

Le magazine de l'Institut Paul Scherrer PSI

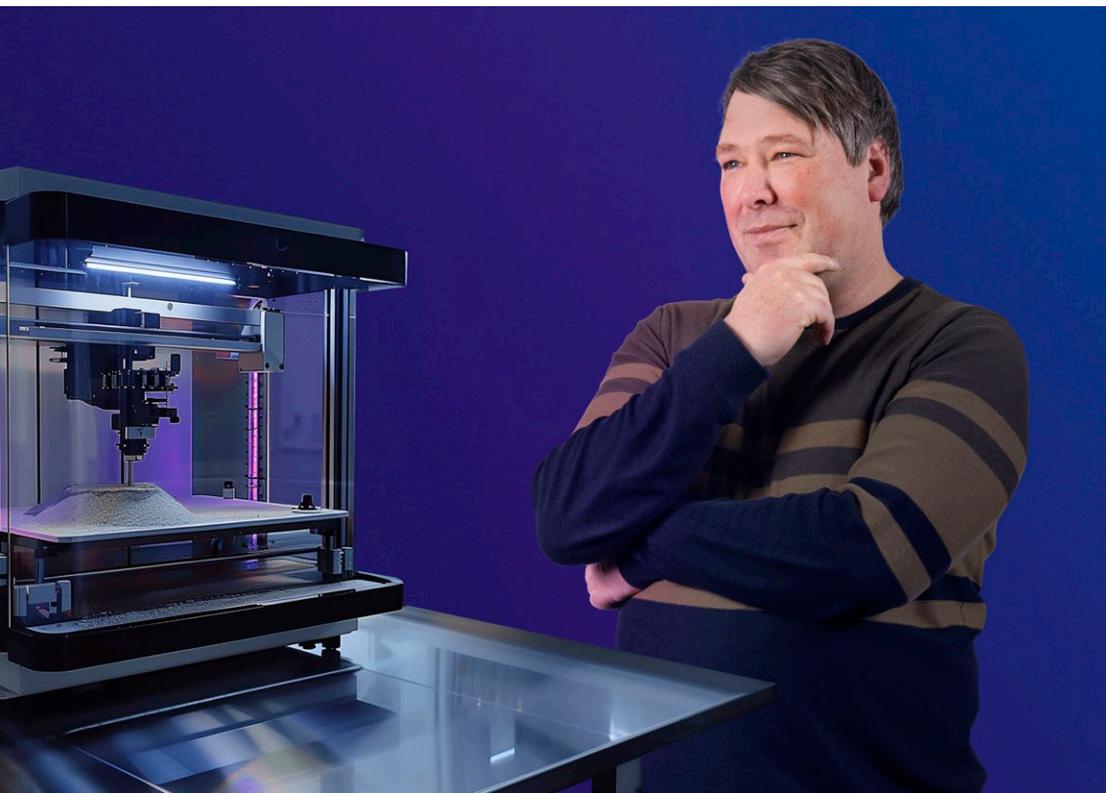
# Advanced Manufacturing l'avenir de la fabrication

5  
2  
3  
2

#1/2025



# Dossier: Advanced Manufacturing



Toile de fond

## Plus rapide, précise et fiable: la production et son avenir

Le terme de «fabrication avancée» (*advanced manufacturing*) désigne des méthodes de fabrication ultramodernes. Les scientifiques du PSI améliorent la fiabilité de ces technologies, comme l'impression 3D, et continuent de faire progresser la miniaturisation de puces à haute performance.

