

DOSSIER

# LE PSI EN CHIFFRES

Le magazine de l'Institut Paul Scherrer

01/2021

# 203125

47° 32' 15" N, 8° 13' 30" E

342 000 m<sup>2</sup>  
pour le site  
du PSI



## DOSSIER: LE PSI EN CHIFFRES

### LE PSI EN CHIFFRES

## Les gens, le site et la recherche

Quelque 2100 personnes, dont 800 chercheurs de 61 nationalités différentes, travaillent au PSI. Ce sont ces gens qui font du site de l'institut et de ses 34 hectares un lieu très particulier pour les sciences. Des chiffres impressionnants et surprenants permettent de lever le voile sur le fonctionnement du PSI et sur la recherche menée entre ses murs.

Page 10

1

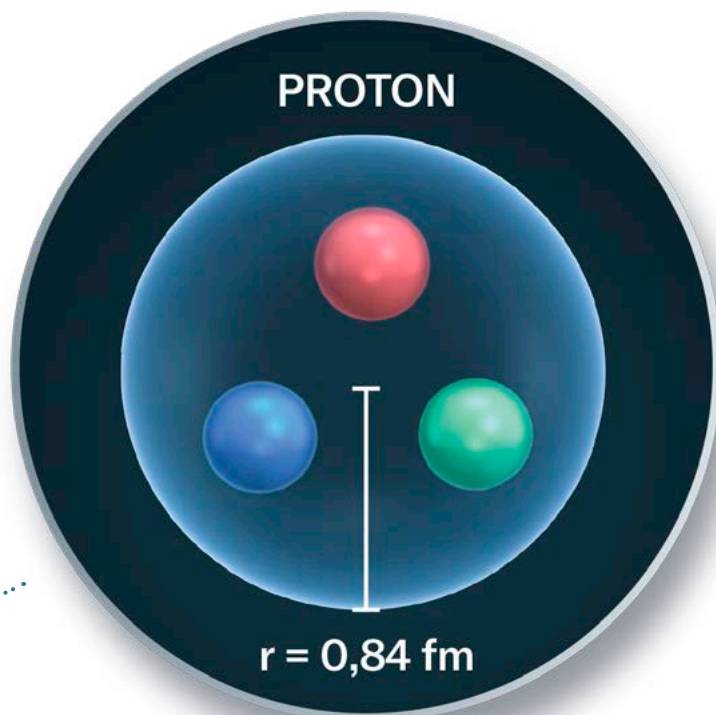
### ENTRETIEN

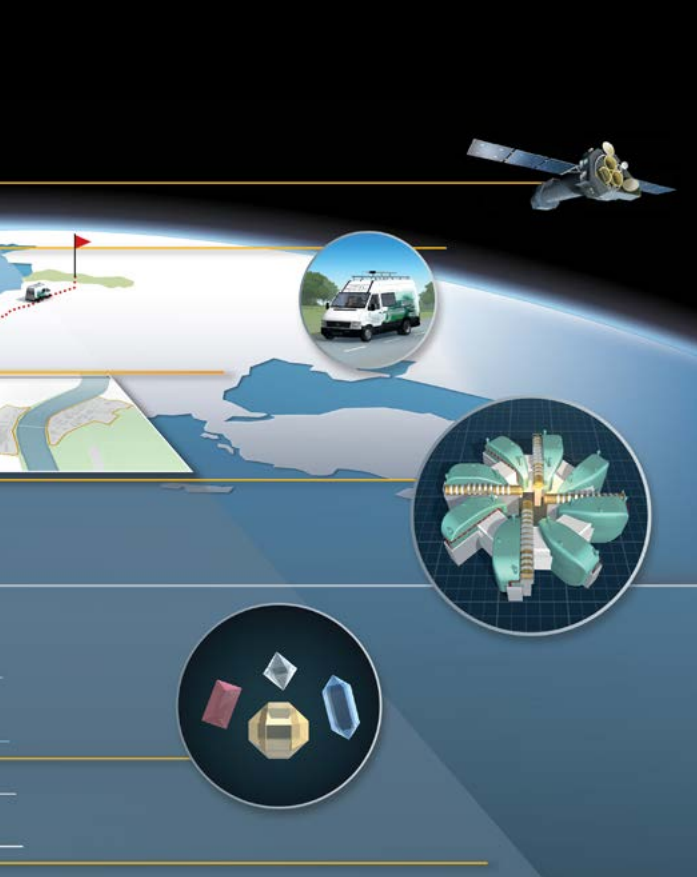
## «Les chiffres nous aident à nous améliorer.»

Peter Allenspach connaît pratiquement chacun des 900 bureaux et des 1000 laboratoires répartis sur le site du PSI. En tant que responsable de la division Logistique, il a l'œil sur nombre d'indicateurs-clés de l'institut. Par exemple, le fait que le PSI ne consomme que du courant 100% renouvelable. Ou encore la précision, au demi-centimètre près, qui a présidé à la construction du bâtiment du SwissFEL.

Page 20

3





2

LE PSI EN CHIFFRES

## Dimensions au PSI

Les chercheurs du PSI observent les plus petites particules qui composent l'univers et l'être humain. Ou développent des appareils de mesure ultrasensibles pour des missions spatiales. Dans chaque cas, l'ampleur des dimensions invite à un étonnant voyage à travers les ordres de grandeur.

Page 18

CONTENU

QUESTIONS-RÉPONSES	
Trois questions à Christian Rüegg	4
QUOTIDIEN	
Force mystérieuse	6
RECHERCHE	
Microrobots	7
 DOSSIER: LE PSI EN CHIFFRES	8
 LE PSI EN CHIFFRES Les gens, le site et la recherche	10
 LE PSI EN CHIFFRES Dimensions au PSI	18
 ENTRETIEN «Les chiffres nous aident à nous améliorer.»	20
EN IMAGE	
Processus catalytiques	21
EN SUISSE	
Stockés en toute sécurité pour un million d'années	22
Le PSI contribue à identifier le meilleur site de dépôt en couches géologiques profondes pour les déchets radioactifs.	
EN BREF	
Actualité de la recherche au PSI	26
1 La froide mémoire de la Terre	
2 Médicaments contre le Covid-19	
3 Thérapie ultrarapide contre le cancer	
4 Nano-tourbillons sous contrôle	
GALERIE	
Des chercheurs sportifs	28
Nombre de chercheurs au PSI s'adonnent à une passion sportive pendant leurs loisirs.	
PORTRAIT	
Polyglotte, structurée et orientée «solution»	34
Au PSI, Carolina Arboleda Clavijo a apporté une contribution importante à la détection précoce du cancer du sein. Aujourd'hui, elle dispense des formations en cinq langues et dans toute l'Europe.	
QUI SOMMES-NOUS?	38
IMPRESSUM	40
DANS LE PROCHAIN NUMÉRO	41



**2116** personnes  
sont employées au PSI.

## Trois questions à Christian Rüegg

Le travail au PSI est très souvent lié à des chiffres: dans la recherche, on mesure et on compte. Mais l'infrastructure de l'institut et le nombre de gens qui y travaillent sont aussi quantifiables. En tant que scientifique et actuel directeur de l'Institut Paul Scherrer, Christian Rüegg a toutes sortes de chiffres en tête.

### Christian Rüegg, quel est, selon vous, le chiffre qui décrit le mieux le PSI?

Oh, là, je devrais certainement répondre **5232**! Car c'est notre numéro postal d'acheminement et le titre de ce magazine. C'est grâce à ce chiffre que l'on nous trouve en Suisse. Mais honnêtement, le plus important à mes yeux, ce sont les personnes qui travaillent ici. Je choisis donc **2116**: d'après les statistiques actuelles, c'est le nombre de collaborateurs que compte le PSI. S'y ajoutent quelques centaines de personnes qui sont employées à l'ETH Zurich, à l'EPF Lausanne et dans les universités. Nous sommes donc comme un village. Et, en effet, la commune voisine de Villigen, juste à côté du PSI, compte autant d'habitants que nous d'employés. Mais nous avons encore d'autres chiffres à faire valoir. En science, la publication d'articles revêt une grande importance. Nous y présentons nos résultats de recherche et nous les partageons avec d'autres experts et avec le public. Quelque **1500** articles scientifiques signés par des chercheurs du PSI paraissent chaque année. C'est un chiffre considérable, dont nous sommes très fiers.

### Dans la recherche proprement dite, on a aussi affaire à des chiffres.

C'est exact. Dans la recherche, les chiffres, les statistiques, les écarts-types, font partie du quotidien. Un chiffre bien particulier, d'ailleurs trouvé au PSI, est le diamètre du proton, l'un des composants fondamentaux des atomes. Nos mesures ont montré que le proton était un peu plus petit qu'on ne l'avait cru jusque-là: son rayon mesure **0,0000000000000084184** mètre. La valeur avancée était de **8768** au lieu de **8418**. Cette différence après la virgule peut sembler négligeable, mais, en réalité, elle est extrêmement importante, car, en sciences physiques et naturelles, bon nombre de choses reposent sur l'exactitude de ce chiffre et d'autres.

### Est-il souvent question de dimensions aussi minuscules au PSI?

C'est effectivement l'une de nos spécialités, car nous sommes connus – même si cela peut sembler *a priori* paradoxal – pour nos grandes installations de recherche: entre autres, la Source de Lumière Suisse SLS, le laser à rayons X à électrons libres SwissFEL, la source de neutrons à spallation SINQ et la source de muons suisse  $\mu$ S. En science, il existe une sorte de proportionnalité inverse: si l'on veut mesurer précisément ce qu'il y a de plus petit, il faut de très grandes et puissantes installations. C'est pour cette raison que le SwissFEL s'étire sur **740** mètres et qu'il est notre plus grand bâtiment. A la SLS, les électrons qui produisent de la lumière de type rayons X ont une énergie de **2,4** milliards d'électronvolts. Une autre installation abrite un accélérateur de protons, équipé de **8** aimants, dont chacun pèse **240** tonnes. Le poids de ces aimants, pris ensemble, équivaut à celui de **100** camions de taille moyenne. Par ailleurs, les protons qu'on y accélère affichent un record du monde: leur énergie combinée atteint **1,4** mégawatt, soit l'énergie d'environ **23000** ampoules. A la  $\mu$ S, nous produisons **500** milliards de muons par seconde: ça aussi, c'est unique au monde. Ailleurs, nous avons des instruments de mesure pour visualiser les structures minuscules d'un matériau, tout en enregistrant **30000** images par seconde, soit **625** fois plus que des longs-métrages coûteux. Bref, les chiffres offrent une bonne perspective pour comprendre le PSI.

# Force mystérieuse

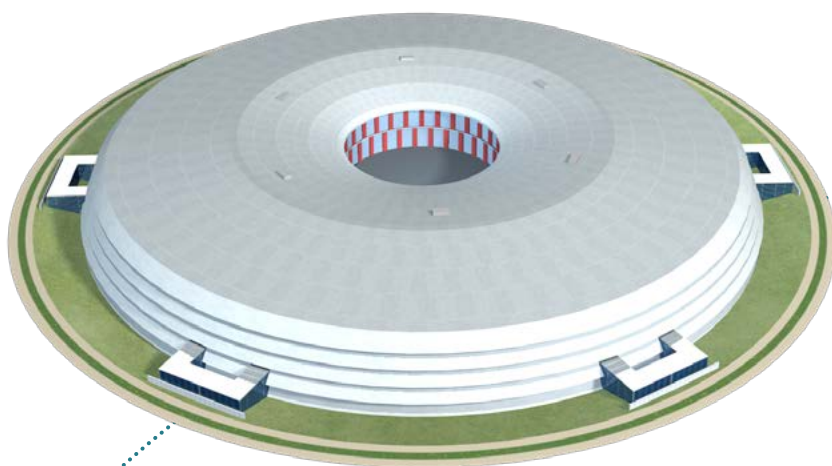
Nous rencontrons le magnétisme très fréquemment à notre insu: il s'agit des aimants sur la porte de notre réfrigérateur. Des tournevis ou des clés à molette qui empêchent les vis et les écrous de tomber. Du fermoir de l'étui de notre téléphone portable. Ou encore de l'aimant en fer à cheval avec lequel nous ramassons des objets métalliques. Autant de dispositifs qui fonctionnent par le biais du magnétisme, cette force presque magique. Quiconque a déjà essayé de presser l'un contre l'autre les pôles sud ou les pôles nord de deux aimants (même tout petits) sait à quel point la force qu'ils recèlent est énorme. L'effet peut-être le plus important du magnétisme nous entoure à chaque instant, sans que nous en ayons conscience. Au centre de la Terre se trouve un superaimant qui produit l'essentiel du champ magnétique de notre planète. Nous en profitons tous, pas seulement parce qu'il nous permet de nous orienter avec une boussole, mais parce que ce champ magnétique nous protège du vent solaire. Comme un grand bouclier protecteur, le champ magnétique terrestre détourne ce puissant flux de particules chargées que le Soleil lance sur nous en continu. Sinon, nos cellules et surtout notre ADN seraient si endommagés que nous ne pourrions survivre.





