

DOSSIER

# L'ÉLECTRONIQUE DU FUTUR

Le magazine de l'Institut Paul Scherrer

01 / 2019

# 2025





## DOSSIER: L'ÉLECTRONIQUE DU FUTUR

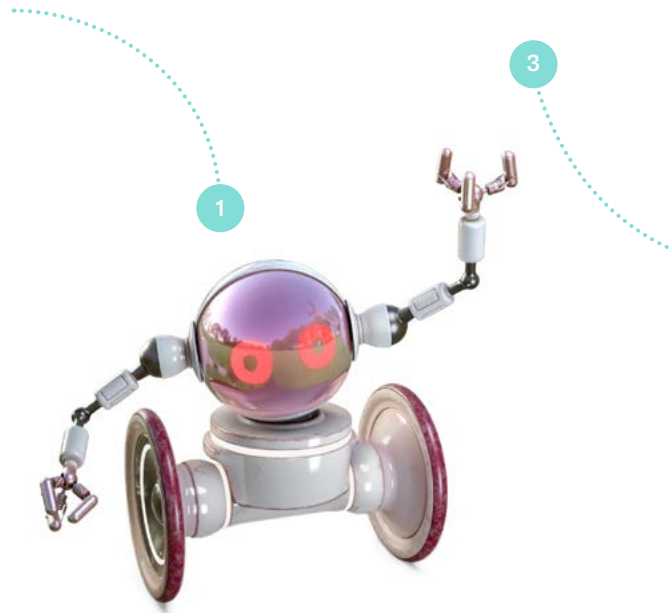


ENTRETIEN

### «Le moment est venu de passer à autre chose»

Gabriel Aeppli et Christian Rüegg analysent des matériaux à l'aide de diverses méthodes. Notamment, en vue de créer les composants électroniques de demain.

Page 10



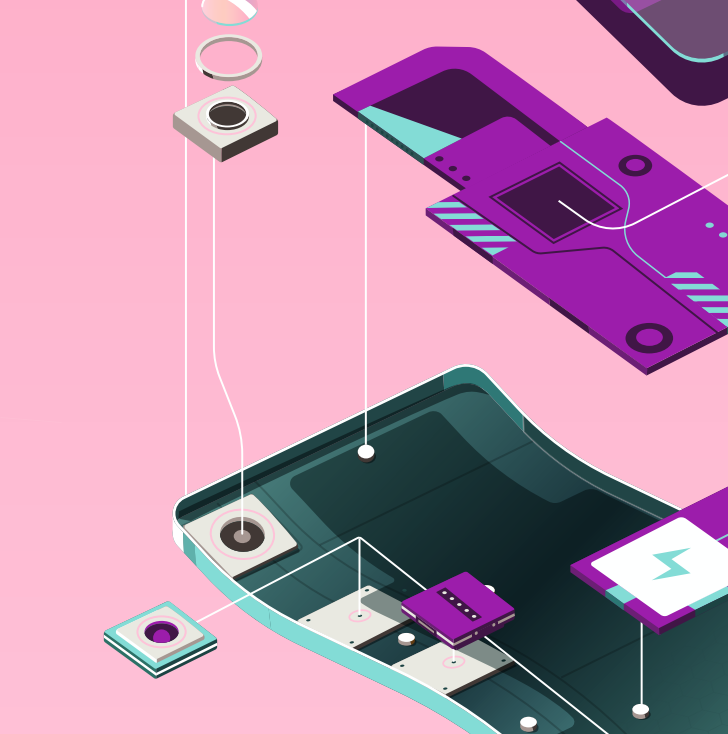
TOILE DE FOND

### Observer les électrons et allumer les bits

L'électronique doit rapetisser, devenir plus rapide et surtout moins énergivore. Le PSI planche aussi sur des solutions. Aperçu de qui travaille sur quoi en ce moment.

Page 14





INFOGRAPHIE

## Le smartphone de demain

Le smartphone illustre à quel point il est nécessaire de disposer de résultats issus de la recherche fondamentale en physique, en chimie, en ingénierie et en sciences des matériaux. Il montre aussi ce que l'avenir nous réserve.

Page 18



CONTENU

QUESTIONS-RÉPONSES

Trois questions à Thierry Strässle 4

LE PRODUIT

Catalyseurs 6

L'AUXILIAIRE

Sac-poubelle 7



DOSSIER:  
L'ÉLECTRONIQUE DU FUTUR 8



ENTRETIEN  
«Le moment est venu de passer à autre chose» 10



TOILE DE FOND  
Observer les électrons et allumer les bits 14



INFOGRAPHIE  
Le smartphone de demain 18

EN IMAGE

Lea Caminada 21

AILLEURS EN SUISSE

Des études à large spectre 22

Qu'est-ce qui peut bien motiver les jeunes gens à choisir la filière d'études *Nuclear Engineering*?

EN BREF

Actualité de la recherche au PSI 26

- 1 100% bio
- 2 Traitement efficace contre le cancer
- 3 Des mémoires informatiques peu énergivores
- 4 Du nouveau sur le «petit âge glaciaire»

GALERIE

Chefs-d'œuvre modernes 28

Ces résultats de recherche feraient bien dans n'importe quel salon.

PORTRAIT

Sa passion, ce sont les enfants 34

Beate Timmermann a mis en place, au PSI, un programme de protonthérapie pour enfants cancéreux.

QUI SOMMES-NOUS?

38

IMPRESSUM

40

DANS LE PROCHAIN NUMÉRO

41



## Trois questions à Thierry Strässle

Pour l'électronique du futur, le mot d'ordre est le même depuis des décennies: elle devra être plus rapide, plus petite et moins énergivore. Or, un changement majeur est sur le point de se produire. Quel rôle le PSI joue-t-il dans ce processus? Les réponses de Thierry Strässle, directeur *ad interim* de l'Institut Paul Scherrer.



**Thierry Strässle, les grands fabricants de smartphones, de processeurs informatiques et de disques durs développent-ils aussi la technologie que leurs appareils abritent?**

1

Oui, mais seulement à partir d'un certain stade. Tout comme pour l'industrie pharmaceutique, il faut qu'en amont quelque chose précède la recherche et le développement qui se font dans les entreprises technologiques, soit la recherche fondamentale. Or, les chercheurs du PSI et d'autres centres de recherche sont très forts dans ce domaine: ils ont, entre autres, la capacité de revenir deux ou trois pas en arrière pour élaborer une meilleure approche, complètement nouvelle. Parfois, cela veut dire mettre en évidence la manière dont les impulsions laser peuvent commuter de minuscules zones magnétiques. Et, parfois, commencer par développer une nouvelle méthode d'analyse ultramoderne, permettant d'observer le flux d'électrons dans un matériau conducteur d'électricité.

**Les principes fondamentaux du smartphone de demain font donc l'objet de recherches au PSI?**

2

Eh bien, c'est ce que nous espérons, naturellement. L'électronique d'aujourd'hui repose, depuis longtemps, sur les mêmes principes: du silicium et des bits de stockage magnétiques. Jusqu'à présent, on s'est attaché à optimiser continuellement ces deux principes, mais là, nous n'allons pas tarder à atteindre une limite naturelle. Nous avons donc besoin d'approches complètement nouvelles. Et nous avons l'espoir justifié qu'un jour les concepts que nous étudions au PSI seront partie intégrante de l'électronique du futur, car nous sommes aux premières loges en matière d'acquisition de nouvelles connaissances sur certains matériaux.

**Ce numéro est donc dédié à un sujet qui illustre bien le mot d'ordre du PSI, *Wir schaffen Wissen – heute für morgen*, selon lequel nous faisons émerger aujourd'hui les connaissances pour demain?**

3

En effet. Et, parfois, cela signifie aussi: nous ferons émerger demain d'autres connaissances pour après-demain! Il y a quelques semaines à peine, Gabriel Aepli, dont on peut lire l'interview en page 10, a décroché un subside de l'UE, à hauteur de 14 millions d'euros, avec trois autres chercheurs. Cette somme, ils la mettront à profit dans les prochaines années pour trouver de nouveaux effets quantiques au sein de certains matériaux et créer de nouveaux matériaux dotés de propriétés quantiques sur mesure. Pour ma part, je partage le point de vue de ces quatre chercheurs: il est fort probable que ce genre de propriétés quantiques forme un jour l'épine dorsale de l'électronique du futur.



Certaines analyses menées au PSI pourraient servir un jour à améliorer des produits du quotidien. Exemple.

## Catalyseurs

Dans les moteurs de voiture, les catalyseurs contribuent à purifier les gaz d'échappement. Mais quand les chercheurs parlent de «catalyseurs», ils désignent de manière générale les matériaux qui agissent comme des intermédiaires chimiques et rendent ainsi certaines réactions chimiques possibles. Les rayons X très intenses disponibles à la Source de Lumière Suisse SLS, au PSI, permettent de tester si certains matériaux ont les qualités requises pour être utilisés comme catalyseurs. Les chercheurs du PSI se servent de la spectroscopie des rayons X pour analyser la structure microscopique de ces matériaux au niveau des atomes et observer en même temps dans quelle mesure cette structure influence l'activité catalytique.

Dans le cas des catalyseurs automobiles, l'un des objectifs est de développer des matériaux dont la structure reste identique, même lorsque le moteur atteint des températures très élevées, de sorte que leur efficacité reste préservée. Des chercheurs s'efforcent aussi d'identifier des possibilités pour se passer de certains éléments coûteux utilisés jusqu'ici, comme le platine. Bref, il se pourrait que, grâce au PSI, l'on dispose un jour de catalyseurs automobiles plus performants et meilleur marché.

La recherche de pointe recourt parfois à des auxiliaires étonnamment ordinaires. Exemple.

## Sac-poubelle

La Source de Lumière Suisse SLS est une grande installation de recherche qui fournit des rayons X de haute intensité en vue de conduire des analyses. La lumière de type rayons X passe par des tubes sous vide, avant d'arriver aux tables d'expérimentation. Or, en raison du dispositif expérimental, il n'est pas toujours possible de placer l'objet à étudier directement à la sortie du tube sous vide. Dans ce cas, le faisceau de rayons X devrait faire un court trajet dans l'air, mais le contact avec les molécules d'air l'affaiblirait.

