

DOSSIER

# DONNÉES DANS DE NOUVELLES DIMENSIONS

Le magazine de l'Institut Paul Scherrer

02 / 2022

# 2022



## DOSSIER: DONNÉES DANS DE NOUVELLES DIMENSIONS



TOILE DE FOND

### Plus vite et intelligemment

Quand de grandes installations de recherche comme le laser à rayons X à électrons libres suisse SwissFEL ou la Source de Lumière Suisse SLS tournent à plein régime, elles produisent d'énormes quantités de données. Les recueillir, les traiter et les évaluer est une tâche immense.

Page 10

1

TOILE DE FOND

### Une solution à l'insoluble

Le PSI et l'ETH Zurich ont créé le Quantum Computing Hub. Des chercheurs de pointe y collaborent au développement d'ordinateurs quantiques censés dépasser largement les ordinateurs classiques pour certaines opérations de calcul.

Page 18

3





2

INFOGRAPHIE

## Pas à pas – ou tout en même temps

L'ordinateur quantique révolutionne la technologie informatique. Parce que ses qubits sont en interrelation et possèdent plusieurs états différents en même temps, il peut effectuer des calculs qu'un ordinateur classique ne peut résoudre.

Page 16

CONTENU

### QUESTIONS-RÉPONSES

Trois questions à Christian Rüegg 4

### QUOTIDIEN

Clé et serrure 6

### RECHERCHE

Détecter et s'arrimer 7



DOSSIER:

DONNÉES DANS DE NOUVELLES DIMENSIONS

8



TOILE DE FOND

Plus vite et intelligemment

10



INFOGRAPHIE

Pas à pas – ou tout en même temps

16



TOILE DE FOND

Une solution à l'insoluble

18

### EN IMAGE

Schéma de connexion du cerveau 21

### EN SUISSE

Radiographier un Hercule et des accumulateurs 22

Il est nécessaire d'avoir recours aux méthodes non destructives pour analyser les objets antiques comme les technologies modernes. A cette fin, les chercheurs du PSI emploient des particules élémentaires, appelées «muons».

### EN BREF

Actualité de la recherche au PSI 26

- 1 Un nouveau test de dépistage rapide du Covid-19
- 2 Une simulation facilite les travaux de déblaiement à Fukushima
- 3 Mieux connaître le sens de la vue
- 4 Fumiers et lisiers comme sources d'énergie

### GALERIE

L'art au PSI 28

Nous vous montrons ici une sélection d'œuvres d'art situées au PSI.

### PORTRAIT

Saisir les opportunités 34

Alors qu'il était doctorant au PSI, Philipp Kraft a construit un nouveau détecteur de rayons X. Aujourd'hui, il participe à la modernisation du centre de test d'un institut financier.

### QUI SOMMES-NOUS?

38

### IMPRESSUM

40

### DANS LE PROCHAIN NUMÉRO

41

## Trois questions à Christian Rüegg

La guerre en Ukraine plonge de nombreuses personnes dans la détresse et nous oblige à réfléchir à nos valeurs fondamentales. Christian Rüegg, directeur du PSI, explique comment l'institut leur tend la main et de quelle manière la science est mise à l'épreuve.

**Christian Rüegg, la guerre en Ukraine impose de grandes souffrances aux gens. Quel soutien le PSI peut-il leur apporter en tant qu'institut de recherche?**

Nous apportons notre soutien aux chercheurs ukrainiens concernés. Nous sommes membres du réseau international Scholars at Risk et nous participons aux offres d'aide du Fonds national suisse. Par ailleurs, nous avons décidé de prolonger, au moins jusqu'à la fin de l'année, les contrats des collaborateurs ukrainiens qui arrivent à échéance. Pour nous, les échanges directs et personnels sont aussi importants. Nous parlons à nos collaborateurs et collaboratrices ukrainiens et nous tentons de trouver des solutions individuelles à leurs soucis et à leurs difficultés.

**Comment une telle situation met-elle la science et son idée propre à l'épreuve?**

Nous devons davantage faire entendre nos valeurs à l'extérieur. La science vit d'échanges ouverts et internationaux. Les frontières nationales, idéologiques ou politiques n'y ont pas leur place. A l'Institut Paul Scherrer, des collaborateurs et collaboratrices de plus de 60 pays – dont l'Ukraine et la Russie – travaillent sereinement à un objectif commun: faire avancer la science et la recherche pour le bien de tous. La science bâtit des ponts, elle ne les détruit pas. Nous devons protéger ce bien précieux.

**Quelle évolution en attendez-vous dans le futur?**

Il est à craindre que cette guerre ne nous mène vers une nouvelle réalité, où des systèmes politiques vont s'opposer de façon irréconciliable et où les fronts entre différentes visions du monde vont encore se durcir. Nous devons apprendre à appréhender ce champ de tension. En ces temps difficiles, il est particulièrement important d'être respectueux les uns des autres, de chercher le dialogue et de n'exclure personne. Il faut aussi se soutenir réciproquement, sans rendre quiconque responsable d'une situation qu'il n'a pas provoquée.

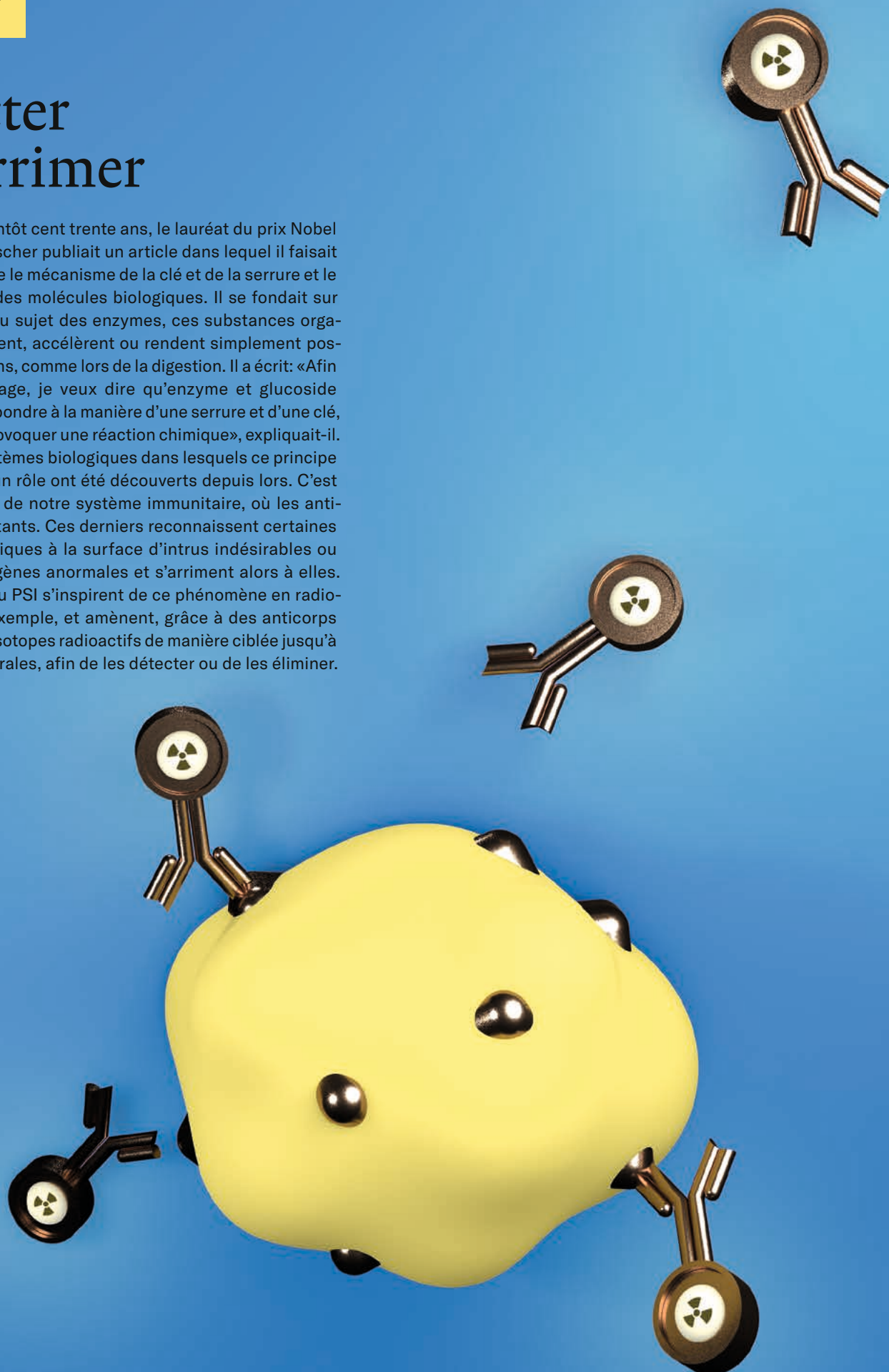


## Clé et serrure

L'être humain n'aime pas seulement disposer de toutes choses mais contrôler la manière d'y avoir accès. C'est pourquoi des esprits ingénieux ont inventé, il y a environ trois mille cinq cents ans, un dispositif grâce auquel c'est possible: les serrures et leurs clés. Les premières versions de ces mécanismes de contrôle n'étaient guère plus qu'une sorte de crochet que l'on faisait passer à travers une petite ouverture dans la porte. Cette clé était conçue de façon que l'on puisse accéder à un verrou que l'on pouvait ensuite tirer. Avec le temps et de nombreux nouveaux inventeurs, ce système s'est affiné pour laisser les autres là où on le souhaite: bloqués à l'extérieur ou enfermés à l'intérieur. L'ingéniosité humaine s'est notamment concentrée sur la création de serrures de plus en plus sophistiquées, avec des clés complexes et difficiles à reproduire. Le principe selon lequel une clé doit être compatible, dans sa forme, avec une serrure très spécifique s'est élargi pour passer de la mécanique au monde virtuel, dans lequel on travaille aussi avec des clés, non pour protéger de l'or ou des bijoux, mais pour sauvegarder des informations précieuses.

# Détecter et s'arrimer

En 1894, il y a bientôt cent trente ans, le lauréat du prix Nobel de chimie Emil Fischer publiait un article dans lequel il faisait une analogie entre le mécanisme de la clé et de la serrure et le fonctionnement des molécules biologiques. Il se fondait sur des recherches au sujet des enzymes, ces substances organiques qui induisent, accélèrent ou rendent simplement possibles des réactions, comme lors de la digestion. Il a écrit: «Afin d'utiliser une image, je veux dire qu'enzyme et glucoside doivent se correspondre à la manière d'une serrure et d'une clé, afin de pouvoir provoquer une réaction chimique», expliquait-il. De nombreux systèmes biologiques dans lesquels ce principe clé-serrure joue un rôle ont été découverts depuis lors. C'est également le cas de notre système immunitaire, où les anticorps sont importants. Ces derniers reconnaissent certaines structures spécifiques à la surface d'intrus indésirables ou de cellules endogènes anormales et s'arriment alors à elles. Les chercheurs du PSI s'inspirent de ce phénomène en radiopharmacie, par exemple, et amènent, grâce à des anticorps particuliers, des isotopes radioactifs de manière ciblée jusqu'à des cellules tumorales, afin de les détecter ou de les éliminer.



# Données dans de nouvelles dimensions

DOSSIER

Au PSI, les chercheurs travaillent bien connectés entre eux, mais aussi avec d'autres institutions de Suisse et du monde entier. Afin que cela fonctionne toujours ainsi ou que cela s'améliore encore, la nouvelle division de recherche Calcul scientifique, théorie et données a été créée au PSI, ainsi qu'un Quantum Computing Hub avec l'ETH Zurich. Cela ouvre de nouvelles perspectives pour travailler avec les données.

Texte: Bernd Müller

TOILE DE FOND

Plus vite et intelligemment

Page 10

1





2

INFOGRAPHIE

Pas à pas – ou tout en même temps

Page 16

3

TOILE DE FOND

Une solution à l'insoluble

Page 18

# Plus vite et intelligemment

Quand de grandes installations de recherche, comme le laser à rayons X à électrons libres suisse SwissFEL ou la Source de Lumière Suisse SLS, tournent à plein régime, elles produisent d'énormes quantités de données. Afin de les interpréter et de les utiliser, par exemple au profit de nouveaux médicaments ou matériaux, le PSI a regroupé son expertise au sein de la nouvelle division de recherche Calcul scientifique, théorie et données.

Texte: Bernd Müller



Au PSI, Alun Ashton veille à ce que les chercheurs puissent utiliser une excellente infrastructure informatique.