# Microrobots

Au PSI, les champs magnétiques font l'objet d'intenses recherches. Et on y développe aussi de nouvelles applications du magnétisme, parmi lesquelles figurent les microrobots. Les chercheurs ont développé une micromachine en forme d'oiseau, qui abrite notamment de petits nanoaimants. Ces derniers peuvent être programmés pour adopter une certaine orientation magnétique. Lorsque les nanoaimants programmés sont exposés à un champ magnétique, des forces spécifiques s'exercent sur eux. S'ils sont logés dans des composants flexibles, ces forces induisent un mouvement. Ils sont sans cesse reprogrammables, ce qui conduit chaque fois à des forces diverses qui agissent sur la construction et à de nouveaux mouvements. L'«oiseau» réalisé dans ce matériau est capable d'en effectuer plusieurs: par exemple, battre des ailes, se secouer, se retourner ou encore glisser sur le côté. De telles machines, de quelques micromètres seulement, pourraient être introduites dans le corps humain pour y réaliser de petites interventions chirurgicales.



1

#### LE PSI EN CHIFFRES

Les gens, le site et  
la recherche

Page 10

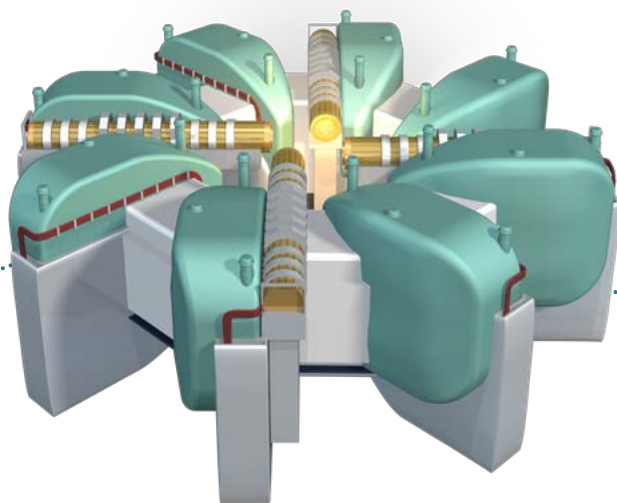
## Le PSI en chiffres

DOSSIER

Au PSI, les chercheurs mesurent des biomolécules complexes, de minuscules structures dans de nouveaux matériaux et même les composants d'atomes. Mais il n'y a pas que cette activité qui génère beaucoup de chiffres: les collaborateurs, le site, les appareils de recherche et l'activité scientifique au PSI sont quantifiables, eux aussi. Les chiffres-clés de cet institut de recherche, sis sur les rives de l'Aar, vont de l'inimaginablement petit au proprement gigantesque.

Auteur: Laura Hennemann





LE PSI EN CHIFFRES

Dimensions au PSI

Page 18

2

3

ENTRETIEN

«Les chiffres nous aident à nous améliorer.»

Page 20



# Les gens au PSI

Quelque **2100** personnes  
sont employées au PSI.

**42,9 ans**

C'est la moyenne d'âge au PSI.



**9 ans**, c'est la durée moyenne pendant laquelle  
les collaborateurs travaillent au PSI.

Les collaborateurs scientifiques travaillent  
en moyenne pendant **12 ans** au PSI  
et les techniciens pendant **11 ans**.



**16%** des employés du PSI  
travaillent à temps partiel.

**40%** des employés dans  
l'administration travaillent  
à temps partiel.

**137** employés dans le domaine  
de l'information

**193**  
Administration

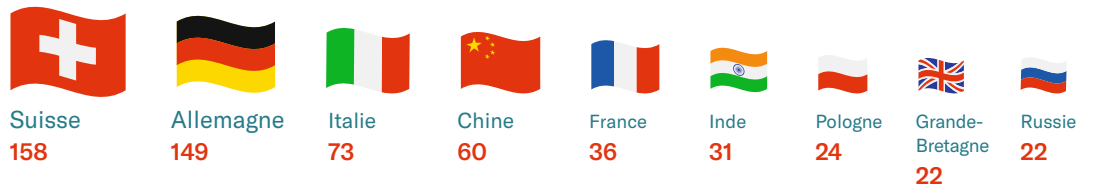
**804**  
Recherche



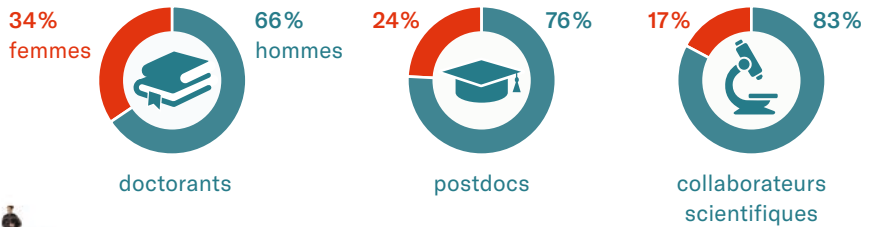
### Des chercheurs du monde entier

Des chercheurs de 61 nationalités différentes travaillent au PSI (pays foncés sur la carte).

### Parmi les chercheurs, ces nationalités sont les plus représentées



### Hommes et femmes dans la recherche



### Visiteurs au PSI

Quelque **11500** personnes du grand public rendent chaque année visite au PSI.

**2992** jeunes sont passés, en 2019, par le laboratoire des écoliers iLab.

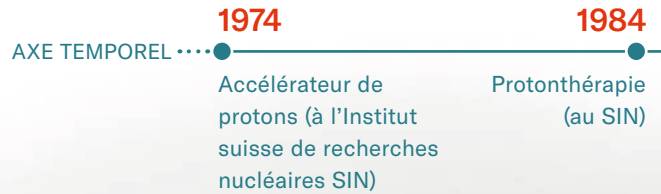
**2532** chercheurs invités se sont rendus, en 2019, au PSI pour y mener leurs expériences.

**374** patients cancéreux ont été traités, en 2019, au Centre de protonthérapie (CPT).

Chiffres: état au 31 décembre 2019.

**982**  
Technique

# Le site du PSI



 **5232** est le **numéro postal** d'acheminement du PSI.

**342 000 m<sup>2</sup>**  
C'est la superficie du site du PSI, soit l'équivalent de 48 terrains de football.

**150 000 m<sup>2</sup>**  
C'est la superficie totale des salles et des couloirs du PSI.

**1000**  
C'est le nombre total de laboratoires.

**900**  
C'est le nombre total de bureaux.

 **17 500** équipements informatiques sont raccordés au réseau (ordinateurs, ordinateurs portables, informatique de laboratoire, commandes des installations, etc.).

 **605** points d'accès Wi-Fi

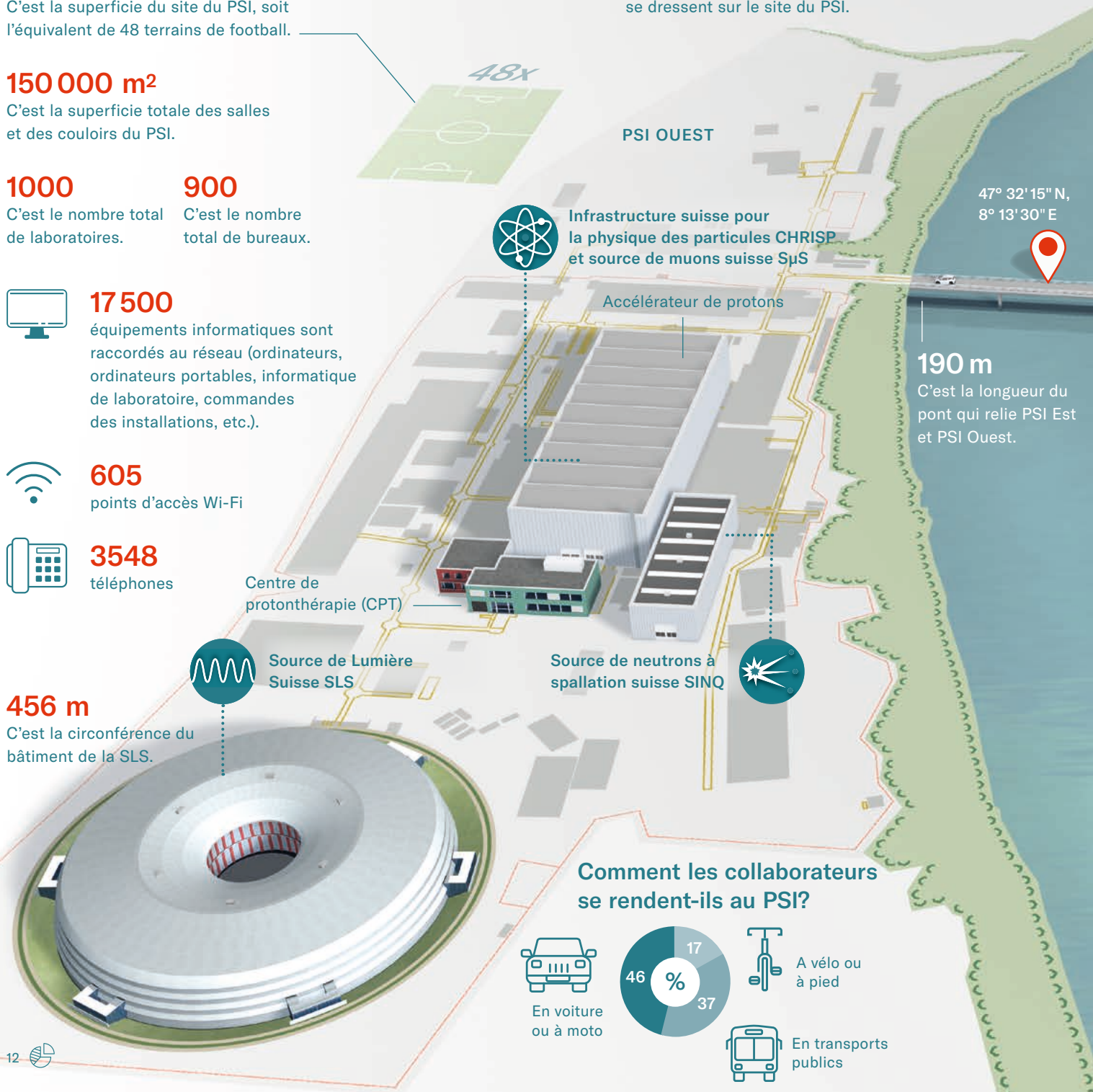
 **3548** téléphones

**456 m**  
C'est la circonférence du bâtiment de la SLS.

**120 bâtiments** se dressent sur le site du PSI.

47° 32' 15" N,  
8° 13' 30" E

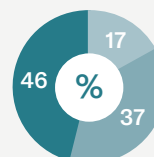
**190 m**  
C'est la longueur du pont qui relie PSI Est et PSI Ouest.



## Comment les collaborateurs se rendent-ils au PSI?



En voiture ou à moto



A vélo ou à pied



En transports publics



**1988**  
Fondation du PSI, né de la fusion de l'Institut fédéral de recherche en matière de réacteurs (EIR) et du SIN, baptisé en hommage au physicien suisse Paul Scherrer (1890-1969).

Installation de rotation de spin du muon  $\mu$ SR, qui a été élargie au fil du temps et rebaptisée source de muons suisse  $S\mu S$ .

**2001**  
Source de Lumière Suisse SLS

**2008**  
Laboratoire des écoliers iLab

**2016**  
Laser à rayons X à électrons libres SwissFEL

PSI EST

**75 m**  
C'est la hauteur de l'objet le plus élevé du PSI: une cheminée de ventilation. Au sommet, un nichoir à faucons a été installé. Il est utilisé chaque année par un couple nicheur.



**35%**  
de la flotte de véhicules du PSI est électrique.



**48**  
C'est le nombre de points de recharge pour voiture électrique disponibles au PSI.

AAR

Laboratoire des écoliers iLab



**950**  
repas de midi sont servis en moyenne chaque jour ouvrable.



**740 m**  
C'est la longueur du SwissFEL, le plus étendu et le plus grand des bâtiments du PSI.

Laser à rayons X à électrons libres SwissFEL



**93 500 m<sup>3</sup>**  
C'est le volume du SwissFEL, qui équivaut à environ 120 maisons individuelles.

**72**  
litres de café sont versés quotidiennement au PSI. Cela correspond à 18000 litres de café par année, une quantité qui suffirait à remplir l'aquarium à mangrove du parc zoologique de Berne.



**500 000 m** de câbles en cuivre et **600 000 m** de connexions en fibre optique

ont été installés au laser à rayons X SwissFEL, soit, dans les deux cas, plus que l'étendue est-ouest de la Suisse.



# Recherche au PSI

**1900**

études sont menées chaque année aux grandes installations de recherche du PSI.



**1500**

articles spécialisés, rédigés par les chercheurs du PSI, sont publiés chaque année.

**400 000**

gants de laboratoire sont utilisés chaque année au PSI.



**5**

**grandes installations de recherche appartiennent au PSI.**

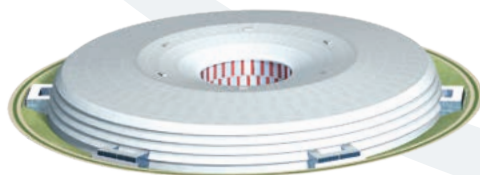
Il y a un total d'environ...

**40**

stations de mesure, où des expériences peuvent être menées simultanément.