Pour pallier le problème, les chercheurs du PSI prennent un grand sac-poubelle légèrement translucide, qu'ils remplissent d'hélium. Les atomes de ce gaz sont si petits qu'ils n'affaiblissent quasiment pas les rayons X. Les chercheurs fixent, avec du ruban adhésif, ce ballon d'hélium «fait maison» à la table d'expérimentation, où il occupe la zone d'air que les rayons X doivent traverser. La perte de rayons X qui se produit à l'entrée et à la sortie, lorsqu'ils franchissent les parois du sac plastique, est négligeable, comparée à l'avantage de l'hélium.

L'intensité du faisceau de rayons X est ainsi conservée de manière optimale pour étudier, entre autres, des matériaux catalytiques.







Hans Sigg, Jonathan White et Marisa Medarde (de gauche à droite)

2

TOILE DE FOND

Observer les électrons  
et allumer les bits

Page 14

1

ENTRETIEN

«Le moment est venu  
de passer à autre chose»

Page 10

3

INFOGRAPHIE

Le smartphone  
de demain

Page 18







# L'électronique du futur

DOSSIER

Les appareils électroniques compacts, du type smartphones et tablettes, nous accompagnent au quotidien depuis belle lurette. Il existe de grandes idées futuristes de voitures autonomes, d'intelligence artificielle et de téléphone holographique. Mais la recherche fondamentale qui se fait aujourd'hui dans cette direction se joue à l'échelle de l'infiniment petit: celle des électrons et des nanostructures. C'est à ce niveau que des chercheurs travaillent dans le monde entier, notamment au PSI.



# «Le moment est venu de passer à autre chose»

Si l'on réduit le format des composants électroniques, malheureusement, ils chauffent. En termes de miniaturisation, la limite du techniquement faisable sera aussi bientôt atteinte. Au PSI, Gabriel Aeppli et Christian Rüegg travaillent à de nouvelles solutions physiques pour améliorer les performances des mémoires de données et des ordinateurs.

Propos recueillis par: Barbara Vonarburg

**Gabriel Aeppli, Christian Rüegg, quel est, selon vous, le plus grand défi dans le développement de l'électronique?**

**Gabriel Aeppli:** La consommation d'énergie représente l'un des plus gros problèmes. Aujourd'hui, le traitement électronique des données et l'infrastructure de communication nécessitent davantage d'énergie que le trafic aérien. Si nous continuons comme cela, dans dix ou quinze ans, la moitié de la consommation totale d'énergie sera due au secteur des technologies de l'information.

**Christian Rüegg:** D'un côté, c'est un problème de société et, de l'autre, un problème technique. Cette consommation d'énergie génère en effet beaucoup de chaleur d'échappement. Et plus les choses qu'on construit sont petites, plus elles chauffent. Ce sont les lois de la thermodynamique, autrement dit de la physique fondamentale.

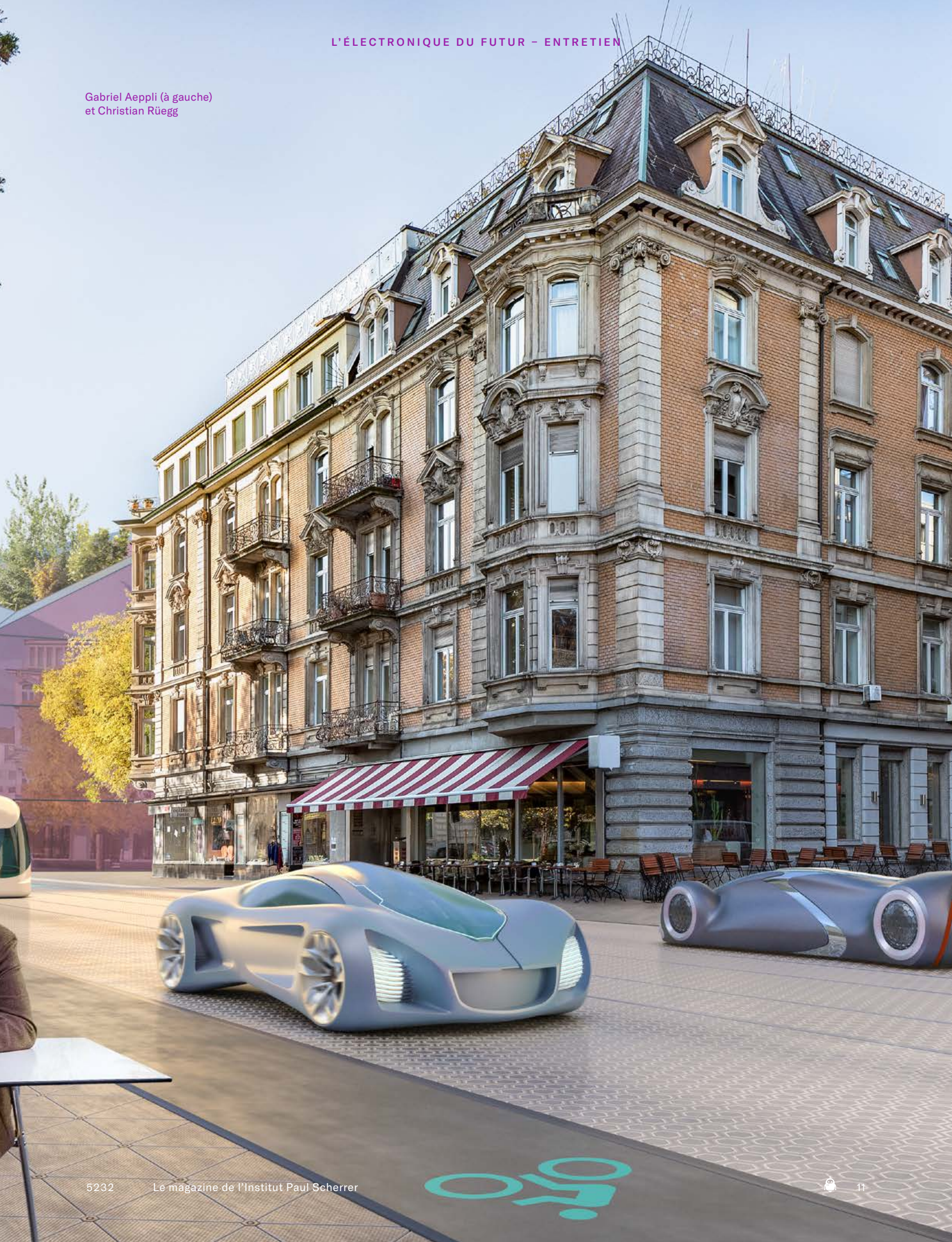
**Gabriel Aeppli:** Il y a deux autres problèmes: il est désormais impossible d'augmenter la rapidité de la base, c'est-à-dire des différents commutateurs électroniques. Et, comme tout est si complexe, des problèmes de sécurité et de fiabilité peuvent survenir.

**Christian Rüegg:** Dans le cas de l'utilisation de l'intelligence artificielle et des voitures autonomes, cette fiabilité peut être décisive. Si votre ordinateur,





Gabriel Aeppli (à gauche)  
et Christian Rüegg







## «Jusque-là, il fallait résoudre les problèmes par la technique; notre objectif est de trouver à la place une solution intelligente d'ordre physique.»

Christian Rüegg, responsable de la division Recherche avec neutrons et muons, PSI

à la maison, plante et doit être redémarré, c'est seulement agaçant. Sur l'autoroute à 120 kilomètres-heure, le problème est tout autre.

**Gabriel Aeppli:** Le risque commercial représente encore un autre défi. Aujourd'hui, construire une nouvelle usine de puces électroniques coûte déjà entre 10 et 20 milliards de dollars, et ce prix va continuer à augmenter.

### Les problèmes semblent énormes et nombreux.

**Gabriel Aeppli:** C'est pour ça que nous sommes là! Et c'est parce que les défis sont si importants que la chose est intéressante. Pendant les quarante dernières années, nous étions comme sur une autoroute. On a toujours exploité la même idée pour miniaturiser de plus en plus les composants électroniques.

**Christian Rüegg:** L'électronique d'aujourd'hui se fonde sur des transistors qui agissent comme des interrupteurs, avec lesquels on commute de 0 à 1. Or, on pourrait se servir d'autres processus qui permettraient de réduire la complexité parce que leurs parties elles-mêmes seraient plus complexes. Jusque-là, il fallait résoudre les problèmes par la technique; notre objectif est de trouver à la place une solution intelligente d'ordre physique.

**Gabriel Aeppli:** Le moment est vraiment venu de passer à autre chose!

### Comment se présente cette nouvelle solution intelligente?

**Christian Rüegg:** Il y a deux domaines différents: d'un côté, le calcul et, de l'autre, le stockage des données. Pour chacun, il existe une solution propre. Pour le stockage des données, on cherche de nouveaux matériaux. L'idée est de se servir de supermatériaux exotiques, dotés de certaines propriétés magnétiques, pour stocker des données à plus grande vitesse et moyennant moins d'énergie. Au PSI, nous étudions quels sont les matériaux susceptibles d'entrer en ligne de compte.

Pour le calcul, une chose est claire: en ce qui concerne l'unité que l'on utilisera à l'avenir, il faudra trouver autre chose que le transistor 0-1 utilisé jusqu'ici; cette unité devra présenter plusieurs états. La solution, à mes yeux, c'est la construction d'un ordinateur entièrement nouveau, fondé sur les principes de la mécanique quantique. De nombreuses initiatives dans ce sens existent dans le monde. Au PSI, nous contribuons à cette recherche.

**Gabriel Aeppli:** Comme nous l'avons dit, les bits classiques, c'est soit 0, soit 1. Les bits quantiques, appelés aussi «qubits», sont composés d'une superposition d'états qui sont à la fois 0 et 1. Les états quantiques ont une densité d'information beaucoup plus importante et permettent en principe un calcul parallèle naturel. Or, celui-ci est beaucoup plus rapide que le calcul parallèle classique, aujourd'hui atteint dans les processeurs de PC par le biais d'une architecture multicœur. C'est elle qui vous permet, par exemple, d'avoir plusieurs onglets ouverts en même temps dans votre navigateur.

**Des entreprises comme IBM et Google disposent déjà de prototypes d'ordinateurs quantiques, fondés sur le phénomène de la supraconductivité. D'autres approches s'appuient sur la physique des lasers et sur la physique atomique. Sera-t-il un jour possible de construire un ordinateur quantique maniable, qui remplacera nos ordinateurs conventionnels avec leurs puces en silicium?**

**Gabriel Aeppli:** Dans un laboratoire de physique atomique, c'est un peu comme à Noël avec de nombreux lasers, très précisément réglés. Pour l'heure, les dimensions sont grandes et peu pratiques. Pour les machines supraconductrices aussi, les qubits sont relativement grands, notamment si l'on considère que la congélation est nécessaire.