La carrière de chercheur d'Alun Ashton a débuté dans les années 1990, une sorte d'âge de pierre, du moins en ce qui concerne l'utilisation des ordinateurs. «Etudiant, j'enregistrais les données de mes mesures sur des disquettes», se souvient le biochimiste et informaticien. Pour tous ceux qui ne le savent pas, les disquettes étaient des supports de stockage magnétiques amovibles qui, dans leur version la plus moderne, possédaient une capacité de 1,4 mégaoctet. «Si je devais enregistrer sur de tels supports les données générées lors d'une seule expérience à la Source de Lumière Suisse SLS, je devrais en employer des millions et disposer de plusieurs vies pour m'en servir.»

La technologie de l'information s'est heureusement développée si vite qu'Alun Ashton peut utiliser son temps à des choses plus sensées. Même les grandes quantités de données issues des expériences du PSI sont traitées et stockées de façon suffisamment rapide. Du moins jusqu'ici. Les chercheurs du PSI auront un problème en 2025 au plus tard, après l'upgrade de la SLS et l'entrée en fonction de la SLS 2.0. Les expériences pourront alors avoir une performance jusqu'à mille fois supérieure à celle de la SLS actuelle ainsi que d'autres configurations et livrer ainsi beaucoup plus de données. S'y ajouteront des détecteurs de meilleure qualité, et plus rapides et dotés d'une résolution plus élevée. Là où la ligne de faisceau de la SLS actuelle produit un jeu de données par minute, la SLS 2.0 fournira la même quantité de données en moins d'une seconde. Le tout nouveau détecteur Jungfrau, au SwissFEL, peut même produire à pleine vitesse 50 gigaoctets par seconde, alors qu'un disque dur d'ordinateur classique serait déjà rempli en quelques secondes. Dans leur ensemble, les expériences au PSI génèrent actuellement 3,6 pétaoctets par an. Quand la SLS 2.0 sera en fonction, les expériences qui y seront menées produiront à elles seules jusqu'à 30 pétaoctets par an, pour lesquels quelque 50 000 disques durs seraient nécessaires. Avec des disquettes, on pourrait facilement ajouter six zéros à ce chiffre.

### Chercher des idées fraîches

Une chose est claire: au PSI, ces nouveaux défis ne seront pas relevés avec de vieux concepts. Il faut des idées fraîches sur la façon de maîtriser les gigantesques quantités de données dues aux interrogations de la recherche, de plus en plus exigeantes et nombreuses. Et il faut un axe de recherche propre avec une structure organisationnelle adaptée. La nouvelle division Calcul scientifique, théorie et données (SCD), créée en juillet 2021, répond à cet

impératif. La SCD réunit des unités déjà existantes comme le Laboratoire de simulation et de modélisation, dirigé par intérim par Andreas Adelman, mais aussi de nouvelles unités comme le troisième site du Swiss Data Science Center au PSI, qui vient compléter les deux sites existant à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) et à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich (ETHZ). Environ septante personnes effectuent de la recherche, développent et apportent leur soutien au sein de ces quatre entités. Elles seront bientôt une centaine. Alors que les trois chefs de laboratoire Andreas Adelman, Andreas Läuchli et Nicola Marzari se consacrent principalement aux méthodes scientifiques dans leurs disciplines respectives, Alun Ashton, à la tête du département Science IT Infrastructure and Services, dirige une unité qui appuie techniquement, en matière de calcul scientifique, les chercheurs et chercheuses du domaine des sciences photoniques, de la SCD et du PSI en général.

«Les départements doivent mener des recherches et ne pas gérer leurs propres services informatiques», indique Alun Ashton. C'est pourquoi la centralisation au sein de la SCD est la bonne option. «On ne réinvente pas la roue, mais nous avons avec la SCD un atout unique, renchérit Andreas Adelman. La nouvelle division de recherche exploite mieux les synergies, elle a un rayonnement international et attire des personnes de qualité. Elle est davantage que la somme de ses parties.»

L'un de ses «clients» les plus intéressants est Marco Stampanoni, constate Alun Ashton avec un clin d'œil. L'équipe du professeur de l'ETH se consacre à la microtomographie à rayons X, qui est très exigeante en matière de puissance de calcul et de capacité de stockage. Pour étudier par exemple comment, lors de la synthèse d'un nouvel alliage, un gaz chaud s'introduit dans une mousse liquide métallique, le logiciel doit, pour chaque milliseconde, calculer un instantané en trois dimensions des données. Les quantités de données générées et traitées sont énormes. D'autres collègues du même laboratoire s'occupent de microscopie computationnelle et, en particulier, de ptychographie. Celle-ci remplace la microscopie à rayons X conventionnelle qui utilise des lentilles mais qui n'atteint pas une résolution aussi précise. Avec la ptychographie, un algorithme itératif reconstruit la radiographie à partir des données brutes du détecteur, qui est éloigné de l'échantillon, sans qu'une lentille se trouve entre eux, et qui utilise les propriétés cohérentes d'une source de lumière synchrotron. L'opération mathématique qui se trouve à la base est très exigeante en termes de calcul et doit être exécutée un millier

Au PSI, Xavier Deupi étudie des biomolécules, par exemple les capteurs de lumière. Afin de savoir précisément comment ils fonctionnent, il est nécessaire de connaître leur structure. Une exploration qui génère d'immenses quantités de données.



de fois. A la SLS 2.0, les exigences en matière de puissance de calcul augmenteront considérablement, ce qui rend le recours au superordinateur du Centre suisse de calcul scientifique (CSCS) de Lugano indispensable.

### Ne plus se fier à la loi de Moore

Et cet écart de performance devrait croître encore. En effet, les chercheurs du PSI et ceux de nombreuses autres disciplines des sciences naturelles ne peuvent plus se fier à la loi de Moore. En 1965, le cofondateur d'Intel, Gordon Earle Moore, avait prédit que le nombre de transistors – qui correspond plus ou moins à la puissance de calcul – allait doubler tous les dix-huit mois (selon certaines sources, douze ou vingt-quatre mois). La loi de Moore est toujours actuelle et le sera encore pendant cette décennie. Mais cela ne suffit malheureusement pas. «La brillance des sources comme le SwissFEL ou la SLS 2.0 augmente plus vite que la loi de Moore, avertit Marco Stampanoni. Nous avons besoin de solutions plus intelligentes qu'une simple hausse de la puissance de calcul.»

Cela pourrait être l'apprentissage automatique. «C'est un truisme. Nos données contiennent bien plus que ce que nous avons pu exploiter jusqu'ici», affirme Andreas Adelman. L'apprentissage automatique pourrait permettre de découvrir ce qui se cache dans ces montagnes de données. Et contribuer à épargner le précieux temps de rayonnement de la SLS et du SwissFEL. Après leurs mesures, les expérimentateurs emportaient autrefois leurs données chez eux pour les analyser au calme. Mais des expériences pouvaient mal se passer et l'on ne s'en rendait compte qu'après des mois. Des modèles rapides fondés sur l'apprentissage automatique peuvent dire pendant l'expérience en cours si les valeurs mesurées sont plausibles. Dans le cas contraire, l'expérimentateur a le temps d'ajuster son dispositif de mesure. «La collecte des données et leur analyse se rapprochent», lance Andreas Adelman.

Marco Stampanoni considère la SCD comme un partenaire important. L'informatique n'est pas la tasse de thé de beaucoup d'utilisateurs et de chercheurs, qui peuvent se montrer dépassés. «Un médecin n'est pas obligé de savoir comment fonctionne un synchrotron ou comment et où exactement les données sont stockées.» S'il s'intéresse à l'effet d'un médicament sur la solidité des os, il ne veut pas devoir étudier un jeu de données de 10 téraoctets livré par une expérience tomographique menée au synchrotron. Un simple graphique avec les principaux résultats lui suffit. «La SCD fournira là une contribution permettant aux usagers de ré-

soudre leurs problèmes de données et d'atteindre des résultats scientifiques dans un délai raisonnable», espère Marco Stampanoni.

### Utiliser des synergies

Xavier Deupi est certain que cela va marcher. Pour le scientifique du groupe de recherche Théorie de la matière condensée, la création de la SCD était inéluctable: «Le PSI avait besoin de consolider le calcul scientifique au sein d'une entité organisationnelle, afin de pouvoir exploiter des synergies.» Les scientifiques des données sont maintenant réunis dans la même division. Ils peuvent répondre plus rapidement aux questions de son équipe et lancer des projets communs. «Grâce à leur savoir-faire informatique et à nos connaissances en biologie, de nouveaux outils sont créés pour étudier les protéines.»

Xavier Deupi se décrit lui-même comme un «heavy user» du puissant ordinateur Merlin du PSI et du superordinateur de Lugano. Pour une expérience, il fait appel à des centaines de processeurs qui fonctionnent pendant autant d'heures et parfois même pendant des mois. Mais ce n'est pas suffisant: malgré cette longue durée de calcul, il ne peut simuler que des changements de quelques microsecondes dans les protéines. Mais lorsqu'une molécule se lie à une protéine, par exemple l'adrénaline à des récepteurs dans les cellules cardiaques, cela dure au moins quelques millisecondes. Un tiers de tous les médicaments se lient aux protéines qu'il étudie. Si l'on pouvait observer l'ensemble du processus dans une vidéo en 3D, ce serait une percée pour le développement de ceux-ci. Cependant, même les ordinateurs les plus puissants ne sont pas encore en mesure de le faire.

Mais pourquoi faire compliqué quand on peut faire simple? Nombreux sont ceux qui se posent la question depuis que Google a présenté, avec AlphaFold, un logiciel qui, grâce à l'intelligence artificielle, analyse des modèles de telles protéines beaucoup plus rapidement et précisément. On n'entre que la séquence et AlphaFold «recrache» la structure. «AlphaFold, c'est très bien, se félicite Xavier Deupi. La fin de la biologie structurale, prophétisée par certains, n'est toutefois pas encore en vue.» Il n'a pas non plus peur de perdre son poste. L'algorithme de Google ne dévoile pas l'entièreté de la structure d'une protéine et l'on ne peut pas simplement en déduire la fonction. «AlphaFold ne dit pas comment les protéines bougent.» C'est pourquoi les grandes installations de recherche, comme la SLS et le SwissFEL, continuent d'être nécessaires. «AlphaFold ne remplace pas ces machines, il les complète.»

## Accompagner le changement

La SCD est le lieu idéal pour tester ces nouveaux outils. Dans cette intention, expérimentateurs, théoriciennes, experts en informatique, ingénieures et autres... doivent se parler. Marie Yao estime que c'est nécessaire afin que les informaticiens trouvent les bonnes solutions pour eux. Elle a été engagée au sein de la SCD pour surmonter les problèmes de communication et accompagner le changement en vue des meilleurs résultats scientifiques possible. Si elle travaillait dans une entreprise, elle se qualifierait de «manager d'alliances stratégiques». «Le changement n'est pas toujours simple», remarque celle qui a occupé, pendant plusieurs années, un poste semblable au Oak Ridge National Laboratory (USA). Certains collaborateurs ont peur de perdre de l'influence et s'accrochent aux vieux processus. Sa tâche consiste à encourager le travail en équipe et à créer un environnement où tous et toutes se sentent en sécurité et appréciés grâce à leur contribution à de meilleures solutions techniques.

Dans l'équipe d'Alun Ashton, à l'interface entre la SCD et les autres divisions du PSI, Marie Yao coordonne aussi les développements pour le lancement de la SLS 2.0 en 2025 et contribue à l'élaboration de solutions techniques. D'ici là, hardware, software et réseaux devront être prêts à gérer d'énormes quantités de données. Pour la jeune femme, une approche globale est importante. «La solidité du pipeline de données dépend de son maillon le plus faible.»

En science comme dans d'autres secteurs économiques, c'est le manque de personnel qualifié qui représente de plus en plus ce maillon faible. Lorsque les experts font défaut, il faut les former, souvent dans des domaines interdisciplinaires. «La société nous donne des experts compétents, nous devrions donc lui rendre quelque chose. L'une des possibilités est de nous engager dans la formation de la prochaine génération», fait-elle valoir.

Les chercheurs de demain ont du pain sur la planche. Les logiciels pour répondre aux interrogations de la science sont souvent vieux de vingt ans et partiellement inefficaces. Comblar les déficits en augmentant encore la puissance de calcul ne fonctionne plus aujourd'hui. Les logiciels scientifiques doivent être perfectionnés pour faire face à la croissance rapide des données et à des évolutions comme l'utilisation de processeurs graphiques au lieu d'unités centrales de calcul et de commande conventionnelles. «La SCD peut contribuer à attirer des gens capables de le faire», argue Marie Yao.