**SLS**



**2,4 milliards d'électronvolts**

Les électrons qui tournent dans l'anneau de stockage de la Source de Lumière Suisse SLS ont une énergie de **2,4 milliards d'électronvolts**. Ils produisent de la lumière de type rayons X, qui est de nouveau utilisée pour des expériences. Celle-ci permet de reproduire la nanostructure de certains matériaux, de mesurer les propriétés électroniques ou magnétiques de nouveaux matériaux et d'étudier la structure de certaines protéines. Plus de **7300** structures de protéines ont été ainsi décryptées à la SLS depuis la mise en service de l'installation en 2001.



**100**

familles de brevets actives appartiennent au PSI. Une «famille» comprend les anciens brevets qui remontent à la même invention. En outre, il existe environ 150 familles de brevets, qui n'ont pas été renouvelés.

**17**

spin-off actuelles ont émergé des recherches du PSI.



Environ **5 pétaoctets**

de nouvelles données sont stockés au PSI chaque année. Cela équivaut à peu près à la capacité de stockage d'un million de DVD.

Environ **250 téraoctets**

de données brutes sont produits par la mesure d'une protéine au SwissFEL. Cela correspond à la quantité de données qui tiendrait sur plus de 53 000 DVD.



**SwissFEL**



**6 milliards d'électronvolts**

Au laser à rayons X à électrons libres SwissFEL, les électrons ont une énergie de **6 milliards d'électronvolts**, avant qu'ils soient envoyés par **1060** aimants sur une trajectoire en slalom pour qu'ils émettent de la lumière de type rayons X destinée aux stations expérimentales. Le SwissFEL produit **100** impulsions lumineuses par seconde et chacune d'elles ne dure que quelques **billardièmes** de seconde. Au SwissFEL, les chercheurs peuvent rendre visibles les modifications structurelles de protéines avec une résolution temporelle.





6

institutions font partie du domaine des EPF: le PSI et trois autres instituts fédéraux de recherche (WSL, Empa, Eawag) ainsi que les deux universités EPFZ et EPFL.

## 25 pétaflops,

c'est la puissance de calcul du supercalculateur PIZ Daint du CSCS. Cela signifie **25 quadrillions** d'opérations de calcul par seconde.

## 10 gigaoctets

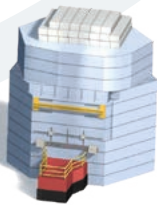
de données par seconde sont transmis par une liaison en fibre optique spécialement installée entre le PSI et le centre de supercalcul du CSCS à Lugano. Sa capacité de calcul et de stockage est également utilisée.



SINQ

## Près de 1 mégawatt

La source de neutrons à spallation suisse SINQ a une puissance de faisceau près de **1 mégawatt**. Elle fournit **100 billions** de neutrons par centimètre carré et par seconde. Les neutrons permettent de radiographier des objets de manière non destructive ou d'analyser les nanostructures magnétiques d'un matériau, et ce avec une résolution inférieure à **1 nanomètre**. Les neutrons arrivent aux différentes stations expérimentales à une vitesse de plus de **4000 km/h**, en passant par des guides de neutrons d'une longueur qui va jusqu'à **50 mètres**.



HIPA

## 590 millions d'électronvolts

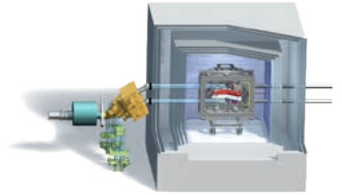
Les protons que fournit l'accélérateur de protons HIPA ont une énergie de 590 millions d'électronvolts. La puissance du faisceau de protons s'élève à **1,4 mégawatt**. Pour un faisceau de protons, c'est un record du monde et cela correspond à la puissance d'environ **23000** ampoules de 60 watts. Les protons qui sont accélérés dans cette installation sont utilisés par la SINQ, la S $\mu$ S et CHRISP.



CHRISP

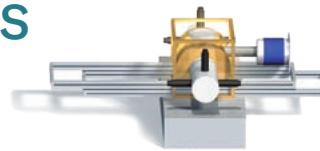
## 2,196980 millièmes de seconde

La durée de vie d'un muon est de **2,196980 millièmes** de seconde. Ensuite, il se désintègre en d'autres particules. Des mesures d'une telle précision sont conduites à l'Infrastructure suisse pour la physique des particules CHRISP. Cette infrastructure inclut aussi la source de neutrons ultra-froids UCN. Celle-ci produit tout juste **1 milliard** de neutrons ultra-froids, autrement dit des neutrons extrêmement lents pour des particules libres, et ce pendant **8 secondes** toutes les 5 minutes. Cette installation est l'une des meilleures du monde. On y mesure certaines propriétés fondamentales des neutrons.

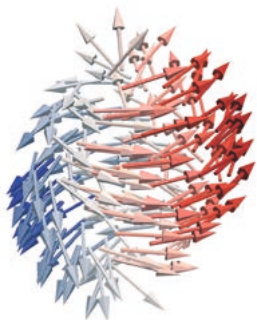
S $\mu$ S

## 500 milliards de muons

La source de muons suisse S $\mu$ S produit **500 milliards** de muons par seconde. De ce fait, elle est unique au monde. Les muons à la S $\mu$ S sont utilisés pour étudier de nouveaux phénomènes quantiques dans certains matériaux. Ils permettent des visualisations ciblées à différentes profondeurs: entre **1 nanomètre** et **10 centimètres**. Les matériaux peuvent être exposés à une pression maximale de **30000 bars**, à des champs magnétiques extrêmement puissants – jusqu'à **9,5 teslas** – et à des températures comprises entre **-273° C** et **700° C**.



# Projets de recherche au PSI

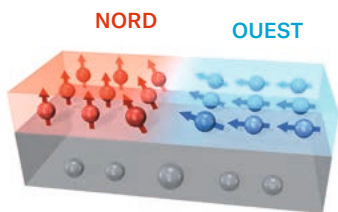


**151 957**

C'est le nombre de pixels du cliché tri-dimensionnel de structures magnétiques au sein d'un échantillon, réalisé par tomographie de haute précision. La distance qui séparait ces pixels était de seulement **0,0001** millimètre. La technologie utilisée pour réaliser ce cliché – appelée tomographie magnétique à rayons X durs – avait été développée directement au PSI.

**2,34 nanomètres** 

(0,00000234 millimètre), telle est la longueur d'onde de la lumière de type rayons X que les chercheurs du PSI ont utilisée à la SLS pour mesurer les propriétés électroniques de certains matériaux. Ils ont examiné un échantillon d'oxyde de strontium-iridium de seulement 25 nanomètres d'épaisseur grâce à leur spectromètre d'une longueur de 5 mètres. Ces expériences sont importantes, si l'on veut identifier les matériaux appropriés aux composants électroniques du futur.

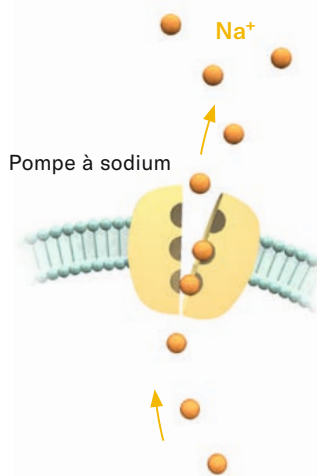


**1,6 nanomètre**

Telle était l'épaisseur de la couche d'atomes de cobalt où des chercheurs du PSI ont découvert un phénomène magnétique bien particulier: lorsqu'un groupe d'atomes de cobalt indiquait le nord, le groupe voisin se mettait à indiquer l'ouest. Ce phénomène inhabituel ne se produit pas dans les structures magnétiques de plus grande taille.

**2,4 milliards d'années**

Voilà l'âge de certains fossiles analysés à la SLS. Les clichés de ces fossiles ont mis en évidence des structures filiformes de champignons et montré que cette forme de vie était bien plus ancienne qu'on ne l'imaginait.



## Les domaines de recherche du PSI

Proportions selon le budget 2019

**37%**

Sciences des matériaux



**24%**

Sciences de la vie

**0,16 nanomètre**

Telle était la résolution locale minimale, lorsque des mesures d'une molécule protéique bien précise ont été réalisées au SwissFEL. Il s'agissait de la pompe à sodium moléculaire d'une cellule bactérienne. Les chercheurs du PSI ont réussi, entre autres, à visualiser un état de transition qui ne dure que **3 billionnièmes** de seconde. Ces connaissances sont importantes pour la neurobiologie. D'autres expériences au SwissFEL permettent même d'obtenir une résolution temporelle inférieure à **50 billionnièmes** de seconde.





## 0,1 trillionième de nanomètre

C'est la distance maximale qui sépare les charges élémentaires dans le neutron, si tant est qu'elle existe. Telle est l'exactitude avec laquelle le «moment dipolaire électrique» du neutron a été mesuré au PSI. Le neutron est le composant élémentaire sans charge des noyaux atomiques. L'expérience a été conduite pendant **2 ans** à la source de neutrons ultra-froids UCN. Elle s'inscrit dans la recherche d'une «nouvelle physique» au-delà du modèle standard.

## 9%

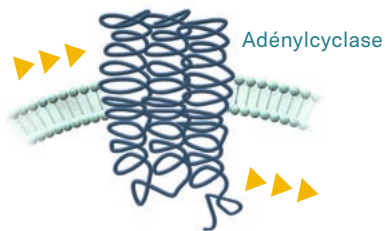
Physique des particules

## 11%

Énergie nucléaire et sécurité

## 19%

Énergie générale



## -150° C

C'est la température à laquelle des chercheurs du PSI ont refroidi un échantillon pour élucider, au moyen de la cryomicroscopie électronique, un processus fondamental dans les cellules de mammifères: une part importante d'une voie de signal qui transmet des informations dans une cellule. Les chercheurs ont réussi à réaliser un instantané d'une protéine appelée adénylcyclase, dont la structure a pu être déterminée avec une résolution de **34 nanomètres**.

## Une probabilité inférieure à 1 sur 2,4 billions

C'est celle de la désintégration bien particulière de particules élémentaires exotiques appelées muons. Cette désintégration est donc **500 000** fois moins probable que l'obtention des six bons numéros au loto suisse. L'expérience, au PSI, qui a fourni ce chiffre aide à tester des théories physiques qui portent sur notre univers. Les chercheurs avaient inclus dans cette expérience **846** détecteurs spéciaux de signaux lumineux faibles et mesuré ainsi des signaux avec une précision de **1 billionième** de seconde.

## 60%

de méthane supplémentaires: c'est ce qu'une méthode développée au PSI permet de produire à partir de déchets organiques. Pour ce faire, elle utilise les **40%** de dioxyde de carbone contenus dans le biogaz, qui ne sont pas utilisés autrement. Appelée méthanisation directe, la méthode convertit directement ce CO<sub>2</sub> additionné d'hydrogène en précieux méthane. Ce procédé a passé avec succès un test de **1000 heures**, conduit à la station d'épuration de Werdhölzli à Zurich.

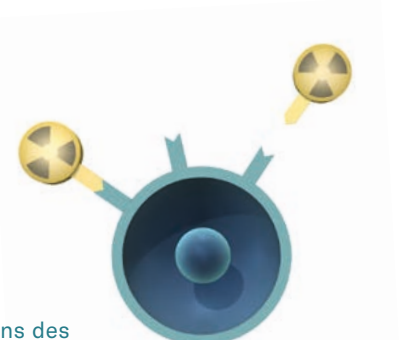


## 233

C'est le nombre de paramètres que l'on peut ajuster avec l'outil Web Carculator. Développé par des chercheurs du PSI, il permet de comparer le bilan écologique de différents types de véhicules individuels. Pour calibrer leur programme, les chercheurs ont utilisé les données de **15 000** voitures. L'outil montre entre autres que, dès aujourd'hui, en matière de bilan écologique, les voitures électriques sont numéro **1**.

## 272

personnes ont été traitées dans des hôpitaux suisses avec des médicaments anticancéreux fabriqués au Centre des sciences radiopharmaceutiques du PSI. Ces médicaments ont été livrés aux établissements suivants: Hôpital universitaire de Bâle, hôpitaux cantonaux de Baden et d'Aarau, cliniques Hirslanden à Zurich et à Lucerne, et Institut de radiologie médicale (MRI) Stadelhofen.



# Dimensions au PSI



**3500 m**

C'est l'altitude à laquelle est située la station de recherche du Jungfrauoch, où des scientifiques du PSI mènent des recherches sur l'atmosphère. L'une de leurs séries de mesures est en cours depuis 33 ans déjà.

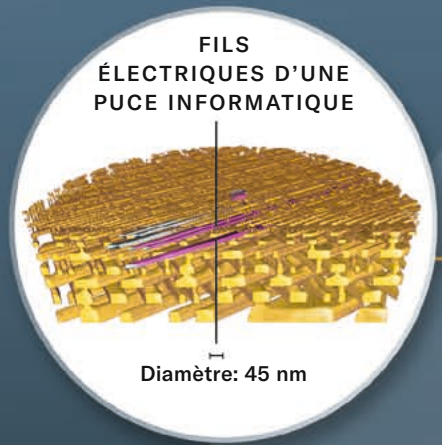
**0,44 m**

Cette double-page fait 44 cm de large.