Dans ma recherche, le silicium reste la base. Si l'on veut intégrer la physique quantique dans un appareil



robuste, on est obligé de recourir au silicium. Ce dernier reste en effet un matériau idéal, dans lequel on a déjà investi beaucoup de recherche. Et il s'y prête aussi, car, même si le silicium est un solide, il se comporte à certains égards comme un vide incroyablement propre. Nous exploitons cette propriété en utilisant le silicium pour piéger certains atomes. Or, de tels pièges à atomes sont à la base des qubits.

#### Où en êtes-vous dans le développement d'un ordinateur quantique à base de silicium?

**Gabriel Aeppli:** Ici, au PSI, nous nous penchons sur la physique fondamentale. Nos collègues de l'université de technologie de Delft aux Pays-Bas et de l'université de Nouvelle-Galles du Sud en Australie ont déjà réalisé de petits commutateurs quantiques fondés sur ce principe. D'autres chercheurs, à l'ETH Zurich par exemple, travaillent en parallèle sur une autre technologie, fondée sur la supraconductivité. Pour notre part, nous considérons que le silicium représente le passé, mais qu'il pourrait aussi incarner l'avenir.

#### Dans dix ou vingt ans, nos smartphones abriteront-ils un ordinateur quantique?

**Gabriel Aeppli:** Je pense qu'il y aura des coprocesseurs quantiques qui résoudront au moins certaines tâches. Nos smartphones n'abriteront pas d'ordinateur quantique au complet, mais ils exploiteront des propriétés quantiques pour résoudre le problème de l'énergie, par exemple. Ici, au PSI, nous menons notamment des expériences pour mieux comprendre le comportement des électrons dans les puces informatiques. Ce comportement est en effet responsable de toutes les propriétés électroniques et donc aussi de la commutation des bits, qu'elle s'opère de manière classique ou par mécanique quantique. Avec la Source de Lumière Suisse SLS, nous commençons maintenant à scruter directement les électrons à l'intérieur de fines couches de matériaux. Bientôt, nous pourrons aussi le faire avec le nouveau laser à rayons X SwissFEL.

**Christian Rüegg:** En termes de physique et de démarche, la technologie quantique est tout à fait passionnante, mais il faudra encore franchir beaucoup d'étapes. En tant que scientifiques, nous contrôlons déjà certaines d'entre elles, mais il y en a d'autres – comme les facteurs économiques – que nous ne maîtrisons pas. D'où l'importance de l'intérêt de l'industrie.

#### Comment se présente la collaboration entre le PSI et l'industrie?

**Gabriel Aeppli:** Nous profitons du fait que la physique revêt actuellement une soudaine importance et qu'une nouvelle génération de recherche fondamentale doit être lancée. Pendant longtemps, les entreprises se sont surtout occupées des systèmes et des logiciels. A présent, des sociétés comme Microsoft et Google investissent dans le matériel et, en plus de collaborer avec des instituts de recherche, elles exploitent la recherche fondamentale dans leurs propres laboratoires, parce que les problèmes actuels ne peuvent plus être résolus par du logiciel.

#### Et comment se passe exactement votre collaboration avec l'industrie?

**Christian Rüegg:** Nous avons des projets de recherche communs, mais aussi de la recherche sous contrat, dans le cadre de laquelle les partenaires de l'industrie conduisent des expériences avec nos installations et paient pour pouvoir le faire.

**Gabriel Aeppli:** Certains projets sont tellement appliqués que nous n'avons même pas le droit d'en parler.

#### Comment les chercheurs du PSI vivent-ils ce secret?

**Christian Rüegg:** Ah, dans notre propre recherche, c'est très similaire: quand on a une idée formidable, il y a de la concurrence et des ententes. En Suisse, il y a des gens qui travaillent à l'avènement du numérique; au PSI, nous travaillons déjà à l'avènement du numérique 2.0. ◆

**Gabriel Aeppli** est responsable de la division de recherche Sciences photoniques au PSI et professeur de physique à l'ETH Zurich et à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne EPFL. Il est né en 1956 à Zurich, a grandi aux Etats-Unis et a fait son doctorat en électrotechnique au Massachusetts Institute of Technology (MIT). Ce binational suisse-nord-américain a effectué une grande partie de sa carrière dans l'industrie, avant d'être nommé à une chaire à Londres et d'y fonder, avec d'autres, un centre de nanotechnologie. Il est revenu en Suisse en 2014.

**Christian Rüegg** est responsable de la division Recherche avec neutrons et muons au PSI et professeur à l'université de Genève. Il a fréquenté le gymnase à Aarau, fait des études de physique à l'ETH Zurich, avant de travailler pendant six ans au London Centre for Nanotechnology, dirigé à l'époque par Gabriel Aeppli. Christian Rüegg est de retour en Argovie depuis 2011. Sa recherche actuelle sur le magnétisme quantique bénéficie du soutien du Conseil européen de la recherche.



# Observer les électrons et allumer les bits

L'électronique doit rapetisser, devenir plus rapide et surtout moins énergivore. Au PSI, plusieurs groupes de recherche se penchent aussi sur ces thématiques. Des améliorations graduelles à la réorientation totale: voici un aperçu de qui travaille sur quoi en ce moment.

Texte: Barbara Vonarburg

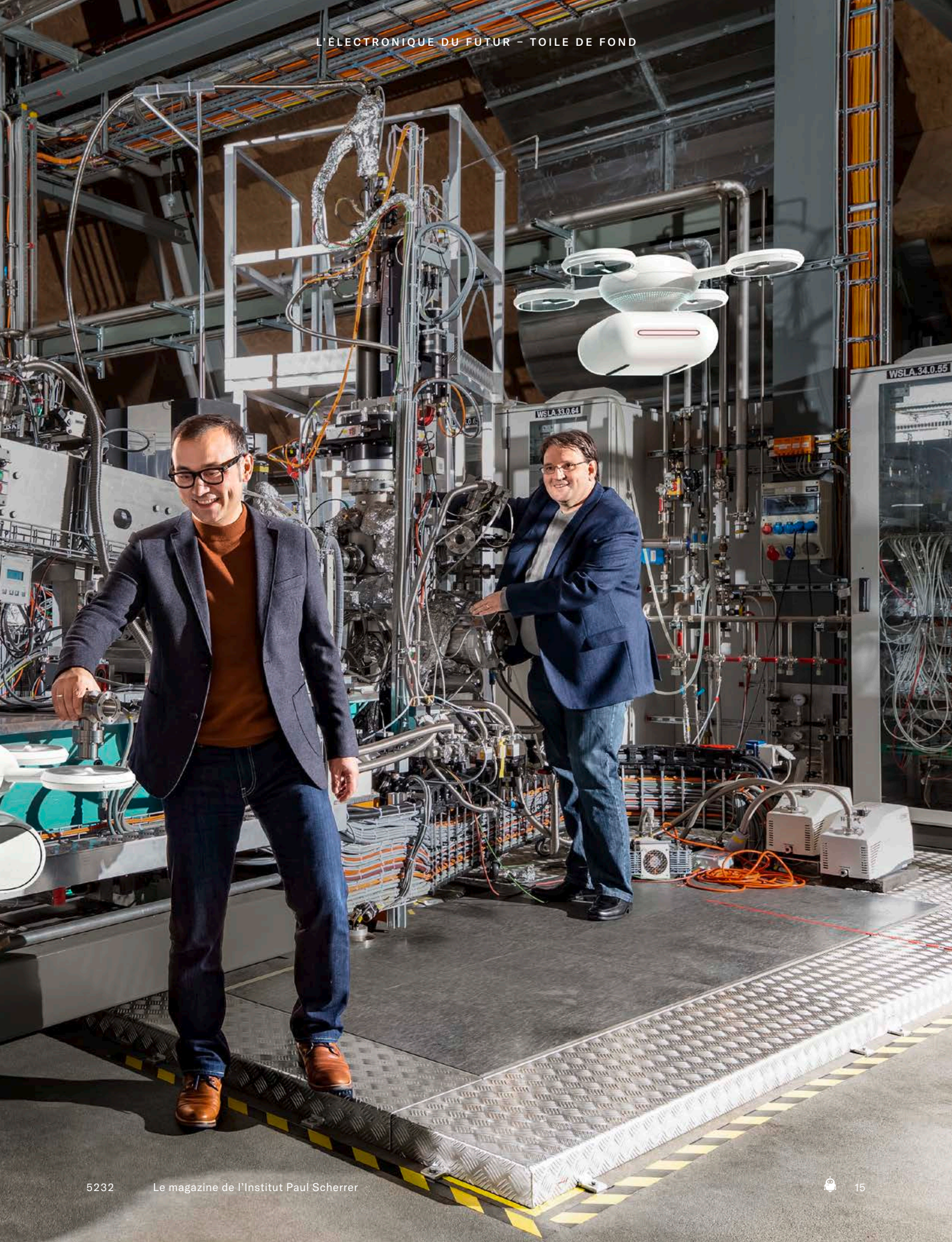
Yasin Ekinci tient une plaquette de silicium dans la main. Le chef *ad interim* du Laboratoire de micro- et de nanotechnologie du PSI détaille très clairement les étapes nécessaires pour la transformer en puces informatiques. Depuis soixante ans, les fabricants recourent pour ce faire à un procédé appelé photolithographie. «Cela revient à utiliser de la lumière pour écrire dans la pierre, traduit Yasin Ekinci. La pierre est une plaquette de silicium et, pour écrire dessus, on se sert du rayonnement ultraviolet.» Si l'on veut fabriquer des puces avec toujours plus de circuits et de transistors, il faut écrire toujours plus petit. Ce qui n'est possible qu'en utilisant de la lumière avec une longueur d'onde encore plus courte.