## «Qui veut mener et publier des recherches avec succès a besoin d'une bonne machine et d'une bonne modélisation.»

Andreas Läuchli, chef du Laboratoire de physique théorique et numérique

### Machine et modélisation

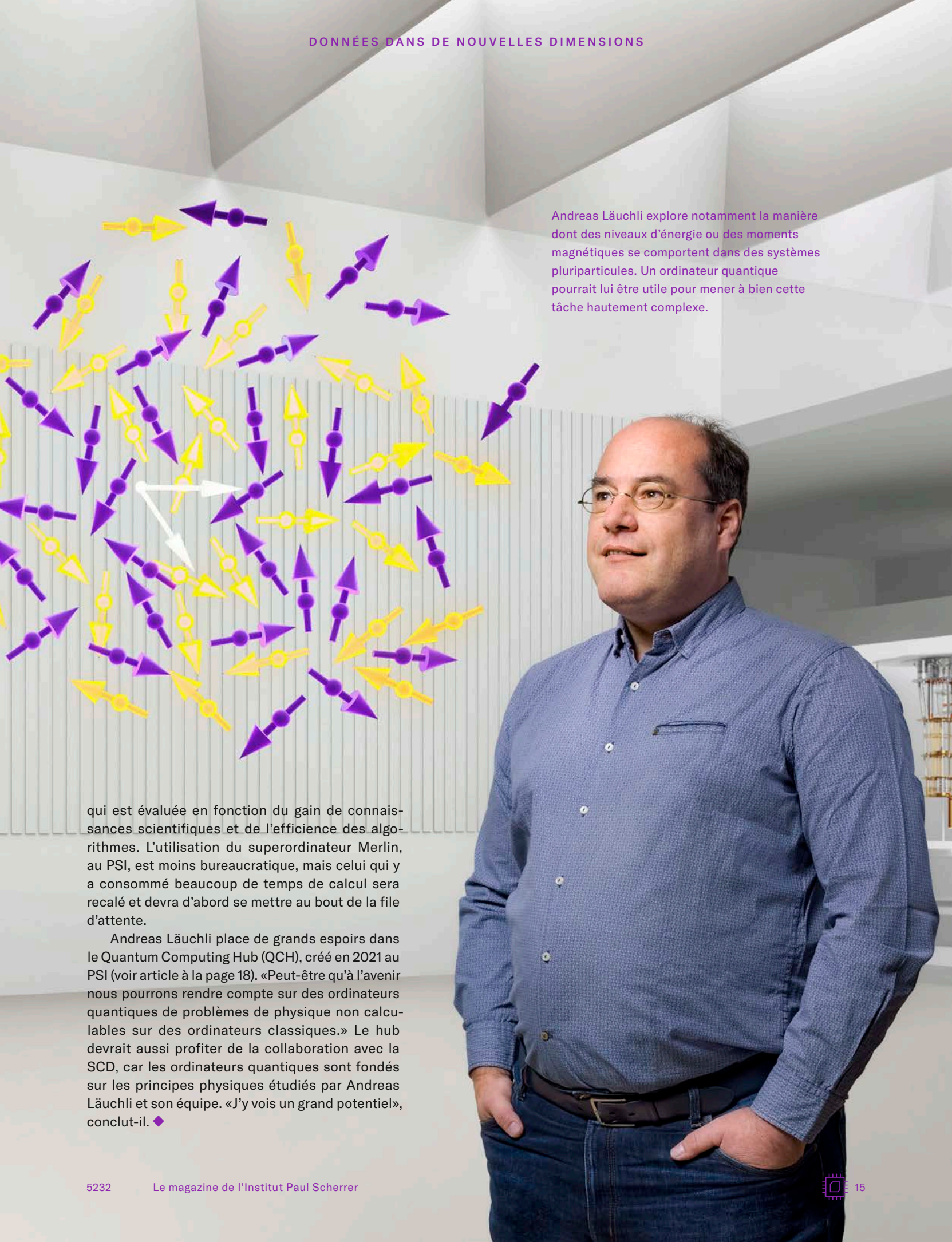
Pour Andreas Läuchli, c'est déjà gagné. Aux côtés d'Andreas Adelman et de Nicola Marzari, il est le troisième chef de laboratoire scientifique au sein de la SCD, où il s'occupe de physique théorique et numérique. Venu d'Innsbruck, il est arrivé voici un an au PSI et à l'EPFL, où il dirige une chaire. Il doit renforcer le volet théorique, mais aussi travailler main dans la main avec les physiciens expérimentaux et leur donner des idées pour de nouvelles expériences, notamment au SwissFEL et à la SLS 2.0. «Les expériences et la théorie deviennent de plus en plus complexes. Qui veut mener et publier des recherches avec succès a besoin d'une bonne machine et d'une bonne modélisation.» La SCD est, selon lui, un élément important de cette synthèse.

Son dada, ce sont les systèmes pluriparticules: ce qui, en physique, comprend plus d'un seul atome d'hydrogène et, donc, presque l'ensemble de la matière. Tous les chemins pour déterminer les niveaux d'énergie dans ces systèmes passent par l'équation de Schrödinger. Si celle-ci fournit des résultats exacts pour l'atome d'hydrogène, l'effort de calcul croît de façon exponentielle pour les systèmes pluriparticules. C'est pourquoi les chercheurs se rabattent sur des approximations avec quelques atomes, mais il n'est pas toujours sûr que celles-ci soient suffisamment proches de la réalité.

Andreas Läuchli utilise alors un levier, la méthode dite de la «force brute». Avec une puissance de calcul massive, il brise l'équation de Schrödinger avec jusqu'à cinquante particules. 20 000 noyaux de processeurs, avec plusieurs téraoctets de mémoire vive, travaillent simultanément pendant plusieurs semaines. Même le superordinateur de Lugano est bloqué, pendant un temps, pour d'autres utilisateurs. «La méthode de la force brute est parfois importante pour vérifier si nos approximations sont valables», précise-t-il.

Naturellement, il n'est pas possible d'avoir recours au calculateur de façon spontanée. Chaque équipe doit déposer une demande étoffée à Lugano,





Andreas Läuchli explore notamment la manière dont des niveaux d'énergie ou des moments magnétiques se comportent dans des systèmes pluriparticules. Un ordinateur quantique pourrait lui être utile pour mener à bien cette tâche hautement complexe.

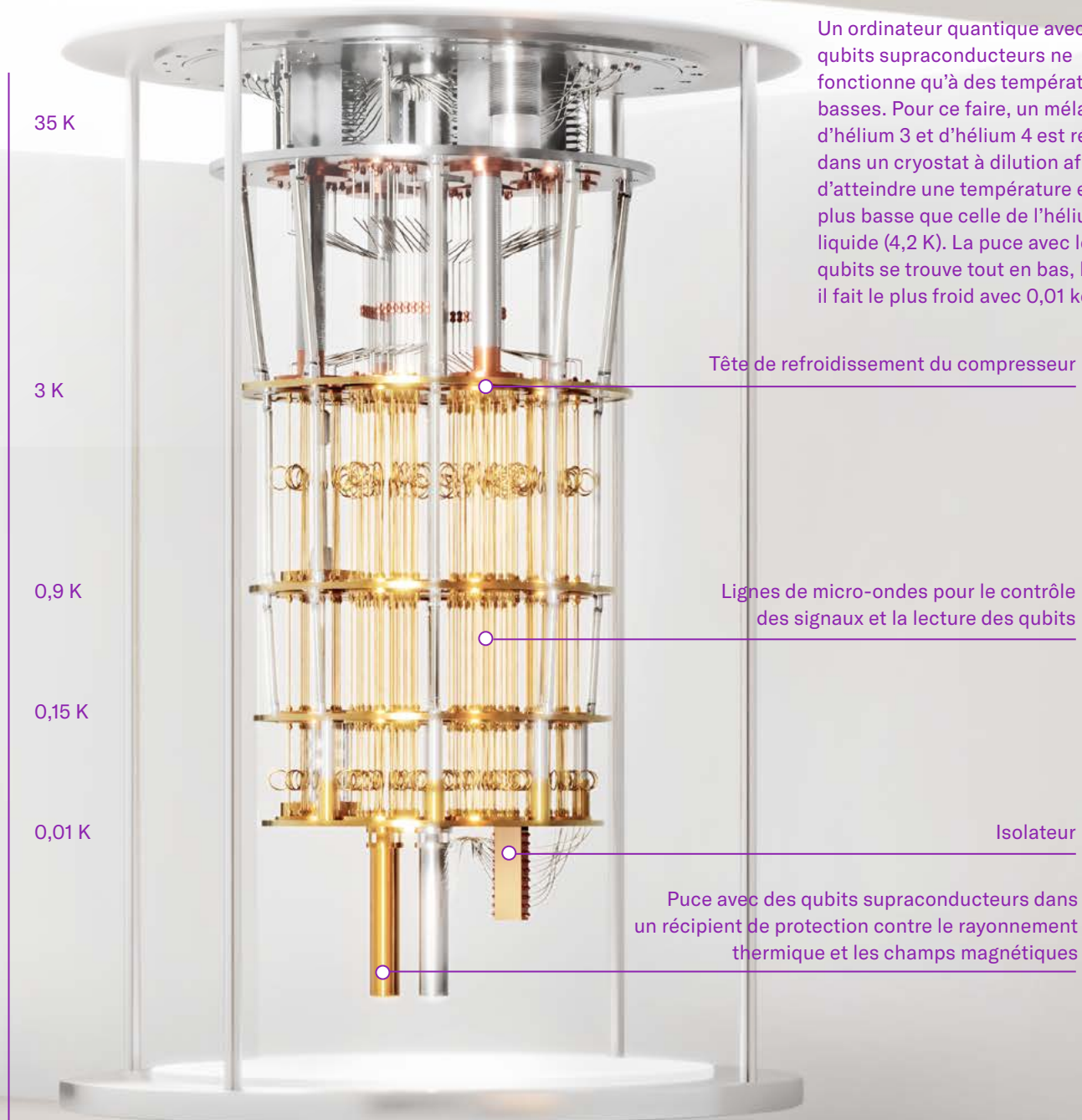
qui est évaluée en fonction du gain de connaissances scientifiques et de l'efficacité des algorithmes. L'utilisation du superordinateur Merlin, au PSI, est moins bureaucratique, mais celui qui y a consommé beaucoup de temps de calcul sera recalé et devra d'abord se mettre au bout de la file d'attente.

Andreas Läuchli place de grands espoirs dans le Quantum Computing Hub (QCH), créé en 2021 au PSI (voir article à la page 18). «Peut-être qu'à l'avenir nous pourrions rendre compte sur des ordinateurs quantiques de problèmes de physique non calculables sur des ordinateurs classiques.» Le hub devrait aussi profiter de la collaboration avec la SCD, car les ordinateurs quantiques sont fondés sur les principes physiques étudiés par Andreas Läuchli et son équipe. «J'y vois un grand potentiel», conclut-il. ◆

# Pas à pas – ou tout en même temps

L'ordinateur quantique ouvre de nouvelles possibilités à la technologie informatique. Parce que ses qubits sont en interrelation et possèdent plusieurs états différents en même temps, il peut effectuer des calculs qu'un ordinateur classique ne pourrait résoudre.

Un ordinateur quantique avec des qubits supraconducteurs ne fonctionne qu'à des températures très basses. Pour ce faire, un mélange d'hélium 3 et d'hélium 4 est réalisé dans un cryostat à dilution afin d'atteindre une température encore plus basse que celle de l'hélium liquide (4,2 K). La puce avec les qubits se trouve tout en bas, là où il fait le plus froid avec 0,01 kelvin.



Présentation simplifiée

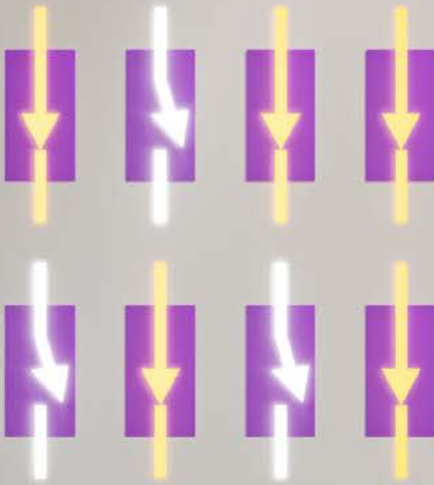
Echelle à gauche:  
température (0,01 K = -273,14 °C)



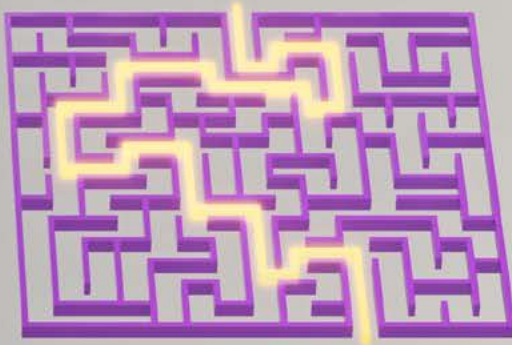
## Ordinateur classique



Chaque bit ne peut revêtir, à un moment donné, qu'un état sur deux: 0 ou 1 – comme une ampoule qui est allumée ou éteinte.



