs académiques. Les utilisateurs

de l'industrie ont la possibilité d'acheter du temps de mesure pour leur propre recherche dans le cadre d'une procédure spécifique et d'utiliser les installations de recherche pour leur recherche appliquée. Le PSI offre à cet effet des prestations spéciales de recherche et de développement.

Au total, le PSI entretient cinq grandes installations de recherche qui permettent de se plonger dans des matériaux, des biomolécules et des appareils techniques afin de sonder les processus qui se jouent à l'intérieur. Lors de leurs expériences, les chercheurs «radiographient» les échantillons qu'ils veulent analyser au moyen de différents rayonnements. Ils ont à disposition des faisceaux de particules – neutrons et muons – ou de lumière intense de type rayons X – lumière synchrotron ou laser à rayons X. Ces divers types de rayonnements permettent d'étudier au PSI une grande variété de propriétés des matériaux. La complexité et les coûts de ces installations sont dus notamment au fait que, pour produire ces différents rayonnements, il faut de grands accélérateurs.

Nos trois principaux domaines de recherche

Mais le PSI n'est pas seulement prestataire de services pour d'autres chercheurs; il a son propre programme de recherche et ce dernier est ambitieux. Les découvertes faites par les chercheurs au PSI permettent de mieux comprendre le monde qui nous entoure et établissent les fondements nécessaires au développement d'appareils et de traitements médicaux innovants.

En même temps, la recherche en interne est une condition importante pour assurer le succès du programme utilisateurs aux grandes installations. Car seuls des chercheurs impliqués dans les derniers développements scientifiques sont en mesure d'épauler les utilisateurs externes dans leur travail et de continuer à développer les installations pour qu'à l'avenir elles correspondent aux besoins de la recherche.

Notre propre recherche se concentre sur trois domaines. Dans celui de la matière et des matériaux, nous étudions la structure interne de différentes substances. Les résultats aident à mieux comprendre les processus qui se jouent dans la nature et fournissent les bases de nou-

veaux matériaux destinés à des applications techniques et médicales.

Dans le domaine de l'énergie et de l'environnement, l'objectif des travaux menés est de développer de nouvelles technologies pour un approvisionnement énergétique durable, sûr et respectueux de l'environnement.

Dans le domaine de la santé humaine, les chercheurs s'efforcent d'identifier les causes de certaines maladies et les méthodes thérapeutiques possibles. Dans le cadre de la recherche fondamentale, ils étudient les processus généraux qui se jouent au sein des organismes vivants. Par ailleurs, nous exploitons la seule installation de Suisse permettant de traiter certaines maladies cancéreuses spécifiques avec des protons. Cette méthode particulièrement peu agressive permet de détruire les tumeurs de manière ciblée, tout en préservant la quasi-totalité des tissus sains environnants.

Les cerveaux derrière les machines

Le travail aux grandes installations de recherche du PSI est exigeant. Nos chercheurs, ingénieurs et professionnels sont des experts hautement spécialisés. Pour nous, il est important de préserver ces connaissances. Nous attendons donc de nos collaborateurs qu'ils transmettent leur savoir à des jeunes qui s'en serviront dans le cadre de différentes positions professionnelles, pas seulement au PSI. C'est pourquoi près d'un quart de nos collaborateurs sont des apprentis, des doctorants et des postdocs.

IMPRESSUM

5232 – Le magazine de l'Institut Paul Scherrer

Paraît trois fois par an.
Numéro 2/2021 (mai 2021)
ISSN 2571-6891

Editeur

Institut Paul Scherrer
Forschungsstrasse 111
5232 Villigen PSI, Suisse
Téléphone: +41 56 310 21 11
www.psi.ch

Rédaction

Monika Blétry, Monika Gimmel,
Christian Heid, Dr Laura Hennemann,
Sebastian Jutzi (resp.),
Dr Brigitte Osterath,
Dr Mirjam van Daalen

Traduction

Catherine Riva

Correction

Étienne Diemert

Design et direction artistique

Studio HübnerBraun

Photos

Scanderbeg Sauer Photography, sauf:
Pages 2,12: Institut Paul Scherrer/
Mahir Dzambegovic;
Pages 26–27: Shutterstock;
Pages 35–37: Désirée Good;
Page 38: Institut Paul Scherrer/
Markus Fischer.

Infographies

Studio HübnerBraun, sauf:
Pages 6–7: Daniela Leitner;
Pages 20, 25, 41: Institut Paul Scherrer/
Mahir Dzambegovic.