Depuis quinze ans, le standard est un rayonnement ultraviolet d'une longueur d'onde de 193 nanomètres – 1 nanomètre est un milliardième de millimètre. Or, un changement dans la fabrication des puces est sur le point d'advenir avec le passage à une lumière dans l'extrême ultraviolet (EUV) de seulement 13,5 nanomètres. «Cela nécessite une technologie complètement nouvelle, au développement de laquelle nous contribuons», poursuit Yasin Ekinci. Pour bien se faire comprendre, l'expert reprend au début:



Yasin Ekinci (à gauche)  
et Thorsten Schmitt



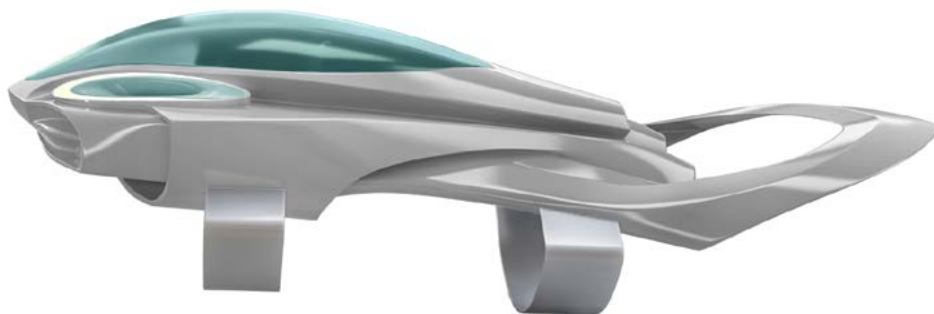








C-3PSI, Frithjof Nolting et Ekaterina Pomjakushina (de gauche à droite)



«Pour fabriquer des puces, on enduit le silicium d'une résine photosensible, sur laquelle on projette les circuits et les transistors au moyen du rayonnement UV. Puis on développe cette couche photosensible comme une photographie à l'ancienne.»

#### Yasin Ekinci: une nouvelle résine pour des structures plus petites

Pour produire des structures encore plus petites avec de la lumière dans l'EUV, il faut une nouvelle résine photosensible. «Les entreprises qui les développent viennent nous trouver, au PSI, pour tester leur produit potentiel et donc écrire dans leur résine avec de la lumière EUV de la Source de Lumière Suisse SLS», raconte Yasin Ekinci, avant d'ajouter avec fierté: «La structure la plus petite réalisée à ce jour par photolithographie a été faite au PSI.» L'équipe de Yasin Ekinci détient donc un record du monde: un schéma régulier de lignes parallèles d'une largeur de 7 nanomètres seulement, produit avec la lumière EUV à la SLS. Cela correspond à un agencement des composants 16 fois plus dense que celui des puces informatiques actuelles. Les premières puces fabriquées au moyen de lumière EUV devraient être commercialisées en 2019 ou en 2020.

La lithographie EUV devrait permettre de maintenir la loi dite de Moore, énoncée dans les années 1960, selon laquelle la densité de stockage et la puissance de calcul doublent chaque année ou tous les deux ans dans le secteur informatique.

Mais les spécialistes sont persuadés qu'à long terme poursuivre sur la voie de la miniaturisation ne suffira pas.

#### Hans Sigg: le laser sur la puce

«Des approches originales sont nécessaires», estime donc Rolf Allenspach, manager au laboratoire de recherche IBM de Rüschlikon (ZH). Par ailleurs, rappelle-

t-il, dans le cas des puces pour téléphones et ordinateurs portables, la priorité numéro 1 n'est plus la performance mais l'efficacité énergétique. «Ce changement de paradigme a transformé le développement des puces», assure ce chercheur d'IBM qui collabore régulièrement avec des chercheurs du PSI. Rolf Allenspach souligne encore: «Le PSI est indispensable. La Suisse, en tant que lieu de recherche, profite beaucoup des grandes installations de recherche que le PSI abrite et de sa culture high-tech, qui attire des personnes remarquablement formées.»

Hans Sigg, responsable au PSI du groupe de recherche de technologie quantique, exploite une idée destinée à accélérer la communication au sein d'une puce: «Nous voulons intégrer de minuscules lasers sur la puce, explique-t-il. Cela permettrait à l'électronique de fonctionner de manière encore plus efficace, car la lumière est aussi capable de transmettre des données. Elle est rapide, et les faisceaux peuvent se croiser. Une structure plus compacte des éléments sur la puce devient alors possible.» Aujourd'hui, les réseaux de fibre optique acheminent des signaux lumineux sur de longues distances et pratiquement sans perte. Mais l'intégration de la lumière dans la puce n'a pas encore réussi. «Nous essayons, entre autres, avec du germanium sous contrainte de traction», détaille Hans Sigg. Le fait d'étirer le germanium permet en effet de lui faire émettre de la lumière. Mais, pour l'instant, cela fonctionne uniquement à basses températures. «Nous ne savons pas encore si nous réussirons, reconnaît Hans Sigg. Mais c'est le propre de la recherche!»

#### Thorsten Schmitt: des flux d'électrons

Thorsten Schmitt voit les choses de la même manière: «C'est seulement en travaillant sur des questions fondamentales que nous pourrons faire de nouvelles découvertes», explique le responsable du groupe de recherche Spectroscopie des matériaux novateurs au PSI. Il se tient dans une zone d'expérimentation du



bâtiment circulaire de la SLS, où le faisceau de rayons X aboutit à deux stations: l'une dans un instrument complexe de cinq mètres de long et l'autre dans un grand hémisphère. Grâce à ce dispositif, les chercheurs ont montré qu'il était possible d'améliorer un composant en nitrure de gallium déjà utilisé dans les smartphones. L'installation permet en effet de scruter l'intérieur des matériaux et de visualiser le flux d'électrons, autrement dit de mener des expériences sur un «transistor vivant». Le domaine de spécialité de Thorsten Schmitt, ce sont les matériaux exotiques que l'on peut commuter entre deux états: celui d'isolant et celui de métal conducteur d'électricité. Ils sont composés d'atomes de métal bien particuliers et d'oxygène. «Ces nitrures de métaux de transition sont de bons candidats à la fabrication de transistors vraiment fiables», relève encore le chercheur.

### Ekaterina Pomjakushina: sans masse à travers de nouveaux matériaux

Pour leurs analyses, les chercheurs ont besoin d'échantillons de métaux de la meilleure qualité. Avec son équipe, Ekaterina Pomjakushina cultive des cristaux parfaits. La responsable du groupe de recherche Chimie des solides au PSI nous ouvre la porte de son laboratoire: «Voilà notre monstre», dit-elle en riant et en désignant le four spécial d'un blanc immaculé. L'intérieur en est revêtu de miroirs parfaitement propres. «Le four travaille par recours à l'optique», explique la chercheuse. Ses miroirs concentrent la lumière d'une lampe au xénon pour atteindre une température de 3000 °C. C'est ici que croissent des cristaux à partir de matériaux de différentes origines, préalablement assemblés dans des fours plus petits. La tâche requiert des connaissances en chimie, mais aussi beaucoup de doigté. «C'est comme en cuisine, explique la scientifique. Pour préparer une soupe compliquée, il faut ajouter les ingrédients dans le bon ordre et les assaisonner des bonnes épices en fin de cuisson. C'est seulement au terme de ce processus qu'on obtient un merveilleux résultat.»

Ce qui enthousiasme les chercheurs semble a priori insignifiant: un mince bâtonnet de quelques centimètres et d'un noir terne. «Voilà à quoi ressemblent la plupart des cristaux que nous cultivons en raison de leurs intéressantes propriétés électroniques et magnétiques», enchaîne Ekaterina Pomjakushina. Parmi ces matériaux figure aussi celui qu'étudie Pascal Pupal, son collaborateur: il s'agit de ce qu'on appelle un «semi-métal de Weyl». «Dans ce matériau, les électrons se comportent comme s'ils n'avaient pas de masse, autrement dit comme de la lumière», précise le chercheur. Cette propriété serait idéale pour des transistors rapides. Mais, comme le sait le physicien, «nous sommes encore très loin d'une application».

# Le smartphone de demain

Nos téléphones portables abritent déjà de nombreux résultats issus de la recherche fondamentale en physique, en chimie, en ingénierie et en sciences des matériaux. On peut tout au plus deviner l'allure qu'aura le smartphone du futur. Quant à la recherche, elle tourne à plein régime – dans le monde entier comme au PSI.

## MÉMOIRE DE DONNÉES

La mémoire flash abrite déjà de la physique quantique: grâce à l'effet tunnel, les électrons peuvent passer la barrière de l'isolant, ce qui devrait être impossible selon la physique classique. Au PSI, les chercheurs s'efforcent de mettre la main sur de nouveaux matériaux pour des mémoires plus durables, rapides, petites et performantes sur le plan énergétique.

## CAPTEURS

Un nouveau matériau laser infrarouge, que les chercheurs du PSI développent en ce moment, pourrait être utile pour fabriquer des puces informatiques, mais aussi des capteurs bon marché. Intégrés dans un smartphone, ceux-ci permettraient de mesurer la composition de l'air ou de doter le téléphone portable d'une vision nocturne.

## BOÎTIER

La plupart des dégâts subis par les smartphones sont dus à une chute de l'appareil sur le sol. Pour rendre les téléphones portables incassables, on pourrait se servir de plastique ou de graphène autoréparateur. Le carbone bidimensionnel est considéré comme un matériau miracle. Il est flexible, transparent et cent fois plus solide que l'acier.



## APPAREIL PHOTO

Les téléphones portables sont équipés de toujours plus de lentilles photographiques, elles-mêmes toujours plus performantes. Mais c'est l'application appareil photo – grâce à l'intelligence artificielle – qui réalisera la prise de vue parfaite. Elle identifie le motif et choisit automatiquement le bon réglage. Rendre les smartphones encore plus intelligents nécessitera l'avènement de processeurs encore meilleurs.