Les bits sont par ailleurs indépendants les uns des autres et ne s'influencent pas réciproquement.

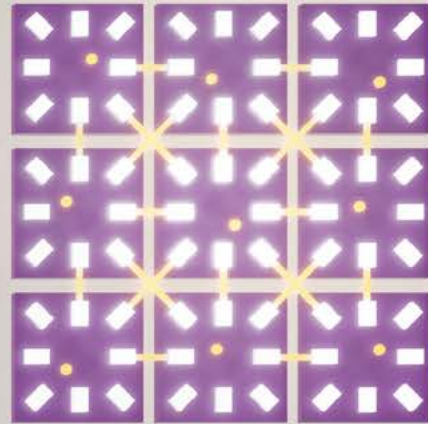


Un ordinateur classique ne peut donc effectuer qu'un calcul à la fois. Pour trouver un chemin à travers un labyrinthe, il doit tester toutes les possibilités les unes après les autres.

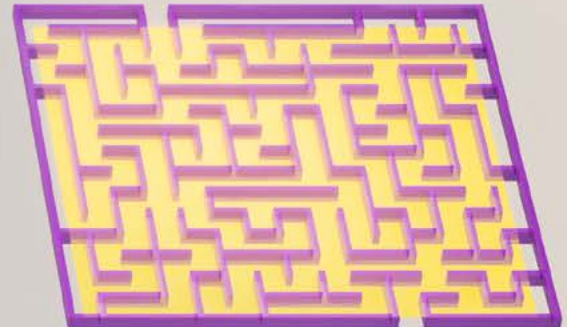
## Ordinateur quantique



Chaque qubit peut revêtir plusieurs états à tout moment donné – comme une ampoule dont la luminosité et la teinte sont réglées en continu par un variateur de lumière.



Les qubits (ici dans des pièges à ions sur une micropuce) sont intriqués et s'influencent réciproquement.



L'ordinateur quantique peut ainsi effectuer plusieurs calculs en même temps – par exemple, tester en parallèle tous les chemins à travers un labyrinthe. A la fin, on obtient une réponse. Toutefois, chaque calcul doit être répété quelques fois afin que le meilleur chemin émerge de la statistique des réponses.

# Une solution à l'insoluble

Le PSI et l'ETH Zurich ont créé le Quantum Computing Hub. Des chercheurs de pointe y collaborent au développement d'ordinateurs quantiques, qui devraient très largement dépasser les ordinateurs classiques dans certaines opérations de calcul.

Texte: Bernd Müller

Kirsten Moselund et Cornelius Hempel étudient, au PSI, la manière dont un ordinateur quantique fonctionnel peut être réalisé.



Si l'on établissait une liste des chercheurs les plus en pointe dans le monde en matière d'ordinateurs quantiques, Jonathan Home et Andreas Wallraff figureraient en bonne place. Les deux professeurs de physique de l'École polytechnique fédérale de Zurich, l'ETH Zurich (ETHZ), maîtrisent leur sujet et ils ne sont pas les seuls: en Suisse, durant ces dernières années, s'est établie une expertise quantique qui rivalise avec celle des grandes nations. De plus, de nombreuses jeunes entreprises développent des technologies quantiques, comme Zurich Instruments ou ID Quantique.

Tout va donc bien? Pas tout à fait. «La technologie quantique a fait un grand pas vers des applications, relève Gabriel Aeppli, chef de la division de recherche Sciences photoniques du PSI. Pour cela, il faut des experts aux compétences allant bien au-delà de ce que peut offrir une institution renommée comme l'ETHZ, notamment des ingénieurs qui peuvent convertir les résultats de recherche en prototypes fonctionnels.» C'est là que le PSI entre en jeu. «Un laboratoire national comme le PSI réunit toutes les compétences pour ce scale-up», estime-t-il. C'est-à-dire le passage d'une expérience de base à une technologie qui, dans un avenir prévisible, pourra résoudre des problèmes concrets et, un jour, commerciaux.

Le PSI montre depuis des années qu'il en est capable grâce à ses grandes installations de recherche, comme la Source de Lumière Suisse SLS et le laser à rayons X à électrons libres SwissFEL, où sont utilisées des technologies que l'on ne peut acquérir n'importe où. En tant que laboratoire national, le PSI profite du fait que des experts et des expertes chevronnés peuvent y relever des défis complexes pendant une période prolongée. Il n'en va pas de même dans les équipes de recherche des universités. «Nous avons beaucoup de scientifiques talentueux, mais ils doivent quitter l'équipe après quelques années, en général après leur doctorat», note Jonathan Home. Un scale-up, comme au PSI, n'est donc pas possible en principe à l'ETHZ.

L'ETHZ et le PSI ont compris que les deux institutions se complétaient parfaitement pour le développement d'ordinateurs quantiques. C'est pourquoi elles ont créé le Quantum Computing Hub. Concernant l'organisation, ce centre de recherche dépend de la division Sciences photoniques de Gabriel Aeppli et du Laboratoire des technologies nanométriques et quantiques. Le Quantum Computing Hub se trouve sur le site du PSI, près de Villigen, où un bâtiment a été équipé pour la recherche quantique. Des chercheurs y poursuivent diverses approches pour réaliser un tel ordinateur.

Au sous-sol, l'équipe de Jonathan Home, professeur d'information quantique expérimentale, construit des circuits quantiques sur la base de

pièges à ions. A l'étage supérieur, Andreas Wallraff, professeur de physique du solide, se consacre aux mêmes questions. Avec son équipe, il utilise toutefois des composants supraconducteurs ultrafroids. Deux équipes supplémentaires, qui développent encore d'autres concepts pour la réalisation d'ordinateurs quantiques, viendront s'y ajouter cette année. Le nombre de chercheurs au hub devrait passer de vingt aujourd'hui à cent dans cinq ans. Dans le Park Innovaare, situé tout près du PSI, une salle blanche sera aménagée avec des installations de nanofabrication, où les chercheurs pourront produire des qubits, à la base de tout ordinateur quantique.

L'organisation de cette croissance incombera à Kirsten Moselund, qui dirige, depuis février 2022, le Laboratoire de nanotechnologies et de technologies quantiques du PSI et donc le Quantum Computing Hub. Cette professeure de génie électrique et de microtechnique à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) travaillait auparavant au laboratoire de recherche IBM, sis à Rüschlikon, où elle s'intéressait à la nanophotonique. «Au sein du nouveau hub, nous réunissons des technologies quantiques et une plate-forme technologique solide», argue-t-elle. Selon elle, une vraie course a été lancée autour des ordinateurs quantiques, comme pour le premier alunissage habité, et le hub dispose d'une excellente position de départ. «L'ETHZ et le PSI se complètent très bien. Avec les grandes installations de recherche comme la SLS et le SwissFEL, nous jouissons de possibilités que les autres n'ont pas: par exemple, celle d'analyser des défauts dans les matériaux pour de futures puces quantiques.»

Un problème aussi complexe que la réalisation d'un ordinateur quantique adapté à l'usage quotidien nécessite cependant de nombreuses coopérations. C'est pourquoi des chercheurs et chercheuses du PSI collaborent avec beaucoup d'autres institutions, en premier lieu le Pôle de recherche national (PRN) MARVEL, qui a son siège à l'EPFL et qui est dirigé par le professeur de l'EPFL Nicola Marzari.

Pour l'instant, aucun ordinateur quantique universel et tolérant aux pannes n'est commercialement disponible. Les appareils développés par IBM ou Google ont un peu plus de cent qubits. Comme chaque qubit ne possède pas seulement les états 1 et 0, mais plusieurs, et que les qubits sont «intriqués», quelques douzaines d'entre eux peuvent déjà traiter des problèmes qui seraient trop complexes, même pour des microprocesseurs dotés de milliards de transistors. Dans les ordinateurs quantiques présentés jusqu'ici, peu de qubits sont toutefois intriqués simultanément, ce qui limite la puissance réelle de calcul.

# «La Suisse a besoin d'une forte présence dans les technologies quantiques.»

Kirsten Moselund, cheffe du Laboratoire des technologies nanométriques et quantiques

«Les chercheurs apprécient les ordinateurs quantiques dès maintenant», indique Cornelius Hempel, chef du groupe Calcul quantique avec pièges à ions du PSI. En physique, il y a des problèmes qui peuvent déjà être résolus avec cinquante qubits. A l'ETHZ, l'équipe de Jonathan Home utilise des groupes d'atomes avec des champs magnétiques pour les capturer dans un piège à ions, les influencer en les bombardant d'un faisceau laser et leur faire exécuter des opérations de calcul logique (voir aussi le graphique à la page 16). Le PSI prévoit des microprocesseurs avec des douzaines de pièges à ions, dans lesquels les ions peuvent aller et venir et qui se combinent pour former une puce quantique plus grande. Le faisceau laser est diffusé dans la puce par de fines fibres lumineuses et manipule les atomes en modifiant leurs états énergétiques, pendant que des champs électriques leur impriment un mouvement de va-et-vient. Ces atomes, tous pourvus des mêmes propriétés, sont de parfaits qubits.

Le défi est de pouvoir les contrôler. Pour l'instant, cela ne présente pas d'intérêt pour des applications pratiques dans l'industrie. Prenons l'exemple de la nitrogénase, une enzyme grâce à laquelle des bactéries fixent l'azote contenu dans l'air et qui sert d'engrais naturel aux plantes. Aujourd'hui comme il y a cent ans, l'engrais artificiel est fabriqué au moyen du procédé Haber-Bosch, très gourmand en énergie. Si l'on savait comment l'enzyme travaille et comment reproduire ce mécanisme, ce serait une avancée pour l'alimentation humaine. Mais ce mystère n'a pas pu être percé jusqu'ici, même avec des superordinateurs. Un ordinateur quantique, avec des milliers de qubits sans erreur, pourrait modéliser l'enzyme par le biais de seulement quelques millions d'opérations de calcul.

La difficulté réside toutefois dans le «sans erreur». En effet, les qubits calculent aujourd'hui avec un taux d'erreur de 1%, soit beaucoup trop. Par comparaison, un transistor ne se trompe en moyenne qu'une fois sur  $10^{27}$  (un chiffre avec 27 zéros) opérations de calcul. La solution, ce sont les qubits logiques, formés de plusieurs qubits physiques et qui peuvent détecter et éliminer les erreurs. Dans les laboratoires d'Andreas Wallraff et de Jonathan Home, la correction des erreurs a été démontrée à petite échelle. Elle s'améliorera avec des systèmes de plus en plus grands. Pour le problème de la nitro-