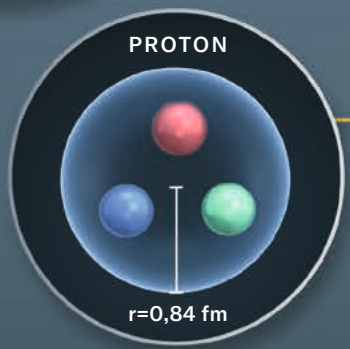
**0,006 m**

Un faisceau de protons concentré, d'environ 6 mm de diamètre, permet de traiter des tumeurs point par point au Centre de protonthérapie.



**0,000 000 045 m**

Des fils électriques, d'un diamètre de 45 nanomètres dans une puce informatique, ont pu être visualisés en 3D à la SLS.



**0,000 000 000 000 000 000 841 84 m**

Le rayon de charge – la moitié du diamètre – du proton mesure 0,84184 femtomètre. Tel est le résultat de la mesure la plus précise à ce jour. Elle a été réalisée au PSI.

# 105 665 000 m

Le télescope spatial XMM-Newton gravite, depuis 1999, sur une orbite à 105 665 km de la Terre. Le PSI a contribué à son développement.



## 725 m

C'est l'extension est-ouest du site du PSI.



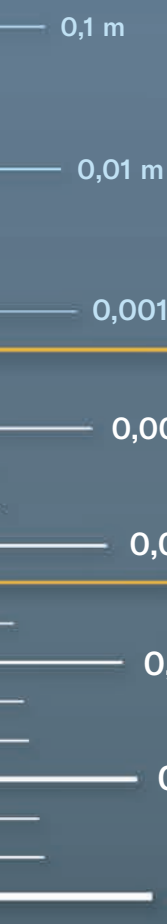
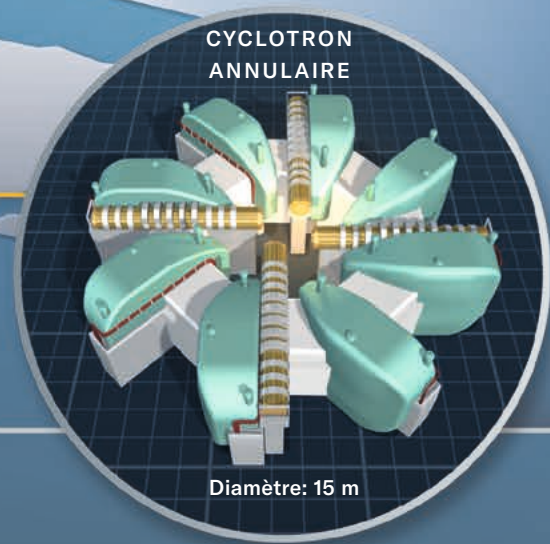
## 2 200 000 m

Le trajet de 2200 km (un aller simple) est le plus long que les chercheurs du PSI aient effectué avec la chambre à smog mobile. Ils l'ont utilisée en Estonie pour étudier des aérosols.



## 15 m

C'est le diamètre du cyclotron dans l'accélérateur de protons HIPA.

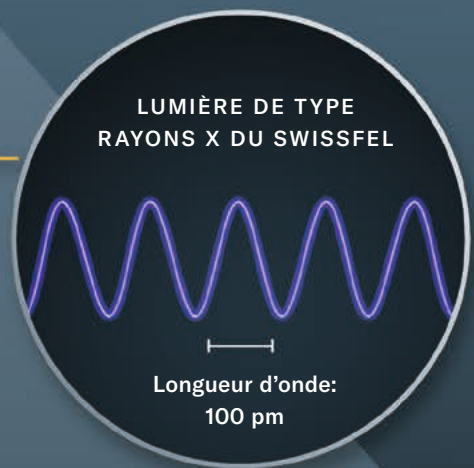


## 0,0001 m

Les cristaux de protéines membranaires, avec une arête de 0,1 mm de long, sont typiquement ceux dont on se sert à la SLS pour étudier la structure des protéines.

## 0,000 000 000 1 m

La longueur d'onde des rayons X riches en énergie, que le SwissFEL peut fournir pour certaines expériences, est de 100 picomètres. Plus la longueur d'onde est courte, plus les structures qu'elle permet de visualiser sont petites.



# «Les chiffres nous aident à nous améliorer.»



Peter Allenspach dirige la division Logistique au PSI. De par son travail, il a constamment l'œil sur les chiffres qui caractérisent le PSI.

Propos recueillis par:  
Laura Hennemann

## Peter Allenspach, êtes-vous content des chiffres du PSI?

Oui, je les trouve surtout impressionnants. Nos 5 grandes installations de recherche, qui sont pour partie uniques au monde, demandent en effet toute une logistique propre. Par exemple, il faut bien reconnaître que lorsqu'on accélère des électrons à 99,999998% de la vitesse de la lumière, cela nécessite beaucoup d'énergie et d'eau de refroidissement: 5200 000 000 litres d'eau chaque année. J'ai récemment calculé que ce volume suffirait à remplir cinq fois l'Empire State Building. Mais nous travaillons constamment à optimiser nos besoins, par exemple en matière d'énergie.

## Dans quelle mesure?

L'un de mes chiffres préférés, ce sont les 70 optimisations énergétiques mises en œuvre avec succès depuis 2013. Dès lors, nous économisons 6 gigawattheures de courant par année. Par ailleurs, nous avons réussi à réduire de moitié nos besoins en énergie de chauffage, entre autres grâce à la récupération et à l'utilisation de la chaleur résiduelle de nos installations de recherche. Autre chiffre qui fait plaisir: 100% du courant que nous utilisons est issu de sources renouvelables; nous avons intégralement basculé vers ce type d'approvisionnement en 2020. Et 35% de nos véhicules au PSI sont déjà à propulsion électrique. Chiffrer tous ces aspects nous aide à faire avancer les développements souhaités et à nous améliorer constamment.

## Votre division inclut aussi le département Immobilier et exploitation. Connaissez-vous chaque recoin du PSI?

Cela peut paraître surprenant, si l'on considère que la superficie totale du PSI est de 342000 mètres carrés, mais oui, j'en connais bel et bien presque chaque recoin. Cela vient surtout du fait que je suis là pratiquement depuis que le PSI a été fondé, mais, évidemment, ça n'a

pas toujours été au titre de responsable de division. La surface totale des pièces et des couloirs du PSI atteint 150 000 mètres carrés. L'institut compte 900 bureaux et 1000 laboratoires; si je décidais aujourd'hui de me rendre dans chacun d'eux, disons d'en visiter deux le matin et deux l'après-midi, chaque jour ouvrable, cela me prendrait 2 ans.

## Et comment les chiffres du PSI évoluent-ils?

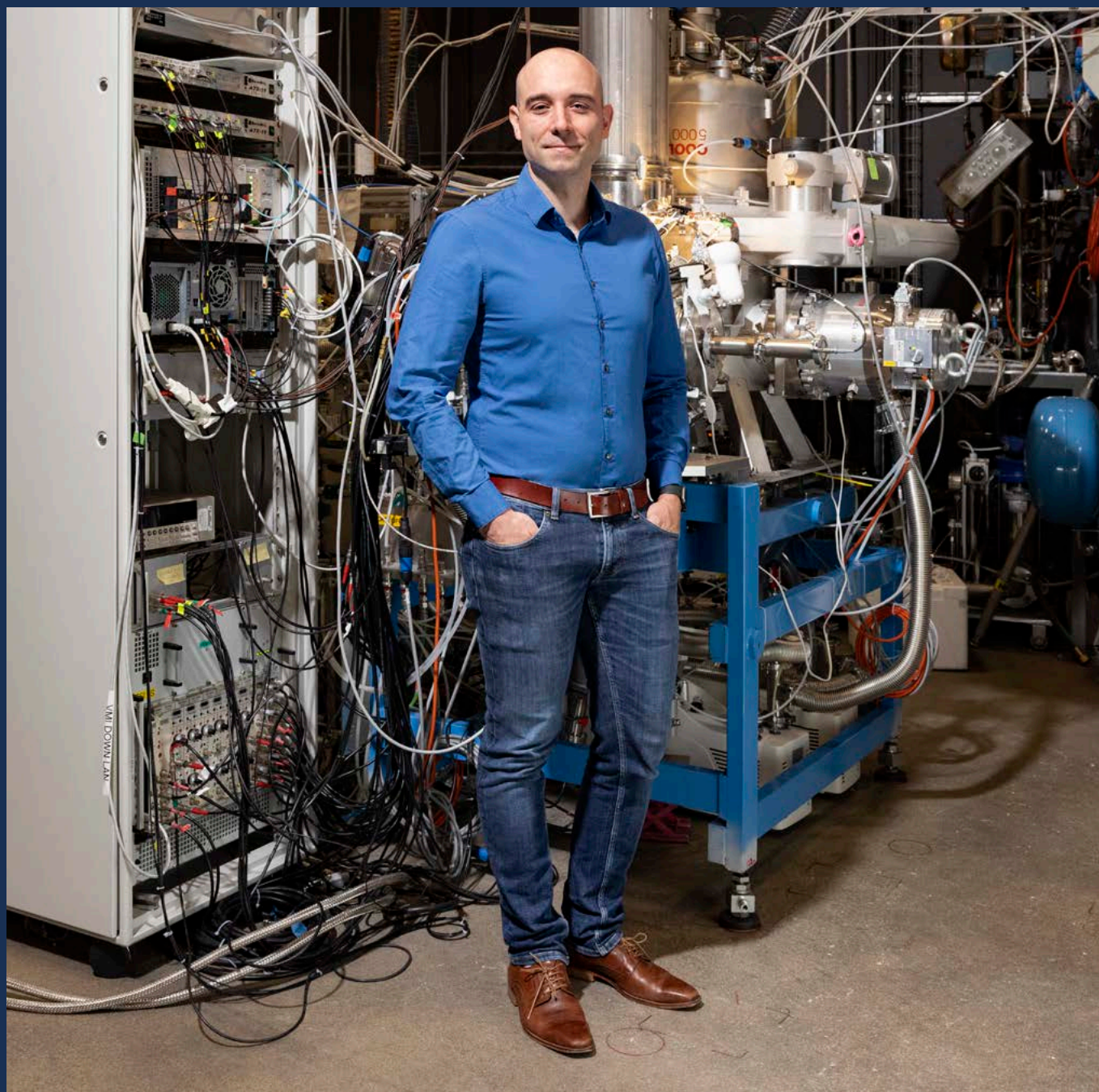
Bien, je trouve! Le PSI a 33 ans aujourd'hui. Il est né en 1988 de la fusion de deux instituts fédéraux qui étaient dépassés: l'Institut suisse de recherches nucléaires (SIN) et l'Institut fédéral de recherche en matière de réacteurs (EIR). Dans les années 1970, l'EIR et le SIN comptaient 46 bâtiments pour le premier et 12 pour le second. Aujourd'hui, le PSI possède quelque 120 bâtiments. Autrement dit, le PSI a gagné en moyenne plus d'un bâtiment par an depuis sa fondation.

## C'est beaucoup?

Absolument. Surtout si l'on songe que certains de nos plus grands projets de construction nécessitent, de la planification à la réalisation, plus de 5 ans de travaux. Nous ne construisons pas des pavillons mais des bâtiments uniques en leur genre, qui doivent satisfaire, chaque fois, des exigences très particulières. Le SwissFEL en est un bon exemple: en raison de la recherche de haute précision qui allait y être conduite, tout devait être précis lors de la construction, au demi-centimètre près. En comparaison, la tolérance est d'ordinaire de 2 centimètres.

## Et hors de la division Immobilier?

Là aussi, les chiffres témoignent d'évolutions réjouissantes: le nombre de collaborateurs du PSI augmente constamment, croissant de 150% au cours des 10 dernières années. Le nombre de personnes qui se rendent chaque année au Centre de protonthérapie du PSI s'est entre-temps stabilisé à un niveau élevé: rien qu'en 2019, 374 patients cancéreux y ont été traités. La tendance est la même du côté des jeunes qui viennent visiter notre laboratoire des élèves iLab: ils étaient 2992 en 2019. Evidemment, l'an dernier, les choses ont été un peu différentes, car la fermeture des écoles pendant la pandémie de coronavirus nous a touchés, nous aussi. Et, pour boucler la boucle, de nouveaux bâtiments vont être construits: actuellement, nous planifions, entre autres, un bâtiment de laboratoires dont la construction devrait être terminée en 2024. ♦



## Processus catalytiques

A la Source de Lumière Suisse SLS, Patrick Hemberger étudie des mécanismes de réactions chimiques et surtout leurs produits intermédiaires d'une durée de vie très courte: si de tels mécanismes sont compris, le déroulement de la catalyse peut être manipulé de manière à faire apparaître davantage de produits souhaités. Cela pourrait permettre à l'avenir d'élaborer des carburants à partir de lignine, un composant végétal. L'an dernier, Patrick Hemberger a reçu le prix Ružička de chimie, du nom de Leopold Ružička, lauréat du prix Nobel. Cette distinction est l'une des plus renommées de Suisse dans l'encouragement de la relève.