## ÉCRAN

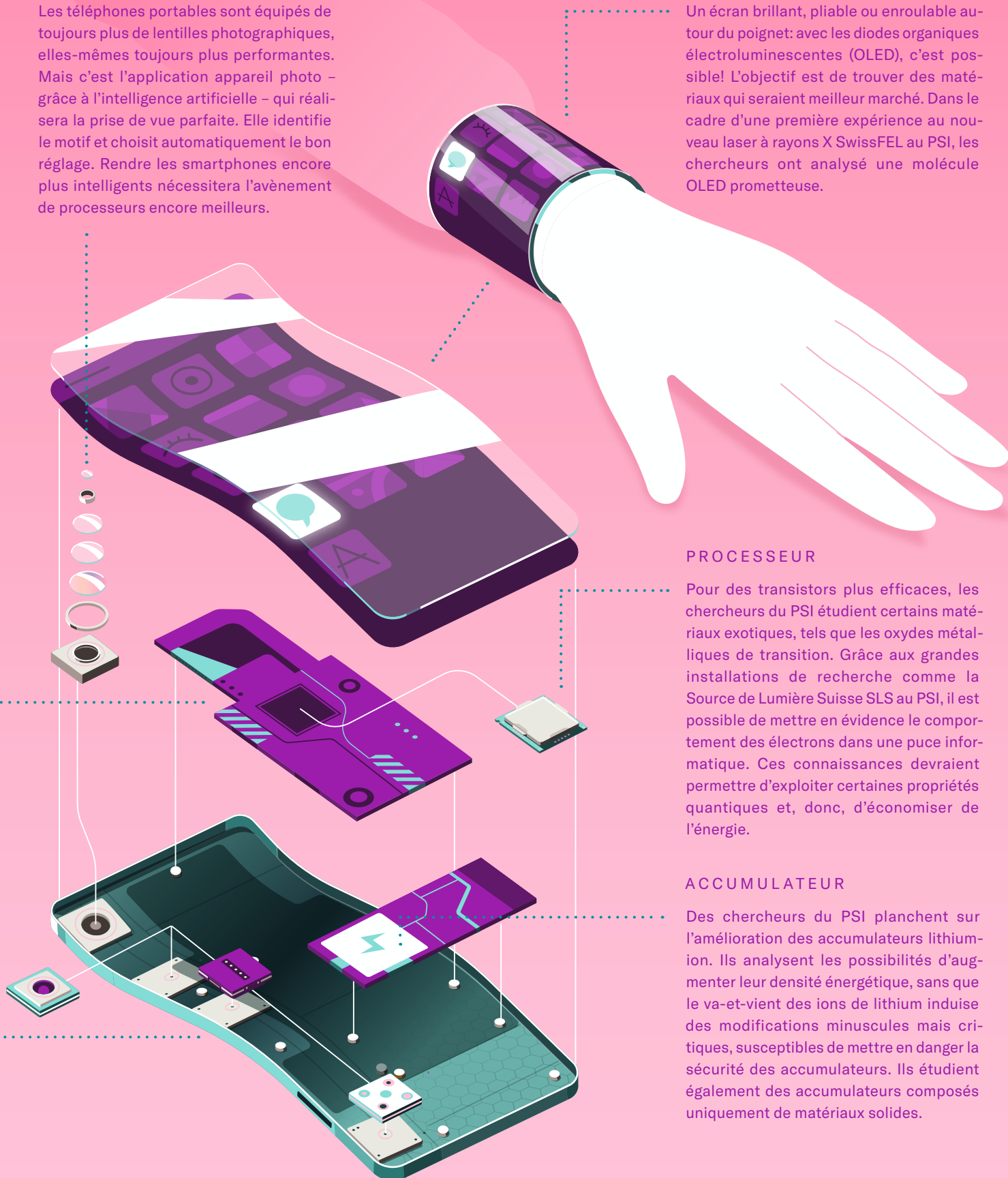
Un écran brillant, pliable ou enroulable autour du poignet: avec les diodes organiques électroluminescentes (OLED), c'est possible! L'objectif est de trouver des matériaux qui seraient meilleur marché. Dans le cadre d'une première expérience au nouveau laser à rayons X SwissFEL au PSI, les chercheurs ont analysé une molécule OLED prometteuse.

## PROCESSEUR

Pour des transistors plus efficaces, les chercheurs du PSI étudient certains matériaux exotiques, tels que les oxydes métalliques de transition. Grâce aux grandes installations de recherche comme la Source de Lumière Suisse SLS au PSI, il est possible de mettre en évidence le comportement des électrons dans une puce informatique. Ces connaissances devraient permettre d'exploiter certaines propriétés quantiques et, donc, d'économiser de l'énergie.

## ACCUMULATEUR

Des chercheurs du PSI plangent sur l'amélioration des accumulateurs lithium-ion. Ils analysent les possibilités d'augmenter leur densité énergétique, sans que le va-et-vient des ions de lithium induise des modifications minuscules mais critiques, susceptibles de mettre en danger la sécurité des accumulateurs. Ils étudient également des accumulateurs composés uniquement de matériaux solides.







«Le PSI est indispensable. La Suisse, en tant que lieu de recherche, profite beaucoup des grandes installations de recherche qu’il abrite et de sa culture high-tech.»

Rolf Allenspach, manager du laboratoire de recherche IBM à Rüschlikon

D’autres analyses sont prévues à la source de neutrons SINQ du PSI afin de mieux comprendre les processus physiques en cause.

#### Jonathan White: les skyrmions, bits du futur

A l’état naturel, les neutrons sont présents dans les noyaux atomiques. A la SINQ, on les arrache à du plomb, puis on les freine et on les braque sur des échantillons. «Les neutrons sont idéaux pour étudier le magnétisme», explique Christof Niedermayer, le responsable de groupe au Laboratoire de diffusion neutronique et d’imagerie. A l’avenir, on aura également besoin de disques durs magnétiques, notamment pour stocker d’importantes quantités de données. Dans ces supports, les informations sont enregistrées sous forme de série de domaines, dont la magnétisation pointe dans une direction ou dans la direction opposée, soit une série de 0 et de 1.

Or, il se pourrait que de minuscules tourbillons magnétiques, appelés skyrmions, assurent un jour le rôle de ces bits de stockage. Jonathan White, chercheur au PSI qui travaille d’arrache-pied sur ces petites structures, raconte que l’industrie a récemment signalé son intérêt pour le sujet lors d’un congrès. Pour l’heure, Jonathan White cherche à mettre la main sur un matériau qui permettrait de réaliser, à température ambiante, des skyrmions bien plus petits que ceux réalisés jusque-là.

#### Marisa Medarde: stocker grâce aux propriétés couplées

Autre mot magique d’aujourd’hui: multiferroïque. Marisa Medarde, responsable au PSI du groupe de recherche Propriétés physiques des matériaux, étudie des composés particuliers dont les propriétés magnétiques et électriques sont couplées les unes aux autres. Les multiferroïques pourraient donc stocker facilement des données par le biais d’une tension électrique. Ce serait plus rapide et moins énergivore que les têtes de lecture-écriture magnétiques utilisées actuellement.

#### Frithjof Nolting: allumer des bits avec de la lumière laser

Ou bien on utilise de la lumière laser aux mêmes fins. «Nous avons découvert qu’il était aussi possible de commuter les bits magnétiques avec une impulsion laser», relève Frithjof Nolting, chef du Laboratoire de matière condensée au PSI. L’avantage qui en découlerait serait, là aussi, un stockage plus rapide moyennant moins d’énergie. Pour l’instant, Frithjof Nolting et son groupe de recherche s’efforcent de confirmer ou d’infirmes certaines prédictions théoriques. «Quand j’ai commencé à m’intéresser au magnétisme, je voulais juste faire de la recherche fondamentale et comprendre ce qui se passait à cette petite échelle magnétique, raconte ce spécialiste des nanosciences. Mais il se pourrait bien que notre recherche contribue à améliorer encore les disques durs.» ♦





## Lea Caminada

Lea Caminada contribue aux nouveaux éléments de connaissance sur la structure de la matière. Cette spécialiste de la physique des particules, qui vient de recevoir un subside Eccellenza Professorial Fellowship du Fonds national suisse, travaille à améliorer l'un des détecteurs de l'accélérateur de particules du CERN, le LHC. Le détecteur en question enregistre en 40 millions d'images par seconde ce qui se produit lorsque des particules entrent en collision. Ces connaissances serviront de fondements aux futurs modèles explicatifs de la physique.





2m  
Laser

VORSICHT AU

Conde

OPTILI

Wenn Warnlichte  
Laser in Betrieb  
das Betreten der Anlage  
VERBODEN!



# Des études à large spectre

L'énergie nucléaire a certainement connu des temps plus fastes. Rares sont les sujets qui polarisent autant l'opinion publique. Dans ces conditions, qu'est-ce qui peut bien motiver les jeunes gens à choisir la filière *Nuclear Engineering*?

Texte: Dominique Simonnot





Au mois d'octobre démarre un nouveau semestre de la filière Master en *Nuclear Engineering*. Officiellement, les étudiantes et les étudiants sont encore en vacances. C'est le moment idéal pour discuter avec eux autour d'un café. Et, sans doute aussi, la seule occasion de les rencontrer tous ensemble au même endroit. Car ce cursus d'études est l'un des rares Joint Degree de Suisse: les cours sont dispensés sur trois sites, en collaboration avec l'EPFL, l'ETH Zurich et le PSI. Les étudiants effectuent le premier semestre à Lausanne, où le cursus est rattaché au département de physique. Pour le deuxième, ils sont à Zurich au département de génie mécanique, alors que le troisième semestre se passe à la division de recherche Energie nucléaire et sûreté du PSI. A l'instar des particules nucléaires, les étudiants sont donc constamment en mouvement. Deux d'entre eux ont trouvé le temps de me parler un peu de leurs études, de leur motivation et de leurs expériences. Ils sont suisses tous les deux, et j'aimerais comprendre ce qui les a poussés à entreprendre ces études. Après tout, la Suisse a décidé, en 2011, de ne

plus renouveler ses réacteurs. Et, chez nos voisins européens, le credo est le même: il faut sortir de l'énergie nucléaire.

#### **Le PSI, point de rencontre**

Lea Zimmermann vient de Suisse alémanique et a terminé un cursus de Bachelor en génie mécanique. Elle fait actuellement un stage dans le domaine du démantèlement à Beznau et enchaînera avec son troisième semestre au PSI. Boris Hombourger, lui, est romand avec des racines françaises. Il a terminé ses études en 2013 et achevé sa thèse de doctorat à l'été 2018. Actuellement, il est chercheur au PSI, dans le développement de réacteurs avancés. L'après-midi vient de commencer, et nous avons l'idyllique terrasse du restaurant Oase, qui fait partie du PSI, au bord de l'Aar, pratiquement pour nous seuls. Lea et Boris sont très ouverts. Ils évoquent avec enthousiasme leurs études et les expériences qu'ils ont faites à Lausanne et à Zurich. «Les deux sites sont intéressants, parce qu'on



est rattaché à différentes facultés, mais aussi à cause de la diversité culturelle, raconte Lea. A Lausanne, l'esprit qui règne est complètement différent de celui qu'on rencontre à Zurich.» Boris le confirme en souriant: «La mentalité est parfois tout autre. Mais les différences de mentalité, c'est quelque chose qui nous est vraiment familier. Après tout, nous formons aussi un groupe international pendant nos études. Nos camarades viennent des Etats-Unis, de Chine, de France ou encore d'Italie. A elle seule, cette réalité appelle une certaine ouverture sur le monde.»