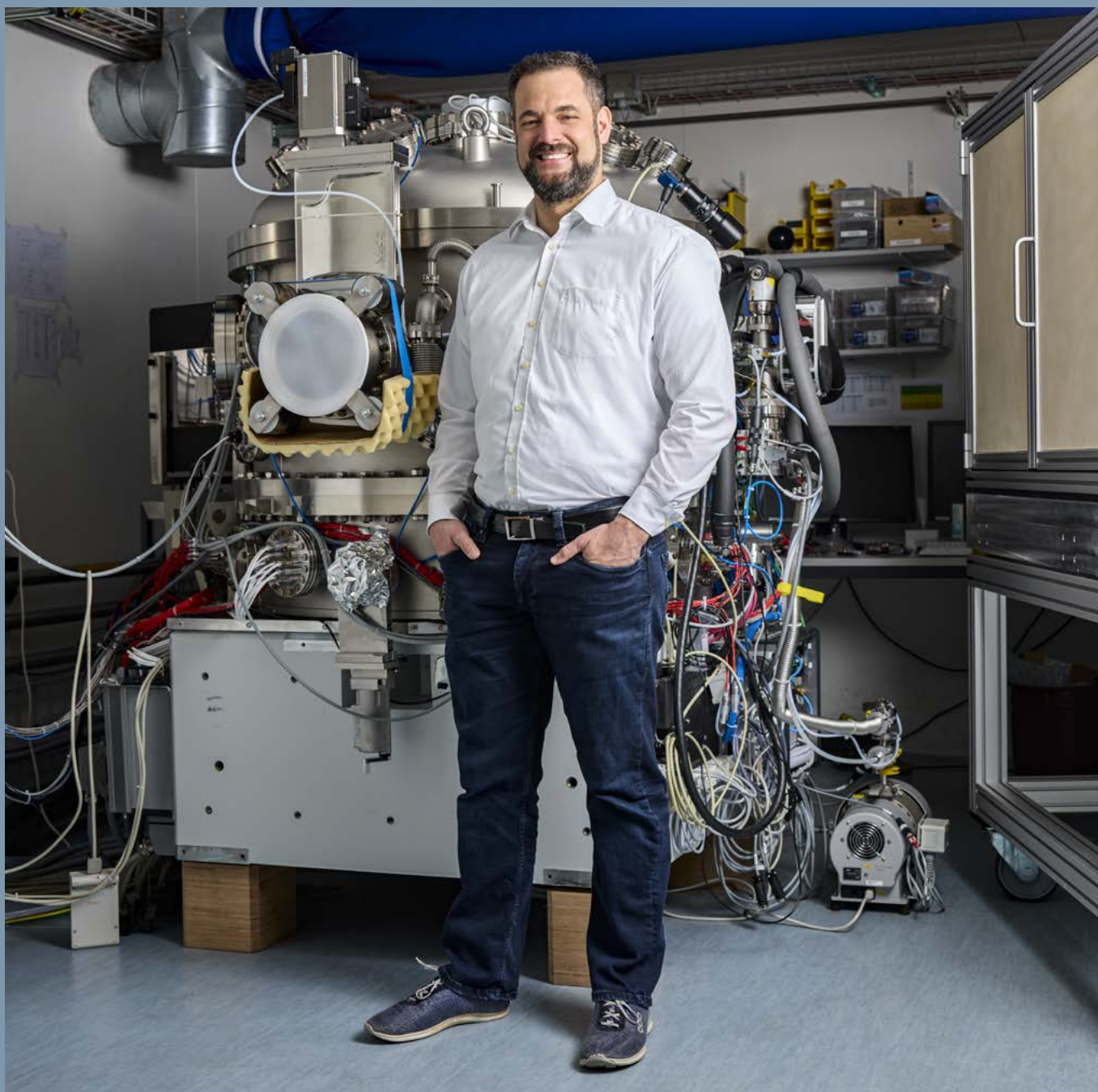
génase, il faudrait, selon certaines estimations, environ mille qubits physiques pour un qubit logique infaillible, ce qui signifie que l'ordinateur devrait comporter environ un million de qubits.

Passer de 127 qubits physiques, comme IBM l'a récemment montré dans une puce, à un million? Cela ne semble qu'une question d'échelle de fabrication. Malheureusement, il n'y a actuellement aucun moyen d'élaborer des systèmes plus grands et complexes sans provoquer davantage d'erreurs. Il faut donc prendre avec prudence les succès annoncés par Google, IBM ou Amazon. Il s'agit d'appareils sujets à des erreurs et qui ne peuvent pas encore exploiter immédiatement les avantages d'un plus grand nombre de qubits. L'ordinateur quantique que l'on peut poser sur son bureau pour résoudre de vrais problèmes ne sera pas disponible avant dix ans – et peut-être ne le sera-t-il jamais... Toutefois, les chercheurs sont confiants: selon eux, des ordinateurs quantiques commerciaux sont possibles. Un tel ordinateur, pourvu de millions de qubits, fonctionnerait dans un centre de calcul au côté des superordinateurs classiques.

Physicien au PSI, Alexander Grimm travaille aussi sur le problème de la susceptibilité aux perturbations. Il a obtenu, en janvier de cette année, un ERC Grant avec un subside de recherche de quelques millions pour son nouveau projet COOLCCAT. Alexander Grimm souhaite concevoir un type de qubits qui se comporte de manière aussi stable que possible face aux perturbations. Ses candidats: les qubits encodés dans des oscillateurs, appelés aussi «qubits bosoniques». Ceux-ci se composent par exemple d'un morceau extrêmement mince et fin de métal supraconducteur, long de quelques millimètres.

On ne sait pas encore quel genre de qubit va s'imposer. Outre les qubits supraconducteurs et les pièges à ions, les chercheurs du monde entier explorent une demi-douzaine d'autres idées. C'est également le cas au Quantum Computing Hub, où des concepts de mise en œuvre prometteurs se profilent. De toutes nouvelles options surgiront peut-être. «Qui sait? les collègues de la SLS ou du SwissFEL trouveront peut-être un nouveau matériau permettant de fabriquer de bien meilleurs qubits», lance Cornelius Hempel.

Pour Kirsten Moselund, il n'y a pas de solution alternative au Quantum Computing Hub. «La Suisse a besoin d'une forte présence dans les technologies quantiques», précise l'ingénieure. Selon elle, les ordinateurs quantiques – que Google, Amazon ou d'autres proposeront sans doute un jour sous forme de services en nuage – sont des boîtes noires impénétrables. «Pour utiliser les ordinateurs quantiques de façon sensée, nous devons savoir ce qui se passe sous le capot. C'est ce que nous offrons au PSI», fait-elle valoir. ♦



## Schéma de connexion du cerveau

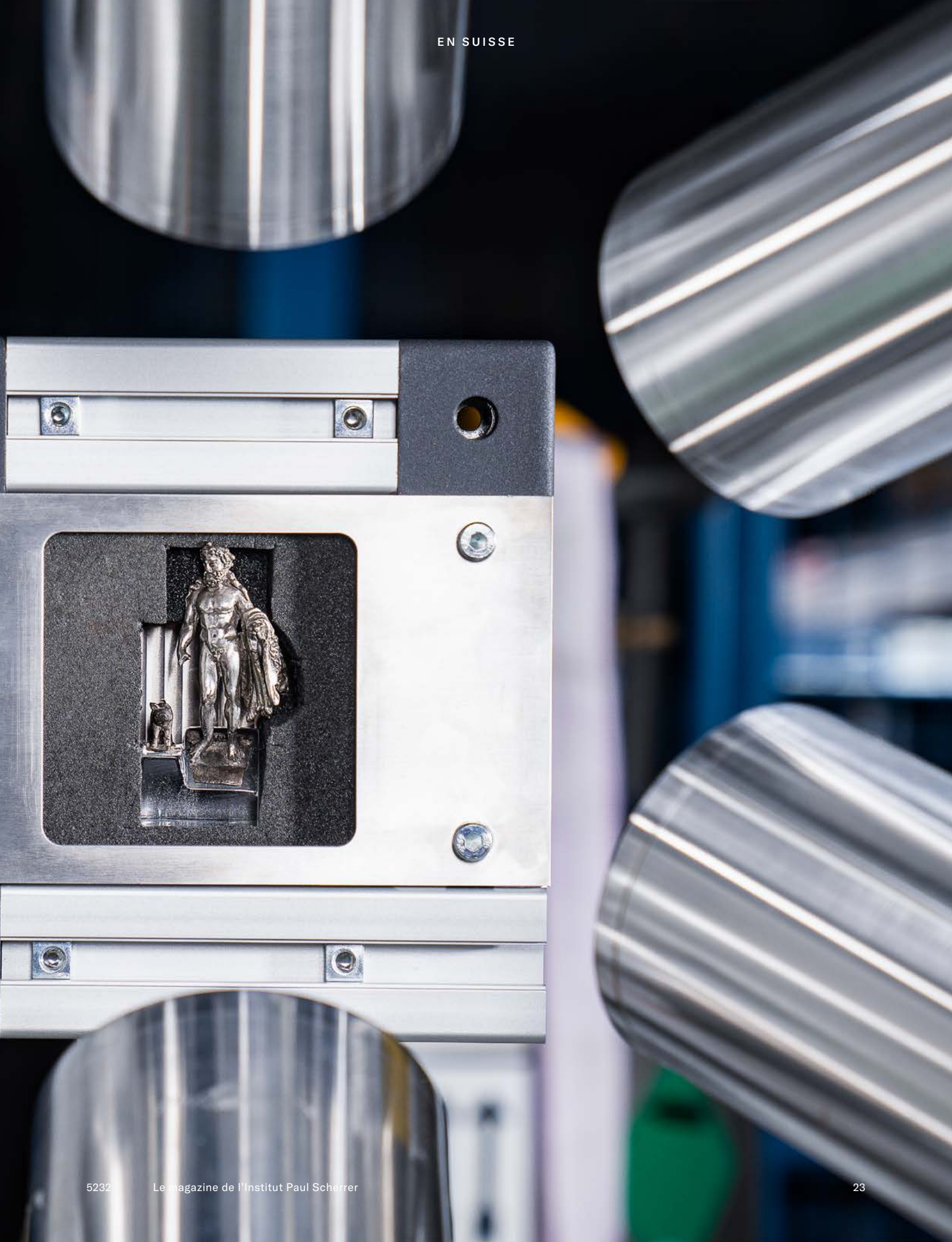
Les connexions entre les cellules nerveuses du cerveau se forment en raison d'expériences et de processus d'apprentissage. Pour l'instant, on ignore comment se présente le modèle de connexion. A la Source de Lumière Suisse SLS, le neuroscientifique Adrian Wanner veut mettre en évidence, jusque dans leurs plus fines ramifications, des structures neuronales grâce à des rayons X. Il va notamment étudier comment les cellules nerveuses traitent les informations. Les connaissances sur le fonctionnement du cerveau qui en résulteront permettront d'envisager de nouvelles approches thérapeutiques pour les maladies neurodégénératives.

# Radiographier un Hercule et des accumulateurs

Il est nécessaire d'avoir recours aux méthodes non destructives pour analyser les objets antiques comme les technologies modernes. A cette fin, les chercheurs du PSI emploient des particules élémentaires, les muons. Ils ont mis au point un nouveau procédé expérimental utile en archéologie et qui peut aussi répondre aux questions de développement des batteries.

Texte: Barbara Vonarburg

Une statuette en argent de six bons centimètres de haut, représentant Hercule, le héros grec, accompagné d'un sanglier mythologique, attend d'être examinée au moyen de muons. Elle est rembourrée dans de la mousse spécialement découpée à cet effet.



Deux chercheurs préparent, en y mettant la dernière main, le transport d'un instrument de mesure. L'appareil, qu'un groupe de recherche du PSI a développé et assemblé durant dix mois, est encadré d'une armature d'environ 2,5 mètres de haut qui le protège. «Nous pourrions ainsi déterminer de manière non destructive les éléments chimiques qui composent un échantillon», explique Lars Gerchow, responsable de la conception de l'instrument. Pour ce faire, les chercheurs ont besoin de particules élémentaires spéciales, appelées «muons».

Lars Gerchow, sa collègue Sayani Biswas et d'autres aides se trouvent dans la salle qui abrite la source de muons du PSI. Composants des rayons cosmiques, les muons sont des particules élémentaires qui sont omniprésentes dans la nature. «En moyenne, c'est un muon par seconde qui traverse notre tête», note le physicien. Au PSI, ils sont créés artificiellement grâce à un grand accélérateur.

L'instrument de mesure est prêt à être transporté à l'endroit prévu, une tâche délicate qui nécessite une grue. Son conducteur reçoit des instructions par radio, depuis le sol, et l'objet s'élève dans les airs.

### **De l'or et de l'argent venant de la ville romaine**

Dans la salle de contrôle, où les physiciennes et les physiciens piloteront l'expérience avec les muons, l'archéologue Isabel Megatli se livre aux derniers préparatifs. Elle a apporté des objets précieux en or et en argent, exhumés à Augusta Raurica, l'un des plus importants sites archéologiques romains de Suisse, à dix kilomètres à l'est de Bâle. Deux statuettes du II<sup>e</sup> siècle après Jésus-Christ sont particulièrement jolies, qui représentent des divinités romaines provenant d'un sanctuaire familial. Haut de six centimètres seulement, Hercule, avec une peau de lion sur le bras, est accompagné d'un sanglier mythologique que les chercheurs appellent entre eux le «petit cochon». Minerve porte une robe plissée et un casque extravagant.

Les deux figurines ont été coulées dans l'argent et partiellement recouvertes d'or. «Nous aimerions savoir quel alliage d'argent a été utilisé, dit Isabel Megatli. Avec les méthodes employées jusqu'à présent, nous ne pouvons analyser que les centièmes de millimètre de la couche la plus extérieure. Toutefois, cette dernière se dénature souvent au cours des siècles. Grâce aux muons, nous pouvons aller à plusieurs millimètres de profondeur.»