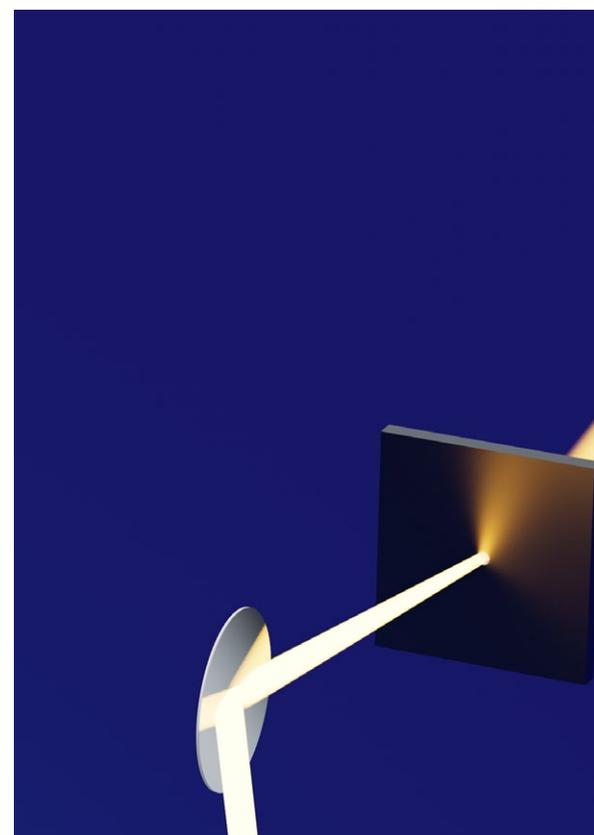
Page 10

Infographie

## La lumière: un outil pour les plus fines structures

Notre infographie vous montre comment les scientifiques du PSI s'y prennent pour graver les structures les plus fines sur une résine photosensible. Ce faisant, ils ont établi un record du monde.

Page 16



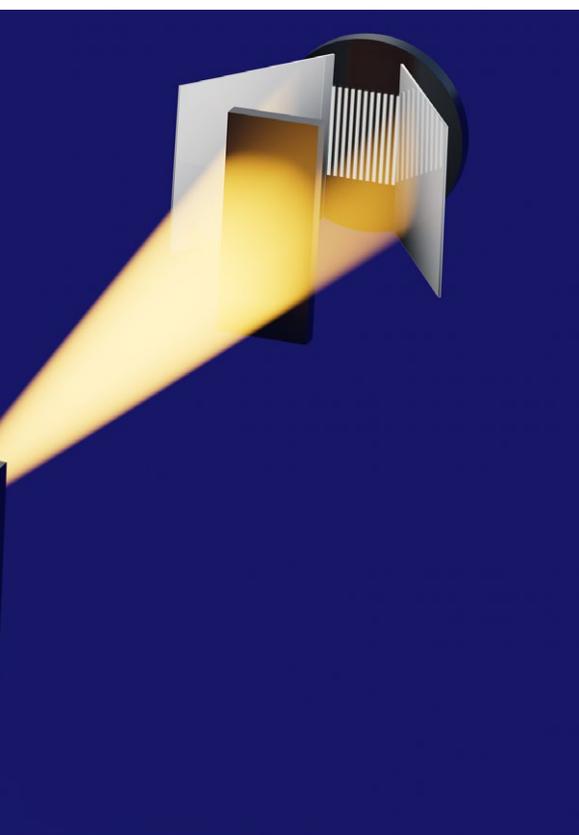


Entretien

## Quand la science rencontre l'industrie, l'innovation a de l'impact

Hans Priem et Cees Maris de l'entreprise VDL ETG nous expliquent ce que signifie la fabrication avancée dans l'industrie et évoquent la collaboration avec le PSI.

Page 18



### Contenu

Editorial

**Avancer et construire** 4

Quotidien

**Pareilles et nonpareilles** 6

Recherche

**De la lumière hélicoïdale pour distinguer les énantiomères** 7



Dossier

**Advanced Manufacturing** 8

Toile de fond

**Plus rapide, précise et fiable: la production et son avenir** 10

Infographie

**La lumière: un outil pour les plus fines structures** 16

Interview

**Quand la science rencontre l'industrie, l'innovation a de l'impact** 18

En image

**Connaissances quantiques appliquées** 21

En Suisse

**La recherche du PSI dans le musée le plus visité de Suisse** 22

L'initiative ES4T fait vivre la recherche énergétique au Musée suisse des transports et montre des voies possibles vers un avenir durable.

En bref

**Actualité de la recherche au PSI** 26

- 1 Les sources du smog à Beijing
- 2 L'ESA s'implante en Suisse
- 3 92 millions d'années
- 4 Nouveau record mondial de microscopie à rayons X

Galerie

**Kelvin: l'échelle du froid** 28

Un brouillard d'azote et de la lumière laser verte: le monde de la recherche sur le froid est photogénique.

Portrait

**Conseil en technologie de pointe** 34

Stephanie Smit, ancienne doctorante du PSI, travaille en tant que conseil en brevets chez ASML et protège des technologies révolutionnaires pour l'industrie des microprocesseurs.

**Qui sommes-nous?** 38

**Impressum** 40

**Dans le prochain numéro** 41

# Avancer et construire

La science est connue pour la minutie et la rigueur de son travail. L'industrie, elle, cherche des solutions concrètes pour satisfaire les besoins. Aujourd'hui, leur collaboration fait émerger de nouvelles technologies de fabrication: l'*advanced manufacturing* («fabrication avancée»). La technologie médicale, l'industrie aéronautique et aérospatiale, l'industrie optique et celle des semi-conducteurs, notamment, réclament des méthodes de production plus précises et efficaces.