#### Le Joint Degree et ses avantages

En Suisse, le principe de la coopération universitaire reste encore rarement appliqué. Pourtant, il est judicieux que les départements de différentes universités, équipées d'installations de recherche, collaborent avec d'autres institutions importantes dans le domaine et qu'ils exploitent les synergies pour transmettre une expertise en matière d'enseignement et de recherche. C'est la condition indispensable pour que les étudiants reçoivent une formation complète sous toutes les facettes du cursus d'études. Dans le cas du *Nuclear Engineering*, cela signifie, par exemple, une étroite collaboration avec la Nagra, le centre de compétence de Suisse pour l'élimination des déchets radioactifs.

Outre la diversité culturelle et la pluridisciplinarité, les étudiants apprécient aussi l'exclusivité dont ils jouissent. «Actuellement, nous sommes huit étudiants dans mon semestre, raconte Lea. Les Suisses sont en minorité. Cela veut dire que nous serons parmi les rares personnes de ce pays à avoir des connaissances fondées et étendues dans ce domaine.» Et même si bon nombre d'étudiants étrangers restent en Suisse après leurs études, les Suisses gardent l'avantage en raison de leur langue maternelle.

#### Un large spectre de savoir-faire

Autrement dit, cette filière offre des conditions de rêve. Mais quid des contenus? «Les études, en tant que telles, ratissent vraiment large, relève Boris. Comme physicien, j'ai retiré beaucoup d'enseignements du génie mécanique, par exemple au sujet de la thermohydraulique. Ou encore sur les applications dans le domaine des technologies médicales.»

Andreas Pautz, physicien de formation, professeur à l'EPFL et directeur de la division de recherche Energie nucléaire et sûreté au PSI, le confirme: «Le cursus a été complété au cours des dernières années afin d'élargir les possibilités de travail des étudiants, par exemple avec des composantes de médecine. Le premier semestre inclut désormais un cours obligatoire de radiophysique dans ses applications médicales.»

Cependant, la plupart des étudiants restent attirés par la construction et le développement de réacteurs ainsi que par le développement futur de l'énergie nucléaire. «Cela englobe aussi la fusion nucléaire, qui fait d'ailleurs l'objet d'un cours au premier semestre, poursuit Andreas Pautz. Toutefois, les étudiants restent fidèles aux centrales nucléaires en fonction ou aux réacteurs de 4<sup>e</sup> génération, même si nous coopérons aussi avec le réacteur à fusion nucléaire ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) dans le sud de la France.»

#### Sans recherche nucléaire, pas d'avenir

Lea et Boris préféreraient eux aussi travailler dans le domaine des réacteurs. Dans le développement ou le démantèlement. Pour eux, le secteur n'est pas dans l'impasse. Après tout, dans le reste du monde, beaucoup de nouvelles centrales nucléaires sont en train d'être construites. Rien qu'en Chine, l'objectif est de raccorder 40 nouvelles centrales nucléaires au réseau. Alors que Boris vise les Etats-Unis, Lea aimerait rester en Suisse: «Je suis accro à l'air pur, je fais du vélo, de la randonnée et du triathlon, confie-t-elle. En Suisse, tout est réuni pour que je puisse me donner à fond dans ces domaines.»

Nous quittons le restaurant pour nous rendre au centre de formation, car j'aimerais voir où auront lieu les cours à partir d'octobre. A l'entrée, Boris s'amuse avec une station qui permet de tester la capacité de radioprotection de différents matériaux. Pratiquement à l'aveugle, il pointe le matériau qui offre la plus faible: le bois.

Tout en arpentant les couloirs, ils discutent à bâtons rompus de leur domaine. Moi, je décroche. Ma moyenne de physique – tout juste suffisante – se venge, une fois de plus. Mais je comprends ce qui les motive et j'admire leur enthousiasme pour leurs études et l'ensemble de cette thématique. ♦



# Actualité de la recherche au PSI

## 1 100% bio

Expérience-pilote réussie sur des biomolécules à la nouvelle grande installation de recherche du PSI: le laser à rayons X à électrons libres SwissFEL a braqué, pour la première fois, sa puissante lumière sur des cristaux de protéines et permis de rendre visible leur structure. Les propriétés particulières du laser à rayons X permettent de conduire des expériences novatrices, où visualiser des protéines en train de bouger et de changer de structure. En Suisse, cette nouvelle méthode n'est disponible qu'au PSI. Les connaissances qu'elle fournira contribueront à la découverte de nouveaux médicaments et de nouveaux traitements pour les patients. L'expérience-pilote s'est déroulée en collaboration avec l'entreprise de biotechnologie leadXpro AG.

Informations complémentaires:  
<http://psi.ch/F2WK>

## 2 Traitement efficace contre le cancer

Une substance radioactive, développée à l'Institut Paul Scherrer PSI contre une forme particulièrement maligne de cancer de la thyroïde, pourrait devenir un médicament «blockbuster». Par sa structure, cette substance est également capable de se fixer sur les cellules d'autres types de tumeurs et de les détruire avec son rayonnement – pour autant que ces cellules portent à leur surface les récepteurs correspondants. Or, c'est le cas du cancer du poumon à petites cellules. Comme il n'existe pas de traitement efficace contre ces deux types de cancers, l'objectif de l'entreprise de biotechnologie lausannoise Debiopharm est de poursuivre le développement de la substance active du PSI jusqu'au stade de médicament homologué. Debiopharm et le PSI ont conclu un contrat de licence à cet effet.

Informations complémentaires:  
<http://psi.ch/a9TG>

## 3 Des mémoires informatiques peu énergivores

Les ordinateurs consomment, chaque année, beaucoup de kilowattheures de courant. Une bonne partie de cette énergie sert à la sauvegarde des données. Classiquement, ce stockage est assuré par une tête magnétique qui inscrit des bits, magnétiques eux aussi, sur des disques durs. Si l'on réussissait à utiliser ce qu'on appelle des «multiferroïques» comme supports de stockage, il serait possible d'inscrire ces bits magnétiques par application d'un champ électrique. Cela serait nettement moins énergivore, raison pour laquelle les multiferroïques sont considérés comme les matériaux miracles des mémoires informatiques du futur. Il n'y a qu'un hic: ceux-ci ne gardaient leurs propriétés particulières qu'à basses températures. Des chercheurs de l'Institut Paul Scherrer PSI et leurs collègues de l'Institut Laue-Langevin ILL de Grenoble viennent de créer un matériau qui conserve l'une des propriétés nécessaires jusqu'à 100 °C. Ils ont ainsi franchi un pas décisif en direction de la faisabilité.

Informations complémentaires:  
<http://psi.ch/3kGb>



#### 4 Du nouveau sur le «petit âge glaciaire»

Au cours de la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, une série de grandes éruptions volcaniques dans les tropiques a entraîné un refroidissement global du climat de la Terre avec, pour conséquence, une progression des glaciers alpins lors de la dernière phase du «petit âge glaciaire». Or, le recul des glaciers alpins qui a suivi est un processus naturel: contrairement à ce que l'on supposait jusqu'ici, il n'a pas été provoqué par la suie, liée à l'industrialisation de la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. C'est ce qu'ont démontré des chercheurs du PSI sur la base de carottes de glace, en analysant pour la première fois la quantité de suie qui y était archivée. Les valeurs obtenues – sur l'évolution de la quantité de suie au fil du temps – pourraient par ailleurs être intégrées aux futurs modèles climatiques et les rendre plus précis.

Informations complémentaires:  
<http://psi.ch/eSqQ>

## 1740

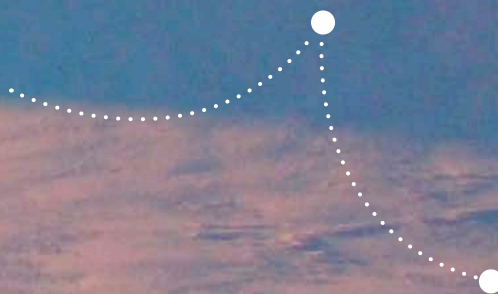
La composition de l'air, de 1740 à nos jours, a été reconstituée par des chercheurs du PSI à partir des glaciers alpins.

## XV<sup>e</sup>

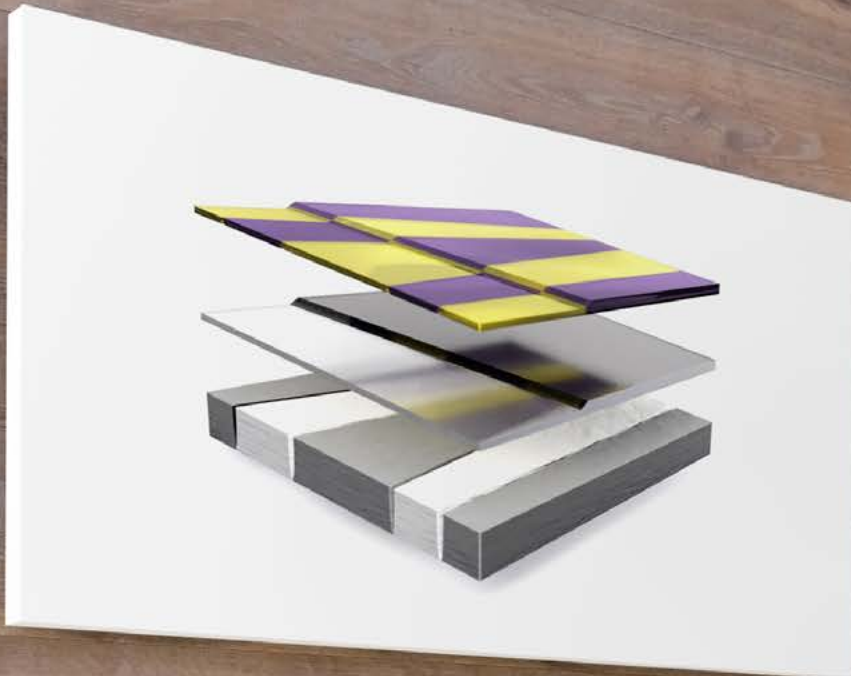
Durant la période du XV<sup>e</sup> au XIX<sup>e</sup> siècle, appelée «petit âge glaciaire», les glaciers alpins ont beaucoup progressé, avant de reculer d'autant par la suite.

## 80%

A 80%, le recul des glaciers alpins s'est produit entre 1850 et 1880, soit bien avant que l'atmosphère ne contienne d'importantes quantités de suie.