L'archéologue a également apporté quelques bijoux antiques faisant office d'offrandes funéraires. «Les fondeurs de l'Antiquité avaient leurs propres recettes, souligne-t-elle. Lorsque deux objets ont le même alliage, ils ont été vraisemblablement fabriqués dans le même atelier.» De plus,

## **«Nous avons pu montrer qu'Hercule et Minerve sont constitués d'un alliage d'argent de haute qualité.»**

Isabel Megatli, collaboratrice scientifique,  
ville romaine d'Augusta Raurica

grâce à d'autres examens, les chercheurs peuvent en partie déterminer de quelles mines les minerais métalliques ont été extraits. «Et nous pouvons aussi démasquer des faussaires, précise-t-elle. L'aluminium n'est par exemple utilisé que depuis le XIX<sup>e</sup> siècle.»

### **L'empreinte digitale des éléments**

«Nous avons un échantillon sur lequel nous envoyons des muons chargés négativement», rappelle la physicienne Sayani Biswas, en décrivant la manière dont l'expérience va se dérouler. Un atome de l'échantillon capture un muon. A la place d'un électron, c'est maintenant un muon qui tourne autour du noyau atomique. Il se trouve au début dans un état excité, puis retrouve peu à peu son état de repos. Des rayons X sont alors diffusés. L'énergie de ce rayonnement est caractéristique du type d'atome, c'est-à-dire de l'élément ayant absorbé le muon. Sayani Biswas, qui est responsable du traitement et de l'analyse des données, montre une courbe précédemment enregistrée avec de fortes variations, ce que l'on nomme un «spectre». Chaque élément possède un motif spécifique de raies spectrales, comme une empreinte digitale.

Dans la salle, l'instrument de mesure est arrivé sans dommage à l'endroit prévu. Maintenant, plusieurs spécialistes fixent les six gros détecteurs de rayons X à l'armature.

Alex Amato, responsable par intérim de la division Recherche avec des neutrons et des muons du PSI, donne aussi un coup de main. Il a lancé ce projet auquel participent, aux côtés du PSI, la ville romaine d'Augusta Raurica, l'Empa et le musée d'Histoire naturelle de Berne et qui bénéficie d'un soutien de 1,5 million de francs dans le cadre du programme Sinergia du Fonds national suisse. «Au PSI, il y a trente ans, on essayait déjà de déterminer en profondeur la composition de matériaux, mais le faisceau de particules n'était pas assez intense, explique-t-il. Aujourd'hui, nous sommes vingt fois meilleurs. Et nous avons une intensité mille fois supérieure à celle de nos collègues d'Angleterre et du Japon pour des expériences du même type.»



Sayani Biswas et Lars Gerchow discutent de l'expérience à venir à la ligne de faisceau de muons.



Dans le descriptif de Sinergia, on peut lire: «Ce projet a pour objectif de faire de la Suisse un leader mondial en matière d'analyse non destructive des éléments.» Et l'on anticipe une forte demande de la part de l'industrie, de la culture et des secteurs académiques.

Réunis devant une série d'écrans d'ordinateur dans la salle de contrôle, les chercheurs n'en sont encore qu'au début. Dans la zone de l'expérience, il n'y a maintenant plus personne; seules les statuettes d'Hercule et de Minerve attendent d'être examinées. Sur des supports en mousse découpés exprès, elles sont placées dans des cadres métalliques qui sont à leur tour positionnés sur un rail, devant les détecteurs. «Nous pouvons démarrer le faisceau», lance Lars Gerchow depuis la salle de contrôle. Les mesures, effectuées vingt-quatre heures sur vingt-quatre, commencent.

### Une batterie sous le faisceau de muons

Deux jours plus tard, les chercheurs placent un tout autre objet sous le faisceau de muons: une batterie lithium-ion. «Nous voulons savoir comment elle vieillit à l'usage», fait valoir Ryo Asakura, chercheur à l'Empa de Dübendorf. Pour ce faire, il a amené au PSI une batterie neuve et une usagée, de petits paquets plats qui ressemblent aux accumulateurs des smartphones. «Les cathodes de ces batteries contiennent du nickel, du manganèse et du cobalt», indique Ryo Asakura. Avec le temps, ces métaux s'en détachent, ce qui contribue au vieillissement de ce type d'appareil. Les mesures avec les muons doivent mettre ce processus en évidence. Plus tard,

les chercheurs aimeraient suivre le lithium dans la batterie. Les résultats doivent permettre d'améliorer la densité énergétique et la sécurité des batteries lithium-ion.

Après une semaine, les mesures sur les objets antiques et sur les batteries sont terminées. «En ce qui concerne la batterie, nous voyons dans le spectre de belles raies pour le nickel, le manganèse et le cobalt», affirme Sayani Biswas avec satisfaction. Dans les prochaines semaines, Ryo Asakura chargera et déchargera régulièrement les batteries à l'Empa, afin d'observer les changements après ce processus de vieillissement lors d'une deuxième période de mesure.

### Les variations montrent deux isotopes d'argent

Dans les échantillons d'Augusta Raurica, Sayani Biswas désigne des écarts qui se superposent. «On peut voir ici deux isotopes d'argent distincts», c'est-à-dire des types d'atomes d'argent de faible différence. Le rapport de ces isotopes peut aider Isabel Megatli à déterminer l'origine de l'argent. Elle est déjà enthousiasmée par les résultats préliminaires. «Nous avons pu montrer qu'Hercule et Minerve sont constitués d'un alliage d'argent de haute qualité.»

La prochaine période de mesures est prévue dans deux mois. A côté d'autres objets antiques et de batteries lithium-ion, une pointe de flèche de l'âge du bronze – peut-être fabriquée à partir de matériaux de météorite – sera aussi analysée. «Notre méthode non destructive est très appropriée dans ce cas», déclare Lars Gerchow. ♦

# Actualité de la recherche au PSI

## 1 Un nouveau test de dépistage rapide du Covid-19

Des chercheurs de l'Institut Paul Scherrer PSI et de l'Université de Bâle ont développé un test de dépistage rapide du Covid-19. Par son principe inédit, il permet de tirer des conclusions fiables et quantifiables sur une infection au Covid-19 et son évolution. Les variants du coronavirus et d'autres agents pathogènes, comme la grippe, peuvent être détectés de cette même façon. Contrairement aux tests antigéniques, il ne met pas directement en évidence des composants du virus mais les anticorps produits par le système immunitaire en réaction à l'infection. Il utilise notamment les vaisseaux capillaires, où de petites billes avec des anticorps amarrés restent parfois bloquées. Il est plus concluant – et aussi bon marché, rapide et facile d'emploi – que les autres tests de dépistage des anticorps. Avant de pouvoir être utilisé, il doit encore être expérimenté et optimisé.

En savoir plus:

<http://psi.ch/fr/node/49630>

**29** échantillons de sang ont servi à vérifier le nouveau kit de test.

Il faut **2** minutes pour effectuer le test après optimisation.

Environ **100** fois plus fine qu'un cheveu: c'est la taille des capillaires à leur endroit le plus étroit.

## 2 Une simulation facilite les travaux de déblaiement à Fukushima

Une équipe internationale – chapeauté par l'Université de Sheffield et à laquelle participe le PSI – a mis au point une nouvelle simulation des débris radioactifs les plus dangereux de la centrale nucléaire de Fukushima au Japon. Une recette pour les débris de combustible a été développée à partir des connaissances sur les matériaux utilisés dans les réacteurs – par exemple, le combustible, le gainage et le béton. Les chercheurs ont chauffé ces derniers aux températures extrêmement élevées qui régnaient lors de l'accident et ont produit un pendant aux débris des éléments combustibles à faible radioactivité. Grâce au matériel de simulation, les autorités peuvent désormais – onze ans après la catastrophe et pour la première fois – en apprendre plus sur la composition chimique et les propriétés mécaniques des débris, et élaborer des stratégies sûres pour leur élimination. Pour leurs recherches, les scientifiques ont utilisé la Source de Lumière Suisse SLS. Leur étude pourrait donner une énorme impulsion aux travaux de déblaiement.

En savoir plus:  
<http://psi.ch/fr/node/49916>

## 3 Mieux connaître le sens de la vue

Les chercheurs du PSI ont élucidé la structure d'un élément important dans l'œil. Il s'agit d'une protéine située dans les cellules en bâtonnets de la rétine, qui nous permettent de voir dans la pénombre. En tant que canal ionique dans la cellule membranaire, la protéine permet de transmettre le signal visuel de l'œil au cerveau. Le canal ionique joue le rôle d'un portier qui décide quelles particules peuvent ou non pénétrer à l'intérieur des cellules sensorielles. Il est incorporé dans l'enveloppe lipidique, la membrane cellulaire, des cellules en bâtonnets. Dans l'obscurité, le canal ionique, et donc la porte de la cellule, est complètement ouvert. Mais quand la lumière atteint l'œil, une cascade de processus s'enclenche dans les cellules en bâtonnets. Cela provoque finalement la fermeture de la porte et empêche des particules chargées positivement, comme des ions calcium, de pénétrer dans la cellule. Ce signal électrochimique est transmis jusqu'au centre de la vision du cerveau par des neurones, ce qui nous permet par exemple de percevoir un éclair de lumière. Les gens chez qui la molécule ne fonctionne pas correctement, en raison d'une maladie héréditaire, deviennent aveugles. Les chercheurs ont déchiffré la structure en trois dimensions de la protéine et ont ainsi contribué à ouvrir la voie à un futur traitement.

En savoir plus:  
<http://psi.ch/fr/node/49360>

## 4 Fumiers et lisiers comme sources d'énergie

Fumiers et lisiers ne sont guère valorisés en Suisse, alors que leur méthanisation pourrait contribuer à remplacer les combustibles fossiles et à rendre l'agriculture plus respectueuse du climat. Une publication de chercheurs en énergie, appartenant entre autres à l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL et au PSI, entend guider autorités et spécialistes du terrain pour mieux utiliser cette précieuse ressource. L'étude fournit de nombreuses pistes. Des innovations techniques dans les procédés pourraient améliorer la rentabilité des installations de biogaz. Les prétraitements avec des microorganismes augmentent le rendement énergétique, tout comme la séparation des composants solides et liquides des fumiers d'étable. Généralement inutilisée, la chaleur résiduelle des processus offre une énergie supplémentaire. Prises ensemble, ces mesures pourraient rendre les investissements dans les installations de méthanisation plus attractifs pour les agriculteurs. Les procédés dits «hydrothermaux» sont une solution alternative intéressante à la méthanisation du fumier et du lisier, car la transformation de la biomasse peut se faire en grande partie sans pertes. L'approvisionnement électrique du pays tout entier pourrait en bénéficier.

En savoir plus:  
<http://psi.ch/fr/node/49910>

# L'art au PSI

Les œuvres d'art ont le pouvoir de nous fasciner par leur beauté, mais aussi de nous inciter à la réflexion ou, tout simplement, de nous amuser. Elles permettent d'oublier, un instant, le quotidien et de regarder, comme à travers la fenêtre, un autre monde.

Dans ces pages, nous vous présentons une sélection d'œuvres d'art qui, au PSI, invitent à la rencontre.

Texte: Christian Heid

## Croissance cristalline

Gerda Steiner & Jörg Lenzlinger, 2008

Jaune, orange, rouge, brun, vert clair et vert foncé, bleu clair et bleu foncé... voilà les couleurs dans lesquelles ces cristaux bigarrés semblent flotter au nouveau centre des visiteurs du PSI. Là où les cristaux sphériques, pareils à des coraux ou à des aiguilles, se rencontrent, de nouvelles formes et couleurs se créent. Mis en scène par le duo d'artistes Steiner-Lenzlinger, les cristaux croissent à partir d'une solution saline saturée et par évaporation de l'eau qui y est contenue. Les divers ingrédients présents déterminent leur forme et leur couleur. Au PSI, les cristaux sont normalement utilisés dans la recherche sur les matériaux et en biologie.



## DOPPELRÜSSLER «notre mammoth»

Bruno Weber, 2003

Artiste peintre, graphiste, sculpteur, inventeur, charpentier, maçon, peintre, plâtrier et architecte, le Zurichois Bruno Weber est aussi multiple que son œuvre est unique. Son *Doppelrüssler* («animal à deux trompes») d'environ deux mètres de haut, situé devant l'auditorium du PSI, illustre parfaitement son penchant pour le réalisme fantastique, où des êtres fabuleux et des créatures de rêve se distinguent par leur proximité avec la nature. La parenté du *Doppelrüssler* avec notre mammoth se laisse facilement deviner.