A l'Institut Paul Scherrer PSI, nous développons justement des méthodes d'analyse innovantes au sein de nos grandes installations de recherche, qui sont uniques au monde. Nous faisons évoluer au même rythme nos grandes installations de recherche fondées sur les accélérateurs de particules: sur cette photo, je me tiens sur le couvercle de béton du tout nouvel anneau de stockage des électrons de la Source de Lumière Suisse SLS. Dans le cadre de notre projet de mise à niveau SLS 2.0, cette pièce maîtresse de l'installation a été complètement reconstruite afin que la SLS puisse bientôt fournir une lumière environ quarante fois plus brillante que par le passé.

L'impression 3D est un exemple bien connu de fabrication avancée. A la SLS, les scientifiques du PSI étudient, à l'aide d'imprimantes construites à cet effet, comment la microstructure des matériaux se modifie pendant le processus d'impression. Grâce aux connaissances obtenues, ils tentent d'améliorer ce procédé ainsi que les propriétés des matériaux.

Dans ce contexte, ANAXAM offre une interface concrète avec l'industrie. Ce centre de transfert de technologie met ses compétences analytiques à la disposition d'entreprises industrielles qui souhaitent effectuer des expériences et des mesures aux grandes installations de recherche. Or, il s'agit souvent d'optimiser des processus et des produits dans le domaine de la fabrication avancée. Dans ce numéro, vous découvrirez comment ANAXAM a pu, entre autres, épauler une entreprise de Würenlos et une autre de Winterthur.

Le Park Innovaare, inauguré en 2024 et sis à proximité du PSI, joue également un rôle de premier plan dans la présente édition. Outre ses laboratoires ultramodernes, ce site offre l'accès aux infrastructures de recherche du PSI. C'est ainsi que VDL ETG, partenaire de longue date du PSI, y a emménagé. À côté, la start-up d'une chercheuse du PSI développe une nouvelle méthode pour produire une sorte de peau électronique sensible – par exemple pour la pointe des doigts d'un robot.

Avancer et construire: voilà comment décrire ces coopérations entre le PSI et l'industrie. Ensemble, nous allons de l'avant et nous créons de nouvelles choses pour la société de demain.