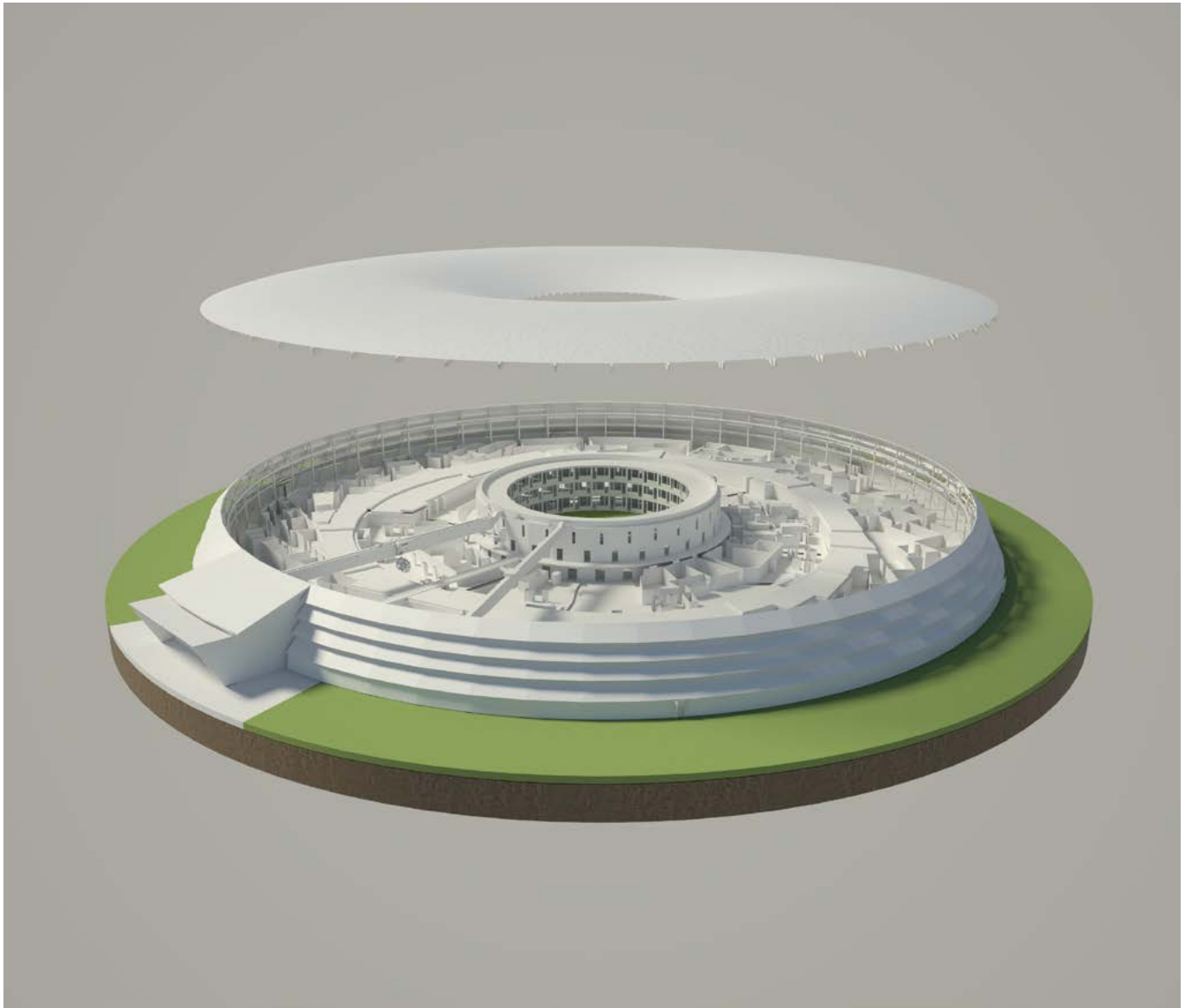
Pour en savoir plus du PSI

www.psi.ch/fr/

5232 est disponible sur Internet et peut être abonné gratuitement
www.psi.ch/fr/5232

5232 est également disponible en allemand
www.psi.ch/de/5232





Ce qui vous attend au prochain numéro

De grandes installations pour explorer l'infiniment petit: cette description pourrait résumer l'essence du PSI. Mais là-dedans se cache un mécanisme complexe de haute technologie ultramoderne. L'ensemble unique au monde que forment la SLS, le SwissFEL, la SINQ, la S μ S et CHRISP permet de scruter la matière en profondeur. Les chercheurs s'en servent pour trouver des réponses aux dernières énigmes de l'univers; pour mettre la main, dans le domaine médical, sur de nouveaux principes actifs et de nouveaux traitements; pour développer des matériaux dotés de propriétés exceptionnelles ou encore pour filmer des processus moléculaires. Avec des illustrations 3D sophistiquées, nous vous emmènerons visiter les installations du PSI. Et nous vous montrerons comment celles-ci accélèrent à l'extrême les électrons et les protons, et se muent ainsi en gigantesques microscopes.



Paul Scherrer Institut
Forschungsstrasse 111, 5232 Villigen PSI, Suisse
www.psi.ch | +41 56 310 21 11