## Spirale

Cornélia Patthey, 2016

Avec son diamètre de trois mètres, cette spirale réfléchissante de l'artiste lausannoise Cornélia Patthey constitue une œuvre imposante située dans le hall d'entrée menant au laser à rayons X à électrons libres SwissFEL. Elle accueille les visiteurs de la grande installation de recherche, qui s'étend sur une longueur de 740 mètres. Lorsqu'on l'observe, le regard est dirigé vers deux infinis: l'infiniment petit et l'infiniment grand. Par ce paradoxe, la *Spirale* symbolise quelque chose d'universel et d'éternel, qui exige des réponses aux questions sur le comment et le pourquoi, lesquelles rapprochent artistes et chercheurs.



## «CYCLUS»

Beni Schweizer, 1983/84

Les tiges brillantes et dorées de cette installation, située dans les escaliers de l'auditorium, attirent tout de suite le regard. Que l'on descende au sous-sol ou que l'on monte au premier étage, on tourne autour de l'œuvre de l'autodidacte Beni Schweizer, qui remplit le puits ou l'ouverture lumineuse de l'escalier. Le mot latin *cyclus* («cycle») et la graphie composée de majuscules et de guillemets renvoient expressément à une autre représentation historique, celle de l'Antiquité, fortement marquée par le cycle récurrent de la nature et des astres.



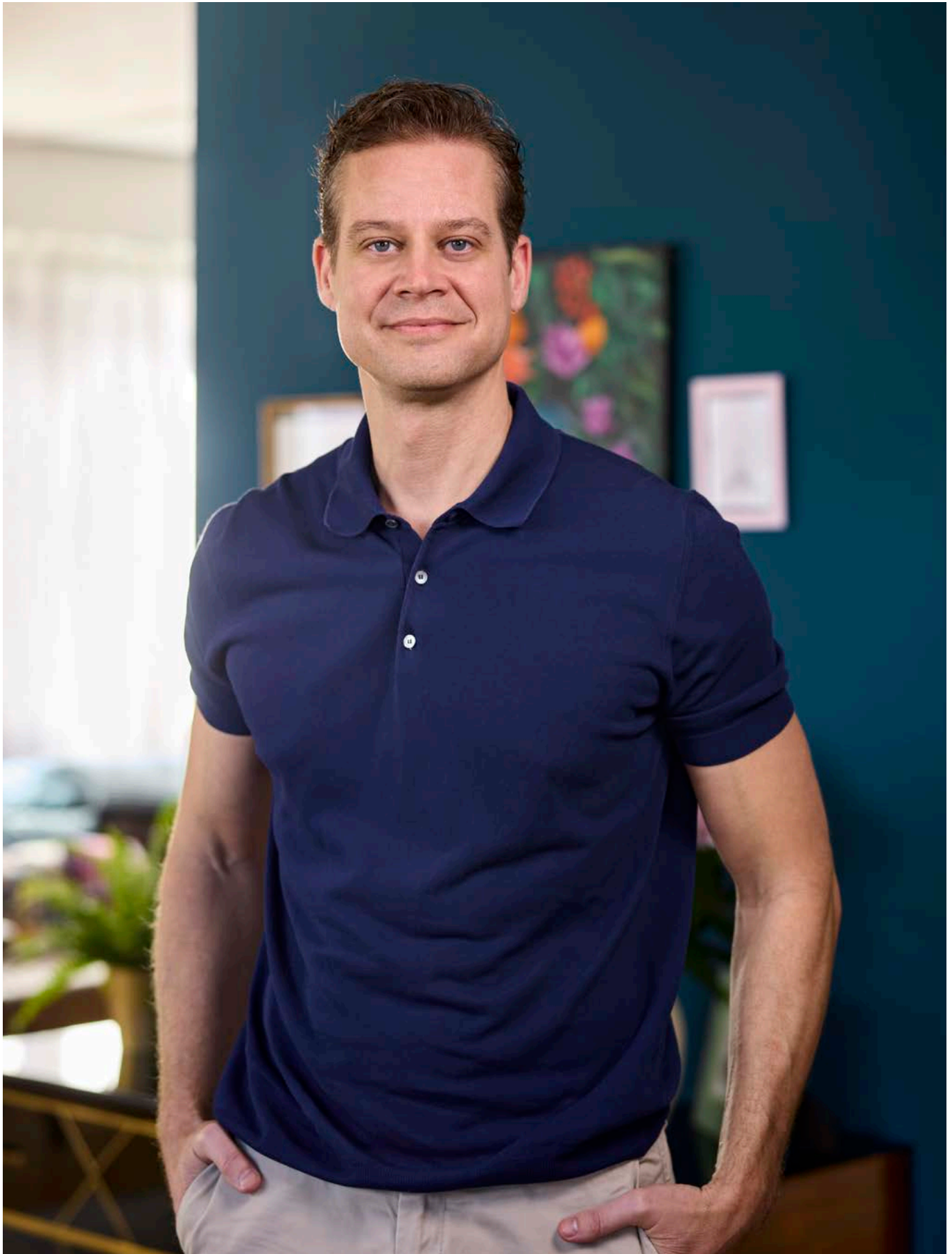
## Liegende Figur

Roman Signer, 1998

Walter A. Bechtler-Stiftung

Cette œuvre se trouve non loin de l'Aar, qui traverse le PSI. Sous les talons de bottes noires en caoutchouc sont installées des buses qui génèrent des jets d'eau et qui sont tour à tour enclenchées et déclenchées. Le mécanisme sur lequel sont fixées les deux bottes a du jeu, ce qui permet des mouvements, des arrêts ou le mélange des deux. L'artiste appenzellois Roman Signer a conçu les choses de telle sorte qu'arrêt et mouvement aient lieu de façon inopinée. Sur le sol asphalté, la *Liegende Figur* («figure couchée») possède ainsi une vie propre imprévisible.





# Saisir les opportunités

Philipp Kraft a construit un nouveau détecteur de rayons X au PSI, où il était doctorant. Aujourd'hui, il participe à la modernisation du centre de test d'un institut financier. Une tâche qu'il accomplit facilement en télétravail, malgré quelques embûches.

Texte: Barbara Vonarburg

Architecte au centre de test, c'est la fonction qu'occupe Philipp Kraft chez Postfinance, l'institut financier de la Poste suisse. Un travail qui n'est pas lié au secteur du bâtiment mais aux technologies de l'information. «Comme architecte informatique, je planifie et porte des projets d'amélioration, d'optimisation et de modernisation au sein du centre de test, explique ce physicien de 44 ans, qui a effectué sa thèse au PSI. J'élabore des visions, des objectifs et des feuilles de route pour le développement informatique du futur et je représente le centre de test dans les questions globales d'architecture informatique de l'entreprise.»

Le centre de test est un élément essentiel de chaque banque. «Ce département décide de la mise en service ou non d'un nouveau logiciel», note-t-il. On doit ainsi garantir qu'une ouverture de compte est correctement archivée ou que, lors d'un versement, tout arrive au bon endroit pour être comptabilisé. «Nous effectuons les tests systématiques, précise-t-il. Actuellement, nous sommes dans une phase de transition.» Autrefois, on élaborait un nouveau logiciel, on le faisait tester et, quand tout était en ordre, on en mettait en ligne la nouvelle version deux fois par an. «Aujourd'hui, tout le monde est plus agile», souligne l'architecte informatique. Cela signifie que le logiciel est mis à disposition en continu, avec une activation rapide pour objectif. «Nous en sommes malheureusement encore relativement loin», constate-t-il. Certes, il existe maintenant quatre dates de mise en service par an, mais il faut davantage d'automatisation et de contrôle de qualité – et le plus vite possible dans le processus de développement. «C'est l'un de mes thèmes principaux.»

Philipp Kraft a commencé chez Postfinance en août 2020, en pleine crise du coronavirus. C'est pourquoi il ne travaille pas au siège central, sis à Berne, mais chez lui, dans un environnement qui, au premier abord, ne semble pas adapté à la sobriété du monde de la finance. L'agencement intérieur de la maison est original, avec de nombreux tableaux colorés et d'amusants trophées de chasse sur les

murs, provenant d'un vieux fonds. «C'est le domaine réservé de ma femme. Son hobby est la peinture et elle a le sens artistique, fait-il valoir. Je suis responsable des questions techniques, par exemple de l'aspirateur-robot ou du contrôle automatique des lampes et des stores.» Des arbres à chats trahissent la présence de deux compagnons à quatre pattes, ce que confirme l'arrivée du matou Gaston. Le gros mistigri au poil soyeux et aux yeux bleus salue les visiteurs et suit les événements avec intérêt.

En général, le télétravail a bien fonctionné, raconte Philipp Kraft, bien qu'il n'ait toujours pas vu certains de ses collaborateurs en chair et en os. Il y a des situations où une présence physique serait un plus: par exemple, lors d'entretiens avec le personnel, si tout n'a pas bien marché ou que l'on eût aimé visualiser quelque chose à l'improviste pour l'expliquer. «On se bat avec la technique sur l'ordinateur, alors que l'on pourrait esquisser un dessin sur papier ou sur tableau noir.»

## Des études de physique malgré ses doutes

Dans sa jeunesse, Philipp Kraft n'aurait jamais pensé travailler dans une banque. Il voulait commencer un apprentissage d'électricien ou de laborantin en physique. «En faisant un stage, j'ai remarqué que le job sympa n'était pas celui du laborantin mais celui du physicien», se souvient-il. Il a donc suivi l'école cantonale. Mais des doutes l'ont à nouveau assailli après la maturité. «Je jouais du saxophone et j'hésitais à devenir musicien.» Un professeur de musique lui a alors donné une astuce pour ses vacances: jouer de la musique pendant trois jours, à raison de huit heures quotidiennes. Le jeune saxophoniste s'y est plié, avant de changer d'avis. Sur les conseils de sa mère, il a pris rendez-vous dans un service d'orientation professionnelle. «Sur la base des tests d'intelligence et d'autres encore, on m'a déconseillé de faire des études de physique. Le psychologue a estimé que je devrais travailler jour et nuit pour y arriver.» Au lieu de le dissuader, cela l'a plutôt encouragé. Il s'est inscrit en physique à l'ETH Zurich et il y a réussi.

Il a choisi de consacrer son travail de diplôme à la physique des particules afin de percer le mystère des origines de l'Univers. Il s'est donc tourné vers l'Institut Paul Scherrer. Mais le responsable de la physique des particules au PSI n'avait pas de place pour lui. «On m'a conseillé d'aller voir un autre groupe qui utilisait les mêmes technologies. J'ai eu une chance énorme», relève-t-il. Ce groupe très motivé, qui l'a fort bien accueilli, était en train de développer de nouveaux détecteurs pour la Source de Lumière Suisse SLS – une entreprise qui a eu tellement de succès qu'elle a donné naissance à la spin-off Dectris. Cette dernière est aujourd'hui leader mondial de la vente de tels détecteurs de rayons X pour les installations synchrotrons comme Pilatus et d'autres... Des capteurs en silicium transforment les photons des rayons X en charges électriques, qui sont saisies et traitées électroniquement. Les différents photons peuvent ainsi être dénombrés.

### Un diagnostic sans appel

Au sein de ce groupe, Philipp Kraft a pu, pour son travail de diplôme, analyser la nouvelle puce de lecture et en éliminer une erreur. Ce travail lui a tellement plu qu'il est resté au PSI pour son doctorat. Alors que les détecteurs Pilatus étaient utilisés pour étudier des cristaux de protéine, Philipp Kraft a été chargé de construire un détecteur plus petit, destiné à la diffusion des rayons X aux petits angles, qui permet de représenter les nanostructures de divers matériaux. Le doctorant s'occupait du logiciel pour le détecteur, élaborait des scripts d'automatisation pour les expériences et effectuait des analyses de données. C'est à ce moment, à 28 ans, que le cancer l'a frappé. «Le diagnostic était totalement inattendu et sans appel.» Il a dû suivre une chimiothérapie et a été en incapacité complète de travailler. «Chez moi, dans mon petit appartement, je m'embêtais comme un rat mort», se rappelle-t-il. C'est pourquoi il a continué de se rendre au PSI, où il rencontrait des gens et où il travaillait, quand cela lui était possible. Il a ainsi pu finir sa thèse malgré tout.