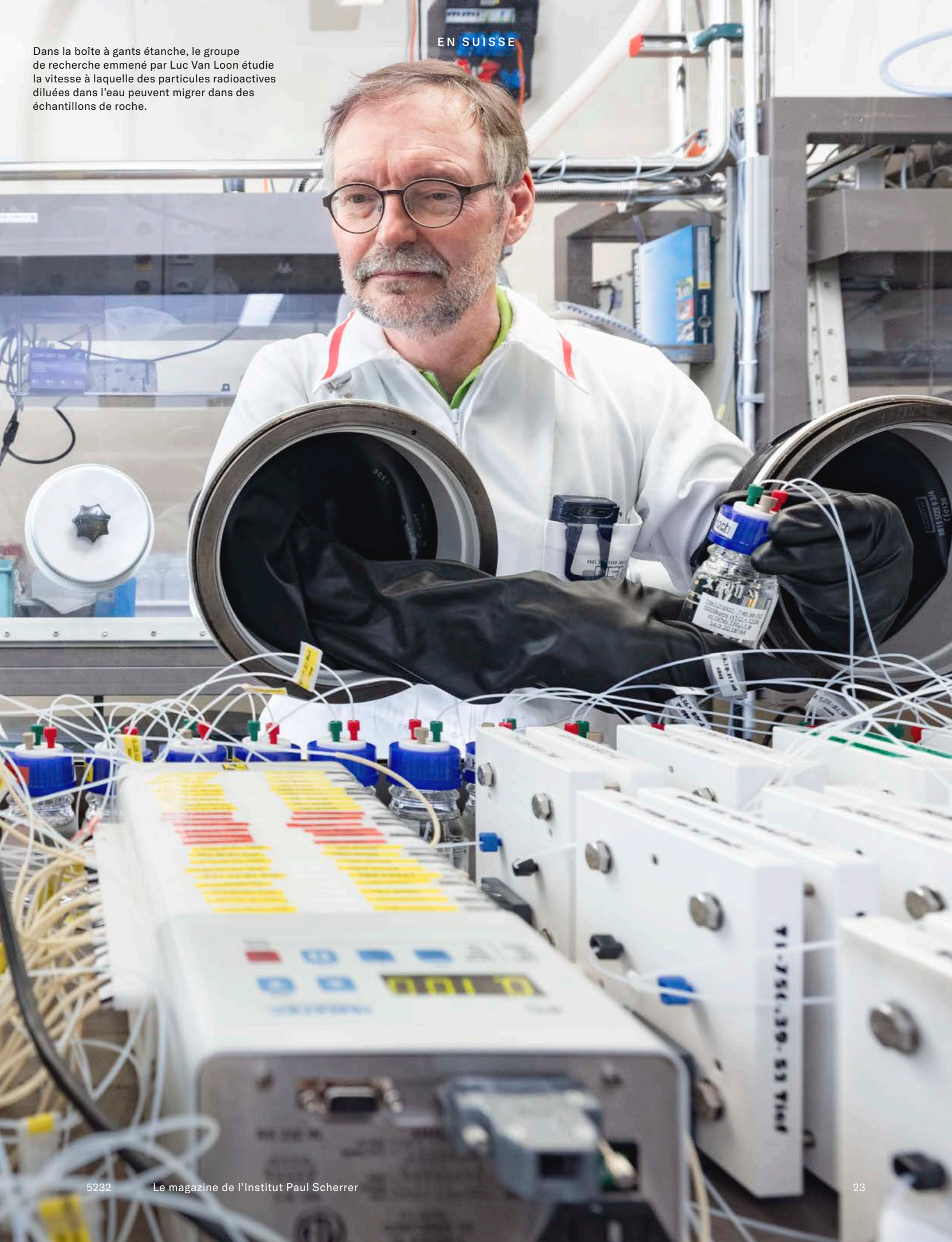
# Stockés en toute sécurité pour un million d'années

La Suisse prévoit de construire, d'ici 2050, un dépôt en couches géologiques profondes pour ses déchets radioactifs. Trois sites entrent en ligne de compte pour l'instant. Les chercheurs du PSI sont en train d'identifier le plus adéquat.

Texte: Brigitte Osterath



Dans la boîte à gants étanche, le groupe de recherche emmené par Luc Van Loon étudie la vitesse à laquelle des particules radioactives diluées dans l'eau peuvent migrer dans des échantillons de roche.



Maria Marques glisse ses mains dans une paire de gants en caoutchouc noir. Ces derniers sont raccordés à un caisson étanche appelé boîte à gants, où elle peut analyser ses échantillons de roche sans que ces derniers entrent en contact avec l'air ambiant. «Les échantillons pourraient se modifier, explique la géochimiste. Et cela, nous voulons l'empêcher à tout prix.»

Les échantillons – que l'équipe emmenée par Maria Marques, à la division de recherche Energie nucléaire et sûreté du PSI, étudie en ce moment – proviennent du forage profond Trüllikon-1. Sis à environ 30 kilomètres au nord-est de Zurich, Trüllikon se trouve sur l'un des trois sites que la Confédération considère comme potentiellement appropriés à un dépôt en couches géologiques profondes (avec le Jura-Est près de Brugg et le Nord des Lägern au nord-ouest de Zurich). En août 2019 et en avril 2020, la Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs (Nagra) y a prélevé des carottes en forant jusqu'à une profondeur de 1300 mètres. L'argile à Opalinus revêt un intérêt tout particulier: il s'agit d'une couche située à plusieurs centaines de mètres de profondeur. Mais les chercheurs soumettent aussi les formations rocheuses encaissantes, qui se trouvent au-dessus et au-dessous, à un examen détaillé.

Maria Marques saisit une éprouvette remplie de liquide, au fond de laquelle un solide gris foncé s'est déposé sous forme de sédiment. «Ça, c'est de l'argile à Opalinus», explique la chercheuse. Elle ajoute un liquide incolore, une solution fortement diluée de nickel radioactif, et met l'éprouvette dans un agitateur. «Nous voulons savoir dans quelle mesure l'argile fixe les particules radioactives, poursuit-elle. Plus l'argile fixe les particules, mieux elle convient comme roche d'accueil dans un dépôt en couches géologiques profondes.» Avec d'autres échantillons, la suspension est maintenant mélangée en continu pendant trois jours.

### Ancien fond marin

L'argile à Opalinus est apparue il y a 173 millions d'années. Une mer peu profonde recouvrait alors le nord-ouest de la Suisse et les pays avoisinants. Une fine boue argileuse s'est déposée au fond et durcie pour former une couche d'une centaine de mètres d'épaisseur. De nombreuses analyses ont montré que l'argile à Opalinus était la roche la plus indiquée pour stocker des déchets radioactifs.

Les centrales nucléaires en exploitation génèrent des radionucléides. Il s'agit de particules radioactives qui doivent être stockées loin de l'être humain et de l'environnement, jusqu'à ce qu'elles se soient en majeure partie désintégrées. Cela peut durer un million d'années. Les fûts en acier dans lesquels les déchets sont enfermés n'offrent qu'une protection relativement courte, explique Sergey Churakov, responsable du laboratoire Sûreté des dépôts de déchets radio-

## «Jusqu'ici, tout coïncide bien.»

Luc Van Loon, chef de groupe à la division de recherche Energie nucléaire et sûreté du PSI

actifs: «On s'attend à ce qu'ils soient complètement rouillés d'ici dix mille ans environ», rappelle-t-il. Les radionucléides pourraient alors entrer en contact avec l'eau présente dans la roche et se diffuser lentement à travers le sol. L'argile à Opalinus est censée empêcher cette migration en jouant le rôle de barrière naturelle entre l'eau et les radionucléides.

L'argile à Opalinus est constituée de petites plaquettes microscopiques, mille fois plus minces qu'un cheveu humain. En raison de sa structure moléculaire, les radionucléides s'accrochent facilement à sa surface ou forment des liaisons chimiques. «L'argile à Opalinus les attire comme un aimant», souligne Sergey Churakov. Par ailleurs, cette roche ne laisse pratiquement pas passer l'eau.

### Plus il y a d'argile, mieux c'est

C'est le plan sectoriel «Dépôts en couches géologiques profondes» qui règle la recherche du site. Actuellement, la Suisse est dans la troisième étape, qui prévoit l'évaluation des trois sites candidats par le biais de forages profonds afin de déterminer lequel convient le mieux. Andreas Pautz, professeur de génie nucléaire et directeur de la division de recherche Energie nucléaire et sûreté au PSI, est optimiste: «En Suisse, avec l'argile à Opalinus, nous disposons d'une roche d'accueil adéquate. En termes de technologie, un dépôt en couches géologiques profondes est donc réalisable et, de ce fait, extrêmement sûr.»

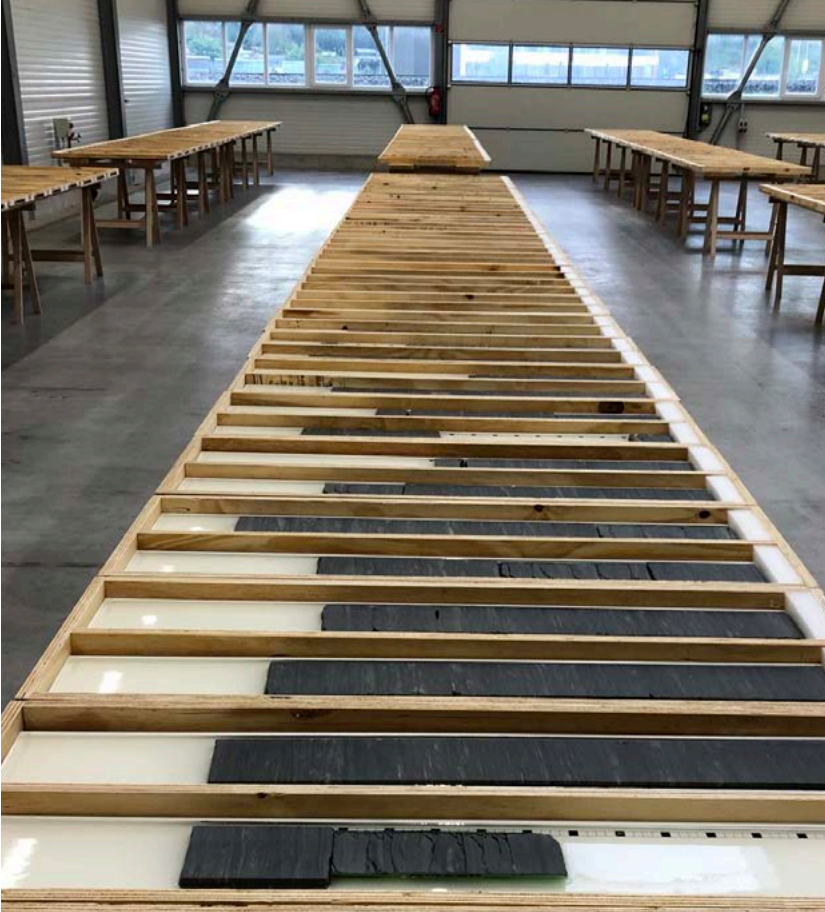
C'est à présent aux chercheurs d'examiner sous toutes les coutures les roches présentes sur les trois sites – en ce qui concerne leur composition et leurs propriétés – et d'évaluer à quel point elles seraient adéquates. Des minéralogistes de l'Université de Berne analysent la composition des carottes et envoient des échantillons dans des emballages sous vide, hermétiquement étanches, pour d'autres mesures au PSI.

### Compter les sièges

Après que les suspensions d'échantillons ont été brassées pendant trois jours, Maria Marques les fait tourner dans une centrifugeuse, à une vitesse telle que tous les solides se déposent au fond.

Puis les chercheurs déterminent la radioactivité des solutions: autrement dit, le nombre d'atomes qui se désintègrent par seconde. Plus l'échantillon d'argile fixe de radionucléides, moins ces derniers sont décelables





Ses carottes de forage (à gauche) permettent à la Nagra d'explorer les profondeurs du sol jusqu'à 1500 mètres et d'en sonder ainsi les propriétés. Des inclusions, notamment, peuvent alors apparaître (à droite).



dans la solution. La différence entre la valeur initiale et la valeur obtenue au bout de trois jours permet aux chercheurs de calculer le pouvoir d'adsorption de la roche. «Imaginons que les radionucléides soient le public dans une salle de concert: ce que nous faisons consiste à compter le nombre de sièges qui pourraient accueillir toutes ces personnes», explique Maria Marques. Celles qui sont déjà assises correspondent aux particules radioactives qui se sont fixées à l'argile. Celles qui n'ont pas trouvé de siège restent dans le liquide.

#### Attendre la percée

Un autre groupe au PSI mesure la rapidité à laquelle les radionucléides présents dans l'eau peuvent progresser à travers la roche. Dans un dépôt en couches géologiques profondes, il faudrait que cela se fasse aussi lentement que possible. Pour les essais, l'Université de Berne envoie à Villigen des coupes transversales, scellées avec de la résine au niveau des surfaces extérieures.

L'ingénieur Luc Van Loon, chef du groupe de recherche Processus de diffusion au PSI, fixe un de ces disques gris foncé entre deux plaques, dans un dispositif semblable à un étai. Des tuyaux partent à droite et à gauche. Au-dessus, le disque est sans cesse arrosé de liquide: à gauche, avec une solution contenant des radionucléides; à droite, avec la même solution sans radionucléides.