### Commutateur à bascule pour multiferroïques (2018)

Naëmi Leo, physicienne, a réalisé cette image alors qu'elle était postdoc au PSI. Il s'agit de l'évaluation d'expériences menées à la SINQ, une grande installation de recherche du PSI. Elle symbolise - de bas en haut - la commutation des propriétés d'un matériau multiferroïque. Le terme «multiferroïque» désigne des matériaux dont les propriétés magnétiques et électriques sont couplées les unes aux autres. Au PSI, des chercheurs étudient ce qui se passe précisément dans ces matériaux et les possibilités d'utilisation de ces processus pour concevoir de nouveaux matériaux dans le domaine de l'électronique: des mémoires de données innovantes, par exemple.



# Chefs-d'œuvre modernes

GALERIE

On ne les verra pas à Art Basel cette année. Mais ils mériteraient bien une exposition, nos chefs-d'œuvre modernes. Nous les avons accrochés directement dans nos salons. Quant aux messages que les artistes voulaient faire passer dans leurs œuvres, il n'y a aucun doute sur leur contenu. Car lesdits artistes sont des chercheurs qui détaillent ce que ces images recèlent dans des revues spécialisées de renom, à l'attention d'un public d'experts. Il est grand temps d'examiner à quoi servent ces images – mis à part leur aspect décoratif.

Texte: Dagmar Baroke







### La structure de bande des spinons (2018)

Ce travail vise, lui aussi, la compréhension des propriétés de certains matériaux. Les deux graphiques sont la représentation visuelle d'une propriété de matériau particulière: la dispersion des spinons. Bruce Normand, chercheur spécialiste de physique théorique au PSI, et Zheng-Xin Liu, son collègue de Pékin, présentent ici leurs calculs pour un matériau qui a un comportement différent par rapport à d'autres matériaux comparables de la même classe. Leur travail constitue une étape dans l'élaboration de nouveaux ordinateurs qui devraient un jour remplacer nos machines à système binaire: les ordinateurs quantiques, dans lesquels investissent également de grandes sociétés informatiques en ce moment.







### Tourbillon autour du point de Bloch (2017)

Ce graphique représente la structure qui entoure ce qu'on appelle un «point de Bloch». Claire Donnelly, physicienne, l'a découvert dans ses données de mesure. Même si l'existence de points de Bloch avait été prédite il y a plus de cinquante ans déjà, ils n'avaient encore jamais été observés directement jusqu'à cette étude. Dans un point de Bloch, la direction de magnétisation change abruptement. L'image montre le tourbillon que forme la magnétisation autour du point de Bloch. On utilise des aimants dans la production de courant et le stockage des données. De fait, mieux comprendre les propriétés fondamentales des matériaux magnétiques contribue à améliorer ces technologies et, par conséquent, notre quotidien.





### Une antenne pour ondes de spin (2016)

Cette image a été générée sur la base de données mesurées, entre autres, à la Source de Lumière Suisse SLS du PSI. Elle montre un tourbillon magnétique, au centre duquel se trouve un spin magnétique dirigé vers le haut. Celui-ci sert de nanoantenne qui émet des ondes de spin avec une longueur d'onde extrêmement courte, sous l'influence d'un champ magnétique alternatif à haute fréquence. Sebastian Wintz, physicien, et ses collègues ont ainsi démontré un mécanisme qui présente un grand potentiel pour des applications futures dans le traitement des données.





### La rotation inattendue des nanoaimants (2017)

Ce travail montre la simulation d'une structure faite de nanoaimants. Les données à cet effet ont été générées par Sebastian Gliga, physicien, et ses collègues qui ont étudié de minuscules aimants de permalloy à la Source de Lumière Suisse SLS du PSI. Lors de l'expérience, la magnétisation a tourné d'une manière à laquelle les chercheurs ne s'attendaient pas. Cette découverte pourrait permettre de développer des appareils magnétiques de quelques nanomètres seulement, comme des nanomoteurs, des éléments d'entraînement, des capteurs ou des mémoires informatiques.



# Sa passion, ce sont les enfants

Beate Timmermann a mis en place, à l'Institut Paul Scherrer PSI, un programme de protonthérapie pour enfants cancéreux, tout en élevant son fils.

Aujourd'hui, elle dirige le Centre d'hadronthérapie au centre oncologique allemand Westdeutsches Protonentherapiezentrum (WPE) d'Essen.

Elle est considérée comme l'une des meilleures expertes de ce domaine.

Texte: Joel Bedetti

Sa grande carrière, Beate Timmermann ne l'avait pas planifiée. Adolescente, elle pensait encore qu'elle serait pédiatre et qu'elle aurait son propre cabinet. Aujourd'hui, à 51 ans, elle est professeure, cheffe de service et l'une des meilleures spécialistes dans le domaine de la protonthérapie pour le traitement des cancers pédiatriques. Son médecin de famille à Hambourg, où elle a grandi, était son modèle. «C'était un médecin de la vieille école, raconte Beate Timmermann. Il faisait des visites à domicile et l'on pouvait lui raconter tout ce qu'on avait sur le cœur.» Elle a d'ailleurs continué à le solliciter pendant ses études de médecine, lors de la préparation d'examens difficiles.

Ces épreuves universitaires, elle les a réussies. Mais une «pléthore de médecins» a compromis son projet de vie. En effet, dans les années 1990, les médecins fraîchement diplômés étaient tellement nombreux, en Allemagne, que les emplois étaient rares. «On envoyait des dizaines de candidatures et l'on ne pouvait pas faire les difficiles», raconte Beate Timmermann. Elle a fini par décrocher un emploi à l'Hôpital universitaire de Tübingen, comme oncologue radiothérapeute. «Je n'avais pas la moindre idée de ce domaine», avoue-t-elle en riant. Ce qui la consolait, c'était qu'à Tübingen on se concentrait sur le traitement des cancers pédiatriques.

Au lieu de prendre ses fonctions dans un cabinet à la campagne, Beate Timmermann s'est donc retrouvée plongée dans le quotidien agité d'un hôpital universitaire. «La science, je ne pouvais m'y consacrer

que la nuit, se souvient-elle. Mais les journées me permettaient de découvrir à fond le spectre, large et très stimulant, de la radiothérapie moderne.» Beate Timmermann venait de passer son examen de spécialiste et de soutenir sa thèse de doctorat sur la radiothérapie chez l'enfant, lorsqu'elle a découvert, dans un article, une méthode thérapeutique novatrice: la radiothérapie au moyen de protons. Lors de la radiothérapie conventionnelle, où l'on recourt à des photons, le faisceau de rayons X déploie son effet le plus puissant au moment de son impact sur le corps, alors que la tumeur est souvent située en profondeur. Le faisceau de protons, en revanche, n'est efficace qu'à une profondeur définie, celle de la tumeur. Les dommages collatéraux dans les tissus sains sont ainsi bien moindres.

## La protonthérapie: pour les enfants aussi

Au printemps 2002, le département de médecine nucléaire (ASM) de l'Institut Paul Scherrer – l'actuel Centre de protonthérapie CPT – cherchait à embaucher un médecin et il avait passé une annonce dans la revue *Deutsches Ärzteblatt*. L'ASM faisait partie des instituts pionniers dans le domaine de la protonthérapie: on y traitait certaines tumeurs oculaires depuis 1984 et, depuis 1996, il possédait la première unité de traitement à bras isocentrique délivrant le Spot Scan, aussi appelé le *pencil beam scanning*, de manière routinière, la fameuse Gantry 1. La technologie Spot Scan permet une irradiation particulièrement précise et se









«Chez les petits enfants, les médecins sont particulièrement prudents, parce qu'une radiothérapie peut engendrer des séquelles durables. C'est pour cela qu'à mes yeux la protonthérapie a un potentiel pareil. »

Beate Timmermann, directrice du Centre d'hadronthérapie, Hôpital universitaire d'Essen





prête idéalement au traitement des tumeurs situées à des endroits critiques, par exemple dans le cerveau. Beate Timmermann a postulé. Lorsqu'elle est venue se présenter à Gudrun Goitein, qui dirigeait l'ASM à l'époque, elle avait déjà ce projet en tête: établir la protonthérapie dans le domaine pédiatrique. «Chez les petits enfants, les médecins sont particulièrement prudents, parce qu'une radiothérapie peut engendrer des séquelles durables, rappelle Beate Timmermann. C'est pour cela qu'à mes yeux la protonthérapie avait un potentiel pareil.»

A son grand bonheur, le PSI l'a engagée. Le passage à la recherche fondamentale a représenté un choc culturel mais positif. A l'époque, la Gantry 1 était régulièrement hors service pendant plusieurs mois en raison de travaux de maintenance et de développement au grand accélérateur de protons du PSI, qui produit le faisceau de protons nécessaire au traitement. Beate Timmermann, qui avait l'habitude d'être stressée en permanence, a pu mettre à profit ce temps précieux pour se consacrer à l'activité scientifique. Elle a ainsi entamé une thèse d'habilitation à l'université de Münster, en Allemagne, mais aussi noué des contacts avec le département d'oncologie de l'Hôpital universitaire de Zurich et le service d'anesthésie de l'Hôpital des enfants de Zurich, qu'elle prévoyait d'impliquer dans le traitement des enfants. Au début, certains de ses collègues étaient sceptiques, se souvient-elle. Ils se demandaient si ce projet difficile aboutirait. Mais Beate Timmermann a fini par convaincre les plus critiques.

Son fils est né peu de temps après son entrée en fonction. Comme son partenaire vivait encore à Munich à l'époque, elle a dû prendre en charge son enfant pratiquement toute seule. Au terme de son congé de maternité, son fils de 4 mois a été accueilli au Kiwi, la crèche du PSI, ce qui était exceptionnel, à l'époque, pour un nourrisson. «J'étais extrêmement reconnaissante d'avoir cette possibilité, se rappelle Beate Timmermann. Je n'avais encore ni amis ni famille en Suisse, qui auraient pu m'aider.» Jongler entre le travail et son enfant était parfois à la limite du possible, mais elle a fini par donner le tour, notamment lorsque son partenaire est venu s'installer en Suisse.

A partir de 2004, les places de traitement pour les enfants se sont mises à faire partie intégrante du programme. Les succès thérapeutiques étonnaient même Beate Timmermann. «Nous pouvions traiter des tumeurs en utilisant des doses élevées, sans que cela déclenche d'effets collatéraux», explique-t-elle. La chercheuse a par ailleurs joué un rôle décisif dans le développement de la protonthérapie au PSI. Avec des physiciens et des techniciens, elle a mis au point une méthode thérapeutique impliquant un plateau de table mobile, qui permet de traiter des tumeurs très étendues, par exemple au niveau du système nerveux.