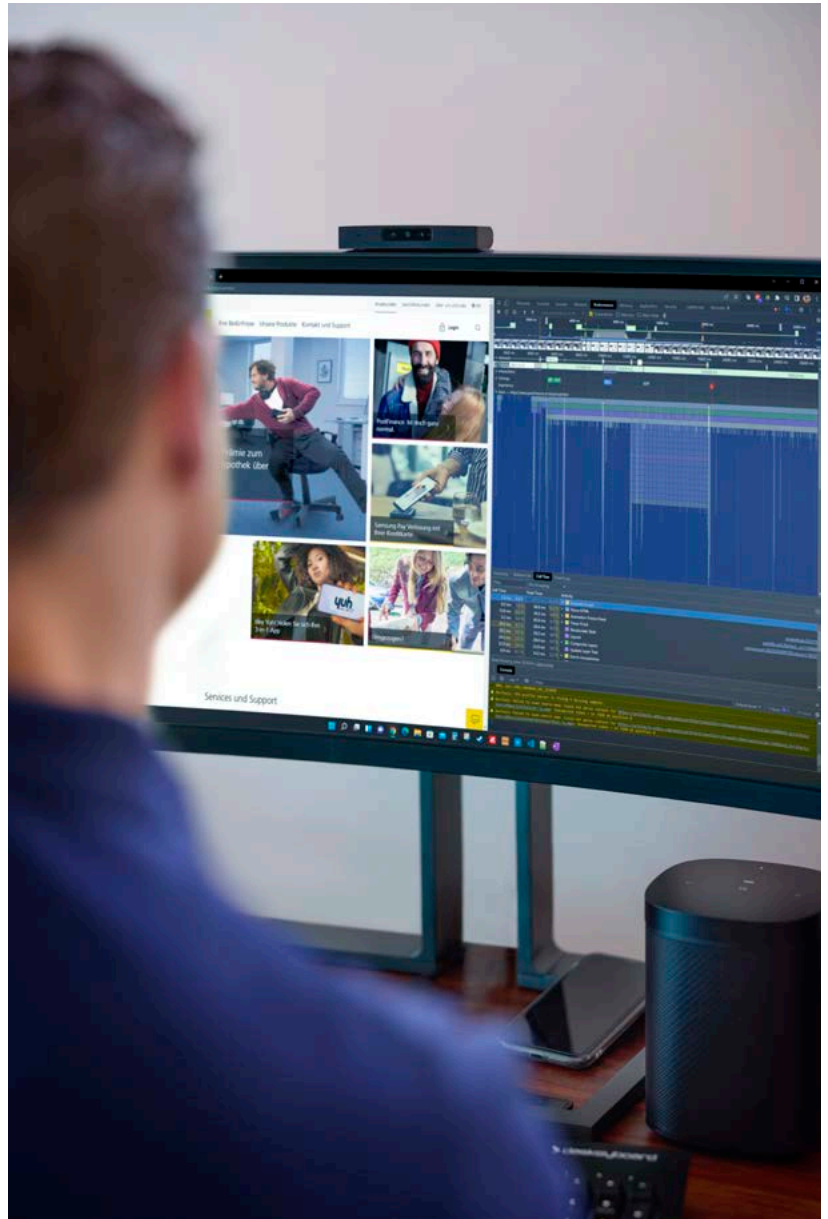
Il a présenté ses résultats lors d'une conférence à Berkeley en Californie, puis envisagé de continuer ses recherches sur la côte ouest des États-Unis. De retour chez lui, il y a toutefois renoncé. «Je venais de tomber amoureux et la femme de mes rêves – qui l'est encore aujourd'hui – préférerait rester en Suisse», raconte-t-il. Il ne voulait pas mettre en péril ce bonheur tout neuf. C'est pourquoi il a accepté l'offre de la firme informatique Supercomputing Systems (SCS) et passé sept ans et demi dans cette entreprise, sise à Zurich, avant de devenir, en 2017, spécialiste en technique de mesure au sein du groupe Kistler, implanté à Winterthur. Chez SCS, il a

travaillé comme développeur de logiciels et, plus tard, comme chef de projet pour divers clients: il a par exemple mis au point un capteur de portail intelligent ou un nouvel instrument pour déterminer les groupes sanguins.

Chez Kistler, il a été responsable du développement des produits et chef de projet software pour les secteurs Routes et trafic, Biomécanique et Effort de coupe. Il s'agissait notamment de mettre en œuvre des capteurs déjà existants. «Nous avons ainsi intégré divers capteurs de force dans un starting-block de sprint et conçu l'électronique de lecture ainsi que le logiciel de lecture et d'analyse», indique-t-il. Le développement du logiciel a eu lieu en Slovaquie. Au début, c'était passionnant. Mais la manière de travailler des ingénieurs software – nouvelle, agile et fort louée à l'époque – a rapidement donné lieu à des problèmes, rendant la planification difficile. Après une première phase de développement, de nouvelles exigences ont été posées et l'architecture du projet a dû s'adapter. «Lorsqu'on commence par un abri de jardin et qu'on essaie, à partir de là, de construire un immeuble, les fondations ne sont tout simplement pas suffisantes», argue-t-il.

Philipp Kraft a continué de se former dans le domaine des logiciels grâce à des cours et à beaucoup de lectures de littérature spécialisée, un savoir qu'il applique maintenant chez Postfinance. Pour contrebalancer ce travail intellectuel, il fait du sport. «Je commence la journée à six heures, avec un entraînement de fitness, avant de me mettre au travail à huit heures.» Avec sa femme, il aime voyager, notamment dans le sud de l'Europe ou, récemment, en Guadeloupe, après avoir été inspiré par la série TV *Meurtres au paradis*, dans laquelle un inspecteur britannique résout des affaires criminelles sous les tropiques. «Les paysages étaient aussi beaux que dans le film.» Il se souvient volontiers du PSI, où il a été marqué par l'environnement international et par ses collègues d'équipe. «J'étais le sauvageon, alors que les autres avaient des familles, mais la cohésion du groupe était là malgré tout. C'était une belle époque!» ♦





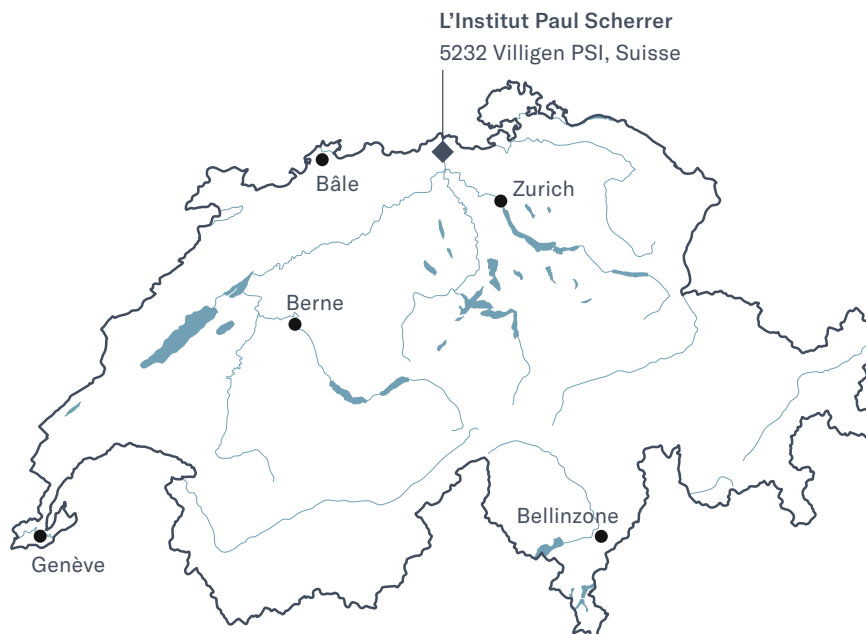
«Sur la base de tests, on m’a déconseillé de faire des études de physique.»

Philipp Kraft, spécialiste en logiciels chez Postfinance

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 342000 mètres carrés, qui possède son propre pont sur l'Aar et qui compte 2200 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 2/2022 (mai 2022)  
ISSN 2571-6891

### **Editeur**

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

### **Rédaction**

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

### **Traduction**

Marie-Jeanne Krill

### **Correction**

Étienne Diemert

### **Design et direction artistique**

Studio HübnerBraun

### **Photos**

Scanderbeg Sauer Photography, sauf:  
Pages 22/23, 25, 26/27: Institut Paul Scherrer / Mahir Dzambegovic;  
Page 38: Institut Paul Scherrer / Markus Fischer.

### **Infographies**

Studio HübnerBraun, sauf:  
Couverture, pages 8–20:  
Manuel Guédes;  
Pages 6/7: Daniela Leitner;  
Page 41: Adobe Stock.

### **Pour en savoir plus sur le PSI**

[www.psi.ch/fr/](http://www.psi.ch/fr/)

**5232 est disponible sur Internet et sur abonnement gratuit**

[www.psi.ch/fr/5232](http://www.psi.ch/fr/5232)

**5232 est également disponible en allemand et en anglais**

[www.psi.ch/de/5232](http://www.psi.ch/de/5232)

[www.psi.ch/en/5232](http://www.psi.ch/en/5232)

PAUL SCHERRER INSTITUT

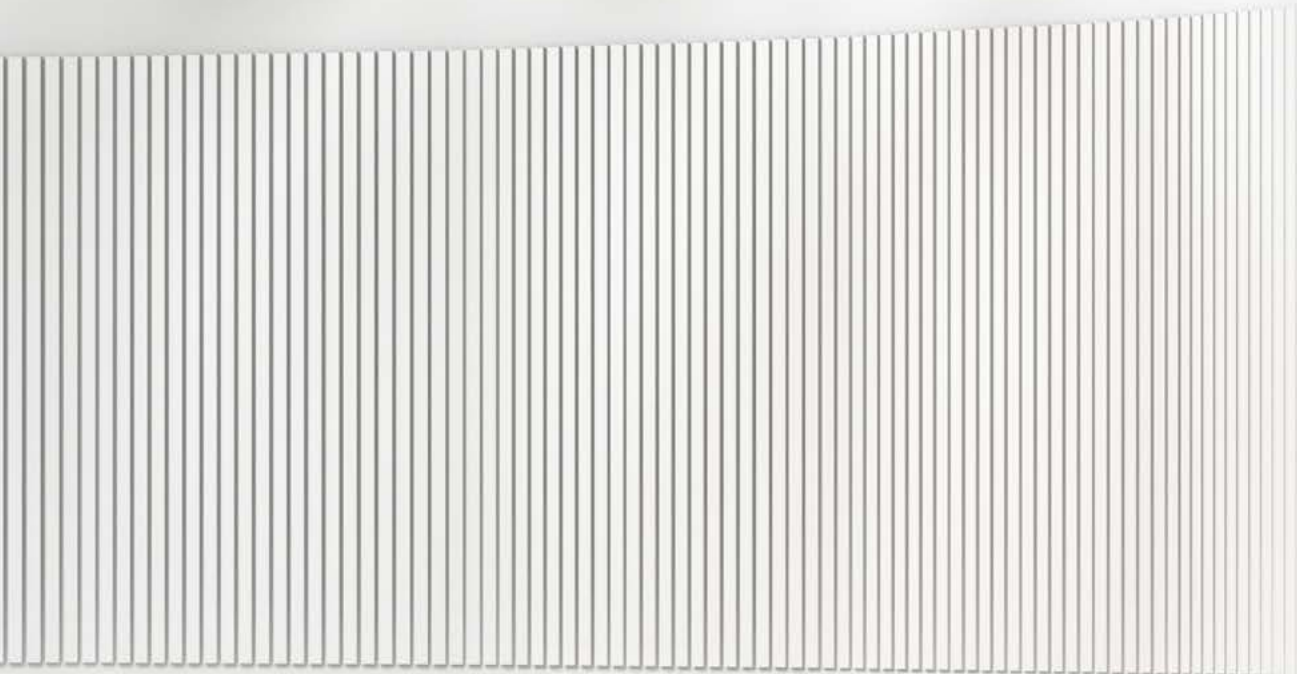






## Ce qui vous attend dans le prochain numéro

Avec la Stratégie énergétique 2050, la Suisse a décidé de sortir progressivement du nucléaire en augmentant l'efficacité énergétique et en développant les énergies renouvelables. Par ailleurs, elle souhaite ne plus émettre de gaz à effet de serre dès 2050. Mais que se passera-t-il en cas de panne technique ou de crise politique ou économique? Sous la houlette de l'Institut Paul Scherrer, des chercheurs et des chercheuses de diverses institutions étudient comment l'approvisionnement énergétique de la Suisse pourrait être garanti dans les décennies à venir, de façon aussi durable et sûre que possible. Dans ce dessein, ils examinent certains événements choisis qui pourraient influencer le système énergétique futur de la Suisse ou comment rendre l'approvisionnement résilient, adaptable et durable.



Paul Scherrer Institut  
Forschungsstrasse 111, 5232 Villigen PSI, Suisse  
[www.psi.ch](http://www.psi.ch) | +41 56 310 21 11

---