A plusieurs reprises, à quelques jours d'intervalle, des collaborateurs collectent des échantillons afin de déterminer le temps qu'il faut aux radionucléides pour

traverser le disque. «Nous appelons cela la "percée"», explique Luc Van Loon. L'expérience peut prendre trois mois.

#### Réalité versus modèles informatiques

Mais les modèles informatiques – qui simulent sur une longue période ce qui se passe dans le dépôt en couches géologiques profondes – sont tout aussi importants que les données de mesure provenant des analyses de laboratoire. «Nous parlons ici de plus d'un million d'années», explique Sergey Churakov. Une donnée que l'on ne peut pas reproduire en laboratoire.

Depuis plus de vingt ans, les chercheurs du PSI mettent tout en œuvre pour simuler sur ordinateur l'adsorption et la diffusion de l'eau comme des radionucléides dans l'argile à Opalinus. Des données issues de mesures menées à la Source de Lumière Suisse SLS, une grande installation de recherche du PSI, alimentent le modèle avec des informations détaillées. Par exemple: où les radionucléides se déposent-ils dans l'argile?

Les chercheurs ajustent constamment les données issues de leurs expériences en laboratoire en fonction de celles issues des simulations, mais aussi des résultats provenant d'essais de terrain dans des laboratoires souterrains. «Il faut que les résultats des expériences et ceux des simulations coïncident, souligne Luc Van Loon. Et jusqu'ici, tout coïncide bien.» D'ici fin 2029, un choix sera arrêté, et un ou plusieurs sites pour les déchets radioactifs en Suisse seront définitivement sélectionnés. ◆

# Actualité de la recherche au PSI

## 1 La froide mémoire de la Terre

En septembre 2020, des chercheurs du Laboratoire de chimie de l'environnement ont entrepris une expédition au glacier du Grand Combin, situé dans le canton du Valais. Leur objectif et celui de leurs collègues italiens étaient d'y prélever des carottes de glace à 4100 mètres d'altitude pour le projet international Ice Memory. Ce dernier prévoit de réunir des carottes de glace extraites des glaciers du monde entier et d'assurer leur conservation dans une grotte de glace artificielle, en Antarctique central, où le froid est garanti. Mais, en raison de l'avancement de la fonte du glacier, les scientifiques ont dû abandonner cette entreprise. Qu'ils y aient été contraints constitue un enseignement important: il se pourrait que la plupart des glaciers soient déjà trop affectés par la fonte des glaces pour être en mesure de fournir des échantillons adéquats pour Ice Memory. Actuellement, des tests sont en cours au PSI pour voir si les carottes de glace de 17 mètres, que les chercheurs ont réussi à prélever pendant l'expédition, peuvent fournir des données valides.

Informations complémentaires:  
<http://psi.ch/fr/node/41341>

**80** mètres: c'est la profondeur que les forages devraient atteindre.

**10 000** ans: c'est la datation à laquelle les forages permettraient de remonter dans l'histoire climatique.

**-54° C**: c'est la température moyenne qui règne là où l'archive de glace doit être mise en place en Antarctique.

## 2 Médicaments contre le Covid-19

Quelle structure doivent présenter les principes actifs capables de neutraliser le coronavirus SARS-CoV-2? Des chercheurs de l'Institut Paul Scherrer PSI se penchent sur cette question en coopération avec des groupes de recherche du monde entier. Ils utilisent une méthode relativement nouvelle pour vérifier si des fragments de molécules se lient à certaines protéines importantes du coronavirus. Ces fragments sont typiques de principes actifs prometteurs mais beaucoup plus petits que les composés proprement dits, qui pourraient un jour être mis sur le marché en tant que tels. Les chercheurs laissent une solution de fragments imprégner des cristaux de protéines, avant de les radiographier à la Source de Lumière Suisse SLS. Cela leur permet de voir si les fragments se sont liés à la protéine, mais aussi de quelle manière ils l'ont fait. A partir de ces nombreuses informations, ils espèrent trouver une réponse au sujet du profil potentiel d'un médicament efficace.

Informations complémentaires:  
<http://www.psi.ch/fr/node/37261>

## 3 Thérapie ultrarapide contre le cancer

Au Centre de protonthérapie de l'Institut Paul Scherrer PSI, des chercheurs ont testé pour la première fois une irradiation protonique ultrarapide et fortement dosée. Cette nouvelle méthode expérimentale FLASH pourrait révolutionner le traitement du cancer par radiothérapie et épargner aux patients de nombreuses semaines de traitement. Avec FLASH, la dose d'irradiation par seconde est environ 100 fois plus élevée que lors de traitements conventionnels. Cela détruit les cellules cancéreuses de manière très efficace. Toutefois, les chercheurs du PSI doivent encore déterminer si cette méthode lèse les tissus sains de l'organisme. Ils ont mené deux séries d'expériences avec la technique FLASH sur des embryons de poissons-zèbres âgés de 24 heures. L'impact de l'irradiation FLASH sur les cellules a été ensuite analysé au Centre hospitalier universitaire vaudois. C'est un nouveau chapitre de l'histoire de la protonthérapie qui s'annonce.

Informations complémentaires:  
<http://psi.ch/fr/node/39583>

## 4 Nano-tourbillons sous contrôle

Afin de stocker à l'avenir des quantités de données plus importantes dans un espace encore plus restreint ou bien de les lire et de les traiter de manière plus efficace, les chercheurs s'intéressent aux toutes petites structures magnétiques de certains matériaux. Parmi celles-ci figurent les dénommés «skyrmions», qui sont des nano-tourbillons des spins d'un matériau. Les spins sont comme de minuscules bâtonnets magnétiques; ils représentent le magnétisme au niveau des atomes. Jusqu'ici, on n'avait connaissance que de skyrmions présents dans des matériaux ferromagnétiques. Des chercheurs du PSI viennent de réussir une première: produire des skyrmions antiferromagnétiques et démontrer leur existence grâce à la diffusion de neutrons à la source de neutrons de spallation SINQ. Le terme «antiferromagnétique» signifie que des spins voisins sont orientés dans des directions antiparallèles. Autrement dit, un spin pointe vers le haut et le suivant vers le bas. Les chercheurs du PSI ont retrouvé par la suite, à l'intérieur de chaque skyrmion, ce qui était, au départ, une propriété du matériau: dans ces tourbillons, certains composants décisifs étaient orientés en sens inverse les uns par rapport aux autres. Les skyrmions antiferromagnétiques ont pour avantage de se laisser beaucoup plus simplement contrôler que leurs «collègues» ferromagnétiques: si l'on applique un courant électrique, ils se déplacent en ligne droite. Leur découverte représente donc une étape importante vers des applications potentielles, dont, par exemple, des ordinateurs plus performants.

Informations complémentaires:  
<http://psi.ch/fr/node/39430>

Les protons utilisés au Centre de protonthérapie pour traiter les patients atteints de cancer déploient leurs effets en profondeur au sein des cellules cancéreuses. Serena Psoroulas – ici dans l'ancienne salle de traitement de la Gantry 1 – étudie comment améliorer encore ce traitement par de nouvelles méthodes. Pendant ses loisirs, elle explore aussi des profondeurs inconnues, car elle est passionnée de plongée sous-marine et de snorkling. De préférence dans les régions tempérées de la Méditerranée.