Christian Rüegg, directeur du PSI





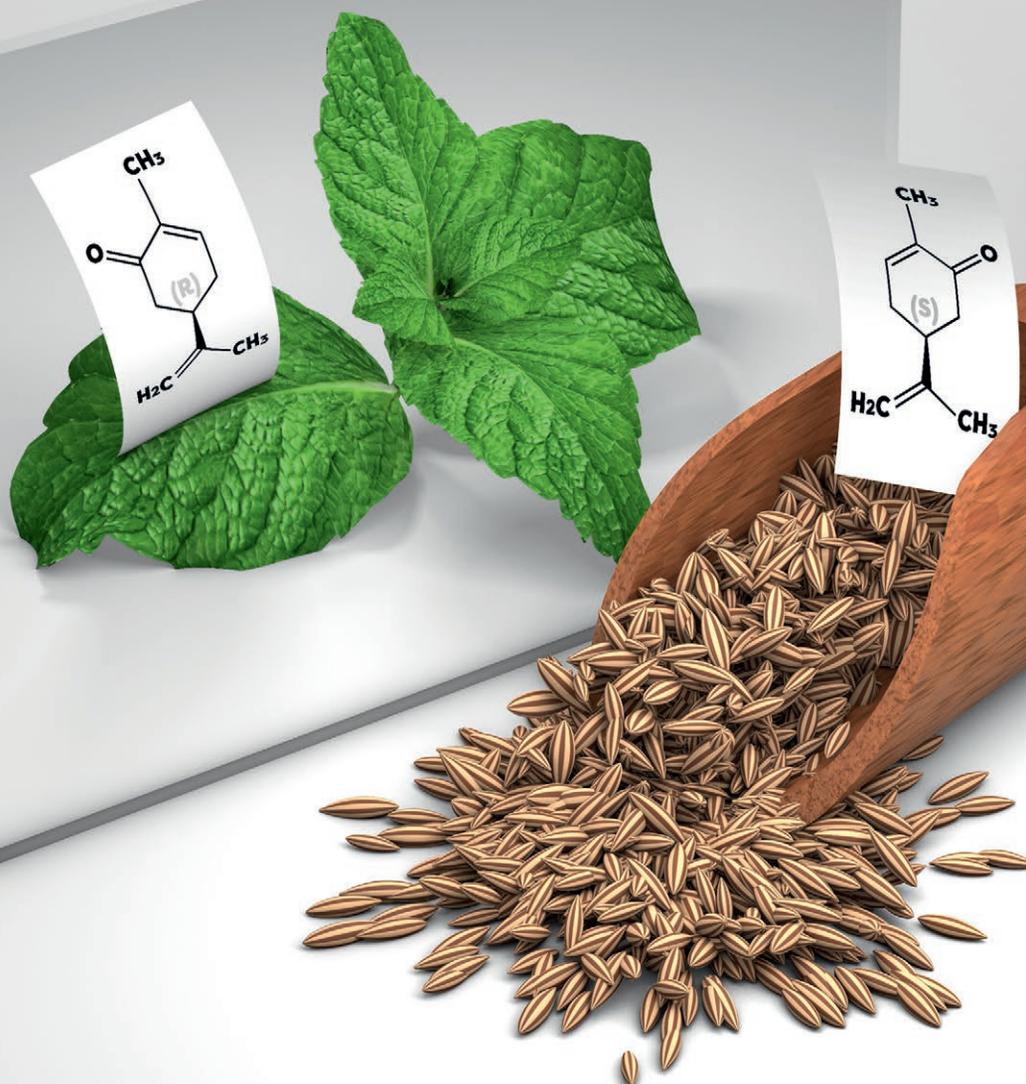
# Pareilles et nonpareilles

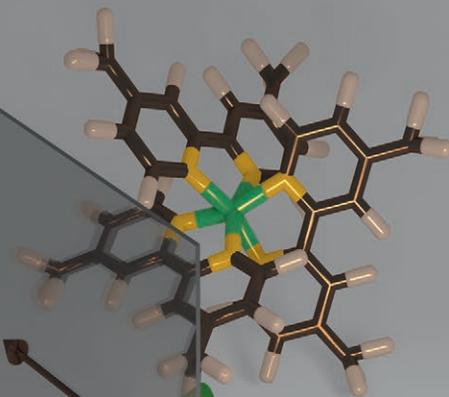
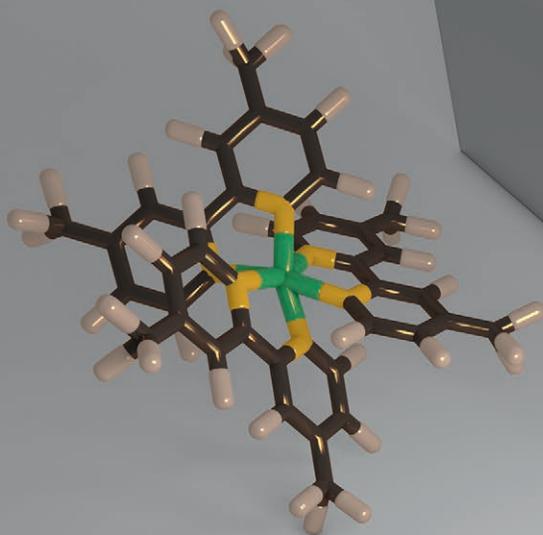
Quatre doigts et un pouce, cinq ongles et toutes les articulations bien en place: au fond, notre main gauche et notre main droite sont pareilles. Mais on a beau les tourner et les retourner, elles ne sont pas superposables ni identiques. Elles se comportent comme des images en miroir.

Le même phénomène, appelé «chiralité», existe pour certaines molécules: deux versions d'un composé chimique possèdent la même séquence d'atomes, mais elles sont des images en miroir. La différence est souvent mince sur le papier mais apparaît plus clairement en trois dimensions.

En chimie, on parle de la forme gauchère et de la forme droitère d'une molécule ou, en abrégé, de sa forme S et de sa forme R (S et R signifient *sinister* et *rectus*, c'est-à-dire gauche et droite en latin). Ces deux versions de la molécule sont appelées «énantiomères». La carvone est une molécule de ce genre, qui existe sous forme d'images en miroir. Elle fait partie des herbes aromatiques: la S-carvone se trouve dans le carvi et la R-carvone dans la menthe verte.

Pour nous, le fait d'avoir une main gauche et une main droite va de soi. Mais dans notre nez, nous avons des récepteurs olfactifs chiraux qui nous permettent de distinguer sans difficulté certains énantiomères. Voilà pourquoi la S-carvone a l'odeur du carvi et la R-carvone celle de la menthe.