«Nous avons utilisé des mannequins pour déterminer la position idéale des patients allongés, raconte-t-elle. Toute l'équipe y a contribué, c'était très motivant!»

### Un visiteur de l'époque du PSI

En 2009, la scolarisation de son fils approchait. Et Beate Timmermann, devenue entre-temps directrice adjointe du nouveau CPT, savait qu'elle voulait retourner en Allemagne. La protonthérapie était en train de conquérir l'Europe et, rien qu'en Allemagne, deux installations étaient en construction. Beate Timmermann a reçu une offre de l'Hôpital universitaire d'Essen, où se mettait en place un institut d'irradiation par protons sous l'égide du centre oncologique Westdeutsches Tumorzentrum. Puis elle a été sollicitée pour une chaire d'hadronthérapie. Elle a quitté le PSI avec le cœur lourd: «Je m'y étais fait des amis, et mon fils y a grandi.»

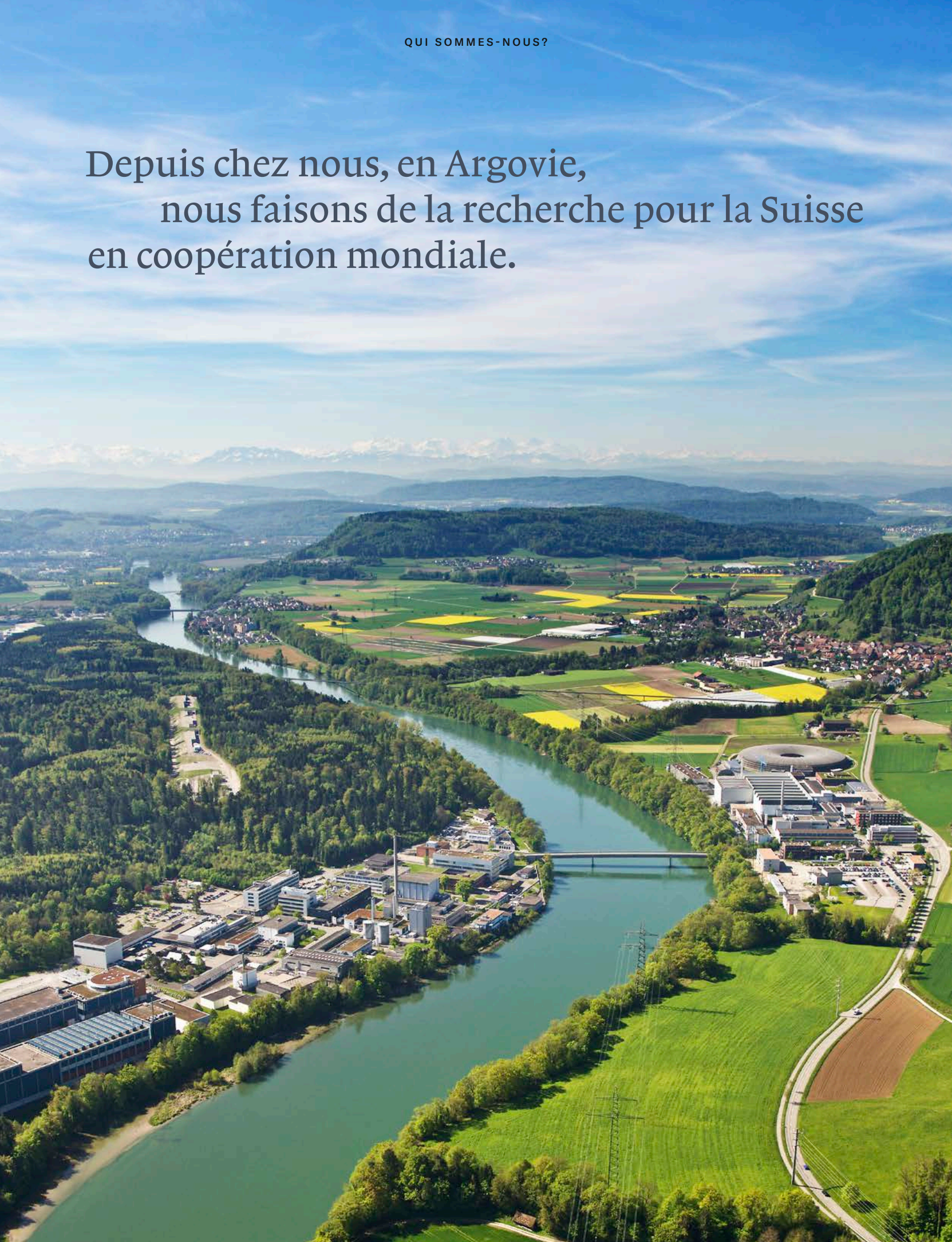
Son étonnement a été d'autant plus grand, lorsqu'elle est arrivée à Essen. L'unité d'irradiation par protons n'était pas encore opérationnelle. Les négociations entre l'hôpital et le fabricant se sont poursuivies pendant quatre ans. A plusieurs reprises, le projet a failli avorter. «Là, il m'est arrivé de me demander si j'avais vraiment bien fait de déménager», avoue Beate Timmermann. En 2013, l'exploitation a enfin démarré. Aujourd'hui, le centre d'hadronthérapie qu'elle dirige au Westdeutsches Protonentherapiezentrum (WPE) dispose de quatre salles d'irradiation et traite 500 patients chaque année, dont près de la moitié sont des enfants. «C'est le plus grand programme du genre en Europe», précise-t-elle.

Aujourd'hui, Beate Timmermann est considérée comme l'une des meilleures expertes dans le domaine de la protonthérapie pédiatrique. «Je commence toujours mes conférences en évoquant ma période au PSI, souligne-t-elle. Tous ceux qui s'intéressent à la protonthérapie connaissent le rôle pionnier qu'a joué le PSI.» Elle garde le contact avec ses anciens collègues de Villingen par e-mail; parfois, elle les croise à des congrès. Et puis il y a cette visite qu'elle reçoit chaque année à Essen: celle d'un garçon qu'elle a débarrassé de sa tumeur au cerveau à l'époque où elle travaillait au PSI. «Je le vois grandir et aller à l'école. C'est la plus belle preuve du succès de la protonthérapie», conclut-elle. ♦

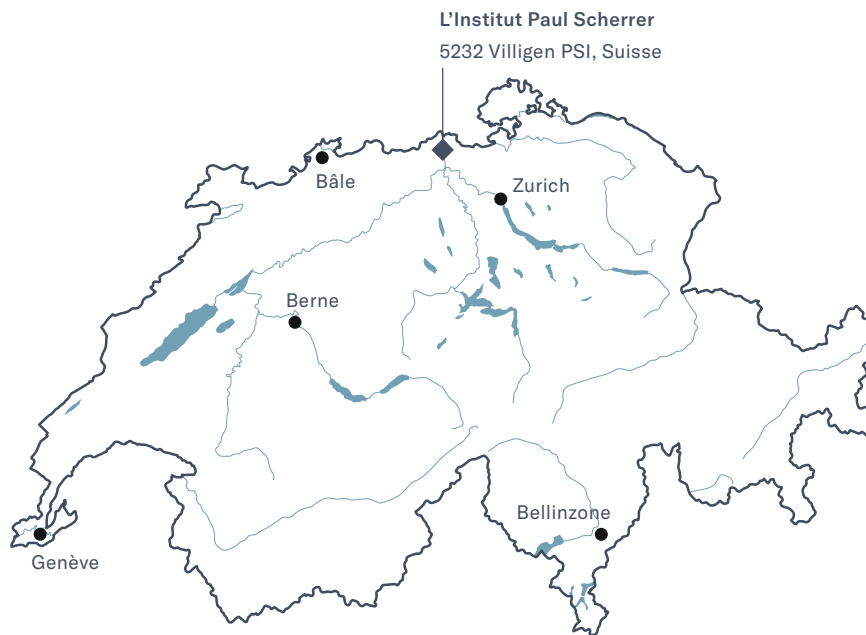


QUI SOMMES-NOUS?

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







4

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 352643 mètres carrés, qui possède son propre pont sur l'Aar et qui compte 2000 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 la moitié et les deux tiers 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 quatre 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 nouveaux 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 post-docs.

## **IMPRESSUM**

**5232 – Le magazine de l'Institut Paul Scherrer**  
Paraît trois fois par an.  
Numéro 1/2019 (janvier 2019)  
ISSN 2571-6891

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

**Rédaction**  
Dagmar Baroke, Monika Blétry,  
Martina Gröschl, Christian Heid,  
Dr. Laura Hennemann (resp.)

**Traduction**  
Catherine Riva

**Correction**  
Étienne Diemert

**Design et direction artistique**  
Studio HübnerBraun

**Photos**  
Scanderbeg Sauer Photography, sauf:  
Pages 26-27: Martina Barandun;  
Pages 28-32: www.unsplash.com;  
Page 33: www.kaboompics.com;  
Pages 35-37: Westdeutsches  
Protonentherapiezentrum Essen;  
Pages 9, 38: Markus Fischer;  
Page 41: Michael Sigl.

**Objets 3D et visualisation**  
Incursion/Manuel Guédes

**Infographies**  
Studio HübnerBraun, sauf:  
Pages 6-7: Nick Radford – Folio Art;  
Pages 3, 18-19: Christoph Frei.

**Pour en savoir plus sur le PSI**  
www.psi.ch/fr/

**Pour lire 5232 sur Internet**  
www.psi.ch/5232/le-magazine-5232

**Pour vous abonner gratuitement au magazine**  
www.psi.ch/5232/abonner-5232

**5232 est également disponible en allemand**  
www.psi.ch/5232/magazin-5232

PAUL SCHERRER INSTITUT  






## Ce qui vous attend au prochain numéro

L'Institut Paul Scherrer PSI est connu pour ses grandes installations de recherche. Mais certains de ses scientifiques exploitent une installation de recherche plus grande encore: la nature. Ils gravissent les plus hauts sommets des Alpes ou des Andes pour en extraire des carottes de glace, où reste archivée la composition de l'air des siècles passés. Ils arpentent les régions polaires du globe à bord de navires de recherche, pour étudier la formation des nuages à l'écart des particules émises par la civilisation. Puis ils reviennent au PSI pour analyser leurs échantillons et compiler leurs données. Par leur travail, ils contribuent à élucider des questions globales: à quoi ressemblait le climat du passé? Comment le climat évoluera-t-il à l'avenir? Dans notre prochain numéro, nous vous présenterons ces chercheurs du PSI qui «prennent l'air» pour les besoins de la science – au sens littéral du terme.





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