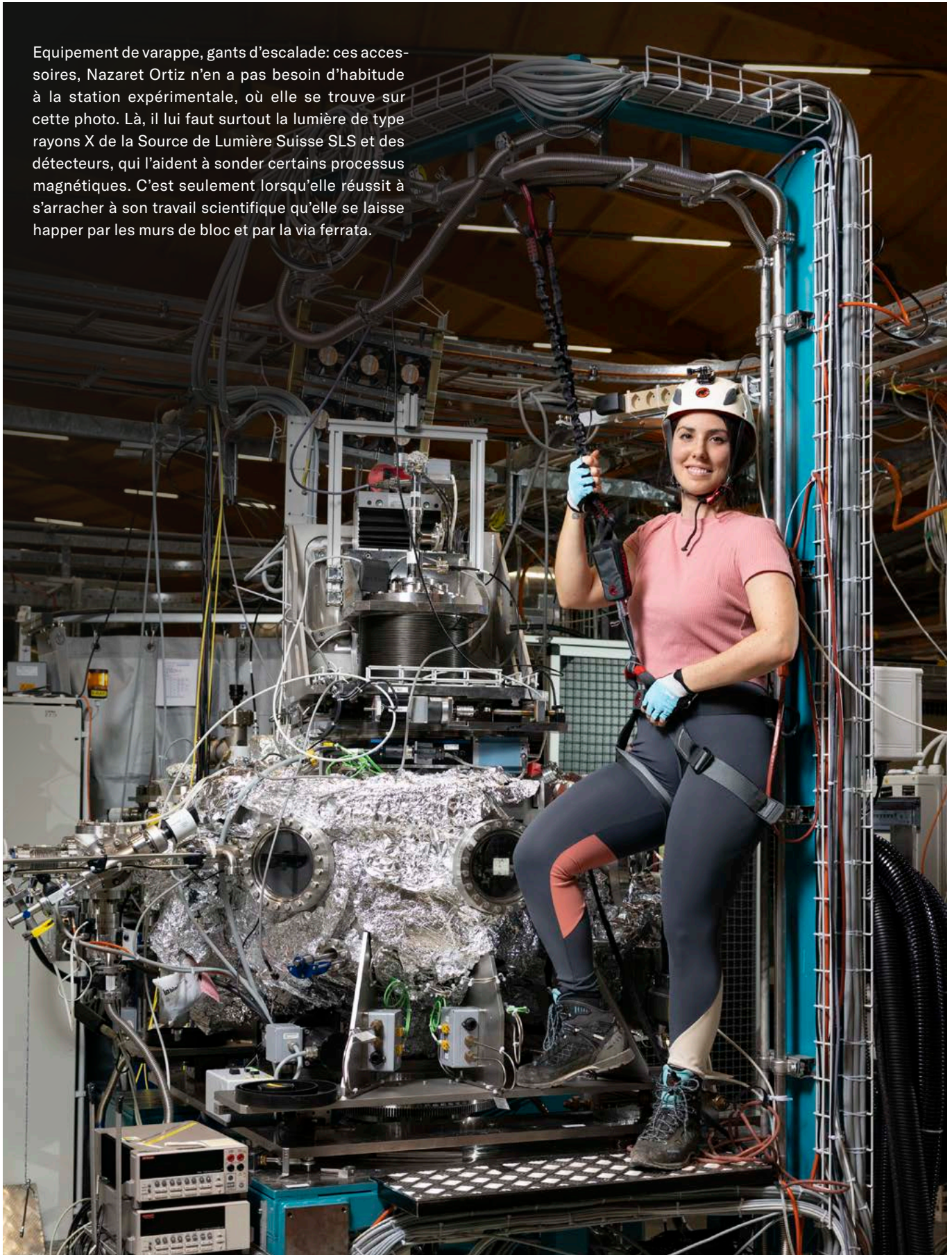
# Des chercheurs sportifs

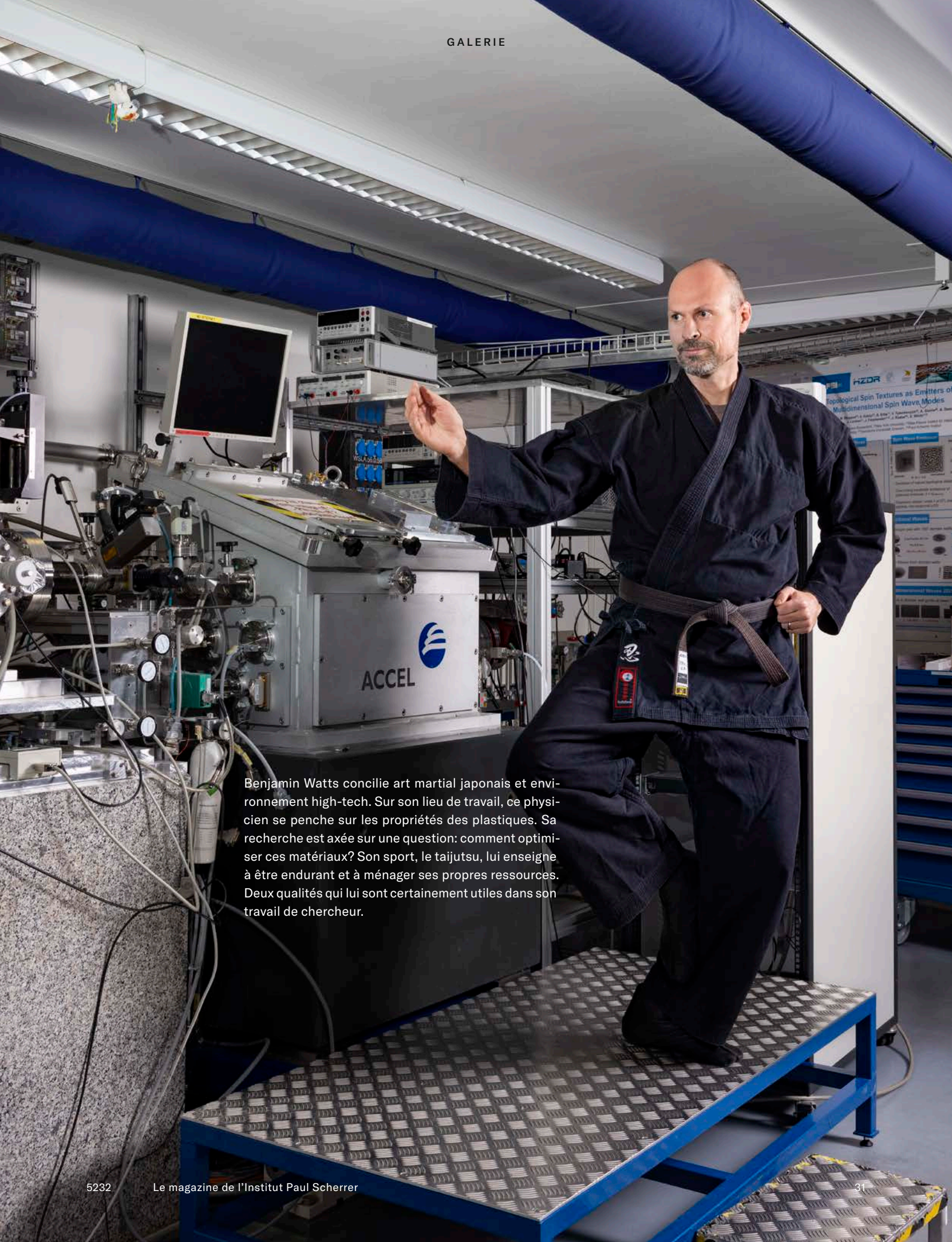
GALERIE

En science et dans la recherche, il faut faire preuve d'endurance, de courage, de combativité et surtout de curiosité. Des qualités également indispensables dans le domaine du sport – qu'il s'agisse de faire de la compétition ou de pratiquer une activité physique pour la santé et le bien-être. Piqués par la curiosité, nous avons demandé aux chercheurs du PSI: quel est le sport pratiqué pendant vos loisirs? Les réponses obtenues se sont révélées surprenantes...

Texte: Christian Heid

Équipement de varappe, gants d'escalade: ces accessoires, Nazaret Ortiz n'en a pas besoin d'habitude à la station expérimentale, où elle se trouve sur cette photo. Là, il lui faut surtout la lumière de type rayons X de la Source de Lumière Suisse SLS et des détecteurs, qui l'aident à sonder certains processus magnétiques. C'est seulement lorsqu'elle réussit à s'arracher à son travail scientifique qu'elle se laisse happer par les murs de bloc et par la via ferrata.





Benjamin Watts concilie art martial japonais et environnement high-tech. Sur son lieu de travail, ce physicien se penche sur les propriétés des plastiques. Sa recherche est axée sur une question: comment optimiser ces matériaux? Son sport, le taijutsu, lui enseigne à être endurant et à ménager ses propres ressources. Deux qualités qui lui sont certainement utiles dans son travail de chercheur.

Pour Benedikt Hermann, il est très facile de représenter certaines interrelations extrêmement complexes, notamment dans son domaine de spécialité, la technologie des accélérateurs. Il travaille à la mise au point d'une nouvelle technologie qui permettra de plonger, à l'aide d'un nouvel instrument, dans les ultimes profondeurs de l'univers. Ce sont aussi de profondes vallées qu'il aime découvrir grâce à son sport, le parapente: il a déjà plané sans effort, pendant son temps libre, depuis de nombreux sommets alpins jusqu'en vallée, pour un atterrissage de précision.







Tigran Rostomyan ne perd jamais de vue son objectif: déterminer le rayon du proton avec plus de précision que tous les chercheurs avant lui, en utilisant des électrons et des muons. Ses travaux scientifiques exigent concentration et endurance. Des qualités dont il sait faire preuve en tant que boxeur, comme en témoigne son titre de champion de Belgique dans la catégorie poids super-lourds.



# Polyglotte, structurée et orientée «solution»

Carolina Arboleda Clavijo est arrivée en Suisse voici dix ans. Au PSI, avec ses recherches, elle a apporté une importante contribution à la détection précoce du cancer du sein. Aujourd'hui, elle dispense – en cinq langues et dans toute l'Europe – des formations au logiciel MATLAB pour l'entreprise Mathworks.

Texte: Christina Bonanati

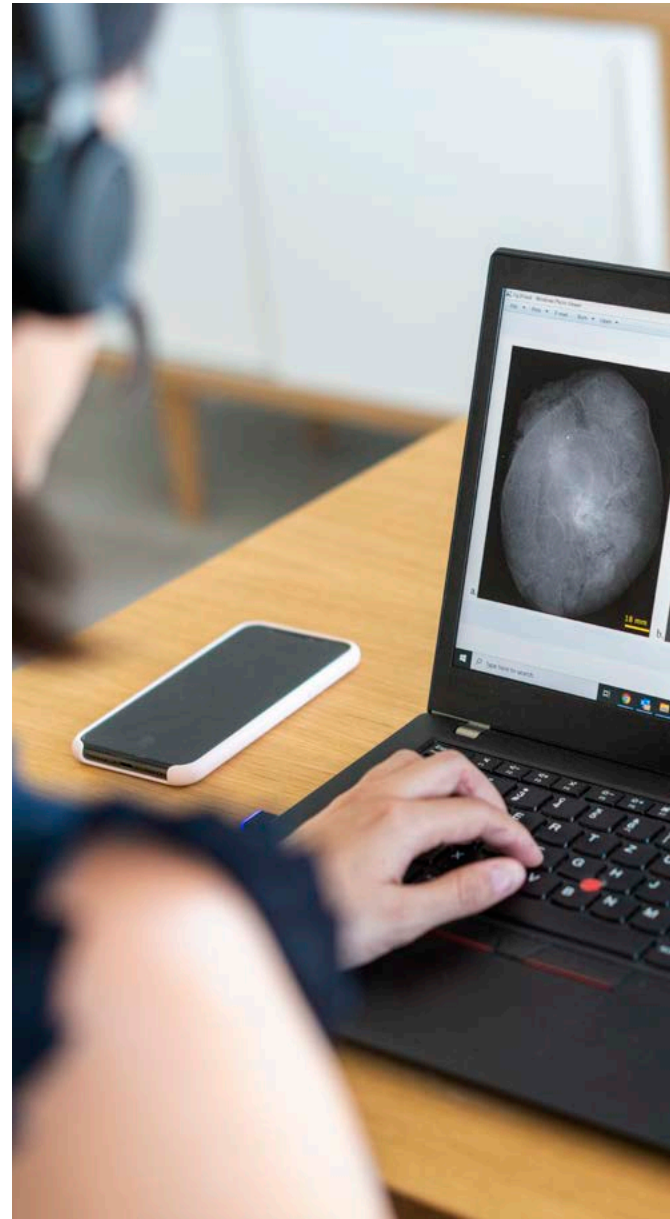
Sa carrière a beau avoir été des plus diversifiées et palpitantes, Carolina Arboleda Clavijo a toujours aimé travailler de manière structurée. Le logement en attique de cette Colombienne de 33 ans est d'ailleurs tout en lignes claires. C'est là, à Olten, qu'elle vit avec son compagnon, colombien lui aussi et ancien collègue au PSI. Leur logement, qui est aussi leur bureau, s'articule en espaces épurés et ordonnés. Carolina Arboleda Clavijo se concentre sur ce qui se trouve derrière l'écran de son ordinateur portable: des solutions de tâches mathématiques. L'an dernier, elle sillonnait l'Europe pour enseigner le logiciel MATLAB. Mais, depuis la pandémie de SARS-CoV-2, elle dispense ses cours en ligne depuis chez elle et n'est que rarement dans son bureau, chez Mathworks, à Berne.

## Ne pas avoir peur de demander

Carolina Arboleda Clavijo démarre ses études en technologies biomédicales en Colombie, en 2004. «J'ai toujours trouvé absolument passionnant de scruter le corps humain», s'enthousiasme-t-elle avec un large sourire. Au neuvième semestre, alors qu'on attend d'elle qu'elle trouve un stage, elle envoie des e-mails en masse à des professeurs-chercheurs spécialisés dans le domaine de l'imagerie médicale aux Etats-Unis. Norbert Pelc, à l'époque professeur de radiologie à l'Université Stanford, lui répond. «Norbert m'a prouvé qu'il était possible d'évoluer dans les deux univers, l'industrie et la recherche, tout en restant bon, raconte-t-elle aujourd'hui. J'ai appris à travailler de manière

structurée à son contact.» Durant cette période en Californie, Carolina Arboleda Clavijo fait de la recherche sur une méthode qui vise à mieux déterminer l'étendue de l'artériosclérose en recourant à la tomographie aux rayons X. De retour en Colombie, elle développe, avec des collègues étudiants, une interface cerveau-machine pour permettre aux personnes handicapées qui seraient incapables d'utiliser un clavier d'accéder à la saisie numérique.

A 22 ans, on lui recommande d'aller poursuivre ses études de master à l'ETH Zurich. Carolina Arboleda Clavijo aimerait bien découvrir l'Europe et y séjourner plus durablement. Mais les frais de scolarité pour ses études dans une université privée ont pratiquement épuisé les ressources financières de ses parents. Histoire de gagner du temps et de l'argent, elle met alors le cap sur le Chili. Elle y conçoit un avantageux bouton de réaction fondé sur de la fibre optique, lequel permet de caractériser – de manière expérimentale et par recours à l'imagerie par résonance magnétique – les modifications dans le cerveau d'enfants atteints du trouble de déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH). Alors qu'elle pensait que ses chances étaient très minces, elle décroche une bourse fédérale suisse qui lui permet de déménager à Zurich. Elle retient l'attention de Marco Stampanoni, qui lui fait passer un examen et qui lui propose de réaliser son master au sein de son groupe de travail, le Laboratoire de macromolécules et de bio-imagerie du PSI, où une nouvelle méthode de détection précoce du cancer du sein est en développement. «Les microcalcifications



«Il est possible d'évoluer dans les deux univers, l'industrie et la recherche, tout en restant bon.»

Carolina Arboleda Clavijo, Senior Training Engineer, Mathworks

bénignes et malignes peuvent être distinguées les unes des autres selon la manière dont elles dispersent la lumière de type rayons X, explique Carolina Arboleda Clavijo. C'est ce principe qu'exploite la mammographie avec contraste de phase.» La tâche qu'on lui confie consiste à combiner, au niveau mathématique, les trois images obtenues et à en réduire le bruit.

De retour au Chili pour un nouvel emploi d'un an, Carolina Arboleda Clavijo envisage de commencer des études de médecine. Mais lorsqu'elle demande une lettre de recommandation à Marco Stampanoni, ce dernier a déjà d'autres projets pour elle: «L'idée était d'intégrer l'interférométrie à réseaux dans un appareil de mammographie conventionnel du fabricant Philips, de sorte à pouvoir utiliser la nouvelle méthode.» Pour sa thèse de doctorat, Carolina Arboleda Clavijo simule le comportement des ondes de type rayons X à l'aide du logiciel MATLAB et teste l'appareillage en projet sur des échantillons de tissus mammaires afin de trouver les bons paramètres pour la grille ultrafine d'or et de silicium utilisée. La perspective d'un usage pratique de cet appareil à l'hôpital la motive à poursuivre cette recherche en tant que postdoc: «J'ai trouvé passionnant de découvrir le processus de test d'un appareil innovant sur l'être humain, confie-t-elle. Les arbitrages éthiques que cela soulève ont représenté, pour moi, une expérience toute nouvelle.»

#### Le plurilinguisme ouvre des portes

Mais, après presque six ans au PSI, Carolina Arboleda Clavijo a voulu connaître le monde de l'économie: «Ma philosophie a toujours été la suivante: je ne peux pas dire qu'une chose me déplaît, sans l'avoir essayée», souligne-t-elle.

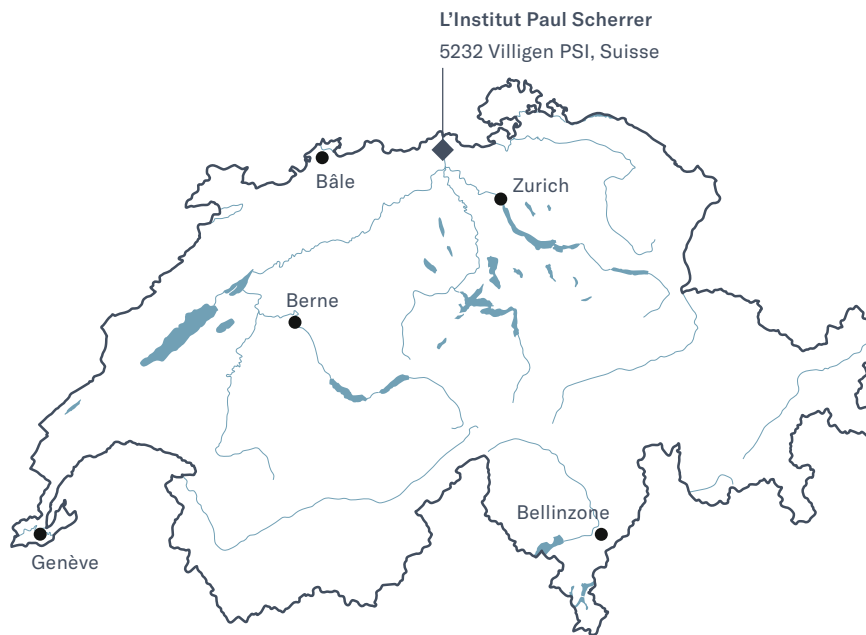
Début 2019, elle se voit proposer le poste de Senior Training Engineer chez Mathworks. «J'ai toujours eu beaucoup de plaisir à enseigner.» C'est une activité en phase avec sa voix puissante et son attitude franche et sincère. Depuis lors, elle explique aux collaborateurs d'entreprises situées dans toute l'Europe les applications du logiciel de mathématiques MATLAB dans des domaines comme le Deep Learning ou le Machine Learning. Cet outil, elle l'a utilisé pendant douze ans au cours de ses recherches, mais elle pourrait encore en apprendre quelque chose. Ses connaissances linguistiques l'ont aussi aidée à décrocher ce nouveau poste. La Colombienne a toujours aimé apprendre des langues. Enfant, elle y consacrait déjà régulièrement ses samedis. Elle a appris l'anglais à l'âge de 8 ans, puis le français et enfin l'italien, même si son père considérait que c'était inutile. «Je n'ai jamais eu peur de parler. Pour moi, ce n'est pas grave de faire des fautes.» Un état d'esprit qui lui a servi dans l'apprentissage de l'allemand.

Est-ce que la recherche lui manque? «Mathworks est une entreprise très académique et moi-même, je suis dans le département académique», répond Carolina Arboleda Clavijo. Et même si elle évolue désormais dans le monde de l'économie, elle a parfois l'impression d'être encore dans la recherche. Par exemple, lorsqu'on lui demande des exemples d'application pour un cours en ligne où les clients se forment à leur propre rythme dans le domaine du traitement de l'image. «J'ai plus de plaisir avec les tâches techniques, mais je trouve aussi que le marketing et les aspects psychologiques sont intéressants.» Carolina Arboleda Clavijo préfère l'environnement rapide et dynamique de son nouvel emploi: «Dans l'univers académique, tout est très lent, explique-t-elle. On fait, on essaie, mais il faut du temps avant d'obtenir un résultat. Alors que, dans le monde des affaires, c'est différent: vient un moment où l'on doit avoir fini.» Evidemment, il ne se passe pas autant de choses dans son petit bureau de Berne qu'au PSI, avec ses grandes installations de recherche et où l'on peut aller en pause dans la forêt ou au cours de yoga. Mais elle trouve passionnant de communiquer avec des personnes venues de cultures différentes et de se rendre dans des localités portant des noms aux sonorités étranges. Carolina Arboleda Clavijo est très heureuse dans sa nouvelle situation. Ses nombreux centres d'intérêt, son sens de l'initiative et son courage l'ont certainement aidée. «C'est une chose que j'ai apprise de ma mère, qui n'avait jamais peur de demander, confie-t-elle en riant. Sa philosophie de vie était la suivante: "Tu n'as qu'à demander et, si les gens te disent 'Non', c'est très bien aussi."» ♦

QUI SOMMES-NOUS ?

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





L'Institut Paul Scherrer  
5232 Villigen PSI, Suisse

5

grandes installations de recherche  
uniques en Suisse

800

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

5000

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

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

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

#### De grandes installations de recherche complexes

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

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

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

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

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

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

### **Nos trois principaux domaines de recherche**

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

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

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

veaux matériaux destinés à des applications techniques et médicales.

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

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

### **Les cerveaux derrière les machines**

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

## **IMPRESSUM**

**5232 – Le magazine de l'Institut Paul Scherrer**

Paraît trois fois par an.  
Numéro 1/2021 (janvier 2021)  
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,  
Monika Gimmel, Christian Heid,  
Dr. Laura Hennemann,  
Sebastian Jutzi (resp.),  
Dr. Brigitte Osterath

### **Traduction**

Catherine Riva

### **Correction**

Étienne Diemert

### **Design et direction artistique**

Studio HübnerBraun

### **Photos**

Scanderbeg Sauer Photography, sauf:  
Page 25: Nagra;  
Pages 26/27: Adobe Stock;  
Pages 34/36: Ruben Wyttenbach;  
Page 38: Institut Paul Scherrer/  
Markus Fischer.

### **Infographies**

illuteam, sauf:  
Pages 6/7: Daniela Leitner;  
Page 41: Institut Paul Scherrer/  
Claire Donnelly.

### **Pour en savoir plus du PSI**

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

**5232 est disponible sur Internet et peut être abonné gratuitement**

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

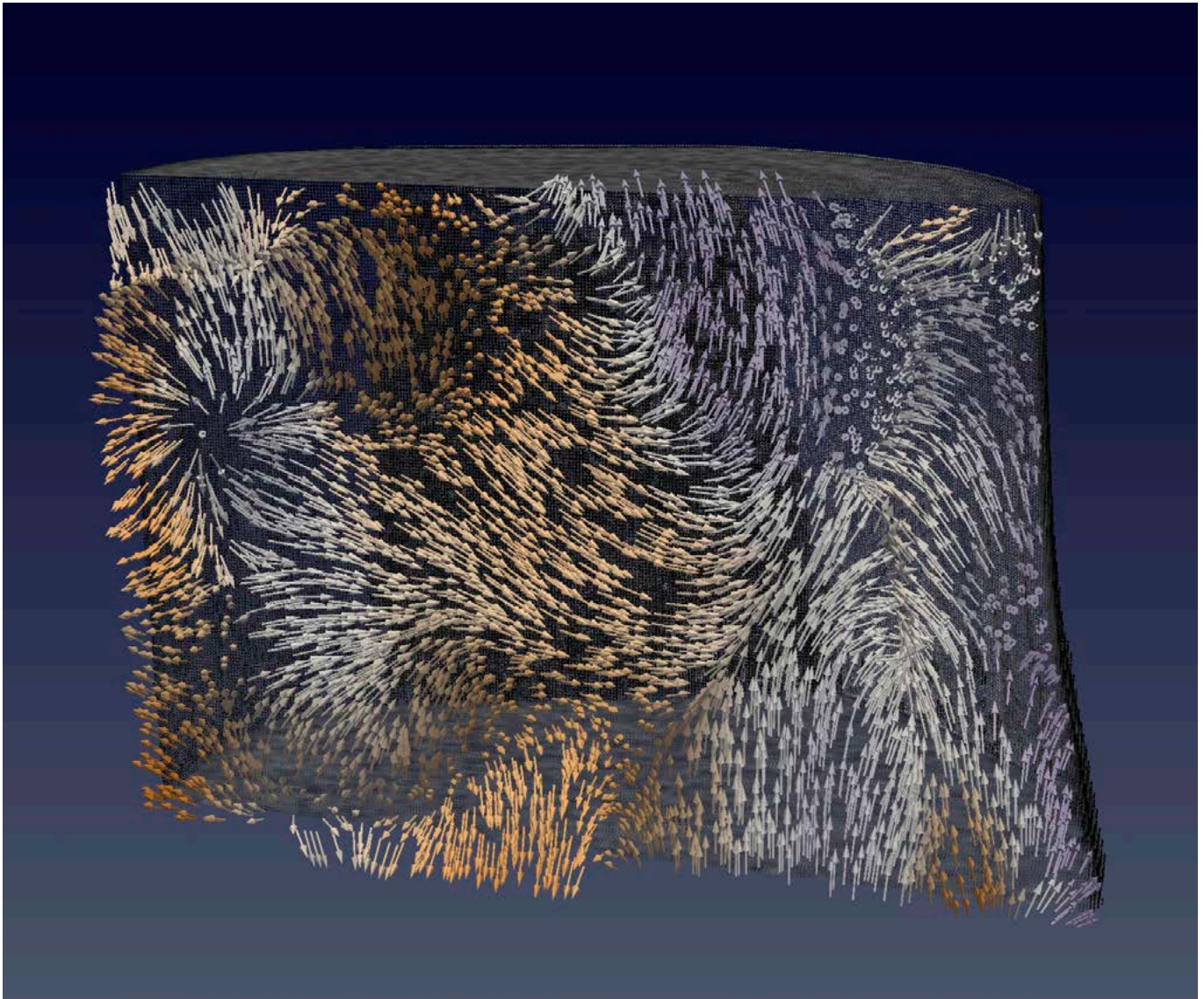
**5232 est également disponible en allemand**

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

PAUL SCHERRER INSTITUT

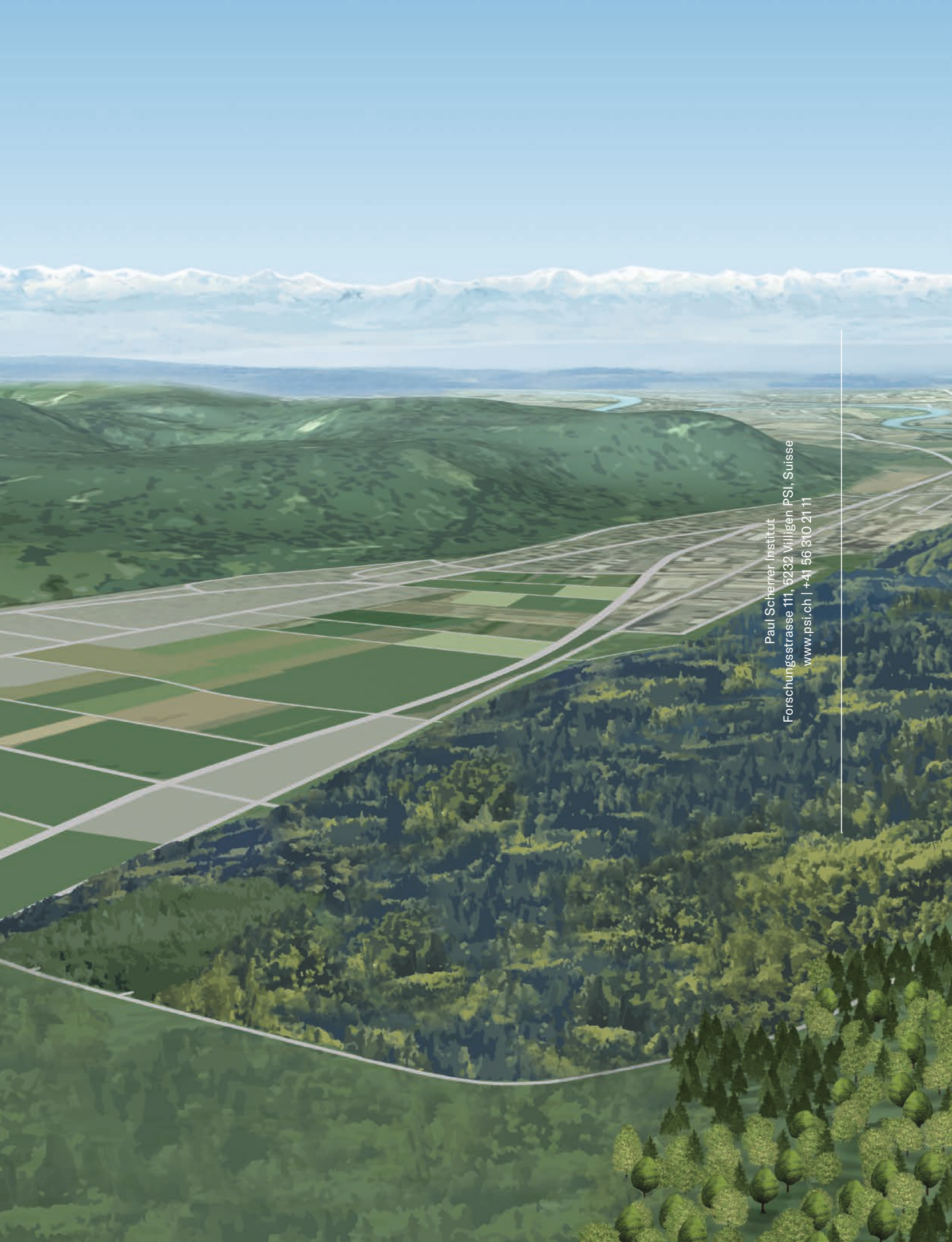






## Ce qui vous attend au prochain numéro

Ce sont des composants cruciaux des grandes installations de recherche du PSI. C'est grâce aux aimants que la Source de Lumière Suisse SLS, le SwissFEL et aussi l'accélérateur de protons amènent des particules élémentaires, comme les électrons ou les protons, à des vitesses extrêmement élevées. Seul moyen qui permette, d'un côté, d'inspecter la matière en profondeur jusqu'au niveau des atomes et, de l'autre, d'étudier le magnétisme. Afin de mieux comprendre cette force presque magique, des chercheurs du PSI tentent de résoudre ses dernières énigmes. Leurs résultats de recherche ouvrent de nouvelles possibilités à des applications inhabituelles, telles que des matériaux à mémoire de forme, des nanorobots intelligents manœuvrables par télécommande, qui pourraient par exemple être utilisés dans le domaine médical, ou encore des grilles logiques novatrices composées de nanoaimants qui pourraient rendre les ordinateurs encore plus compacts et performants.



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