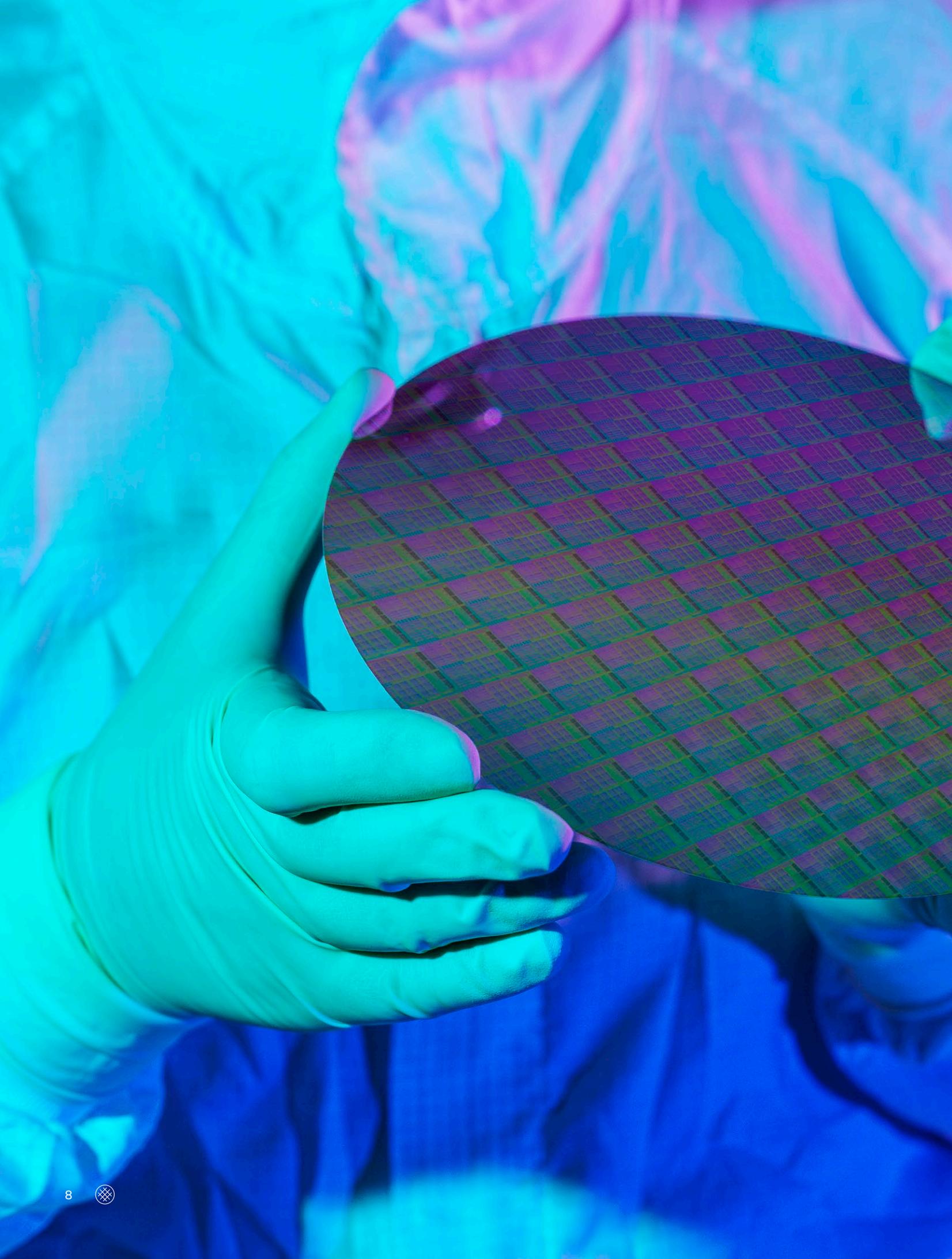


## De la lumière hélicoïdale pour distinguer les énantiomères

Au PSI, les scientifiques ont mis au point une méthode qui utilise de la lumière de type rayons X hélicoïdale pour distinguer les énantiomères l'un de l'autre, autrement dit les molécules gauche et droite.

Les énantiomères déploient souvent des effets complètement différents dans l'organisme: l'une des molécules peut agir comme médicament, alors que l'autre peut se révéler toxique ou dommageable. La thalidomide est un exemple bien connu de cet effet. Vendue sous les noms commerciaux Contergan et Softenon, elle doit sa triste notoriété à un scandale pharmaceutique majeur des années 1960. Il est donc important de pouvoir distinguer et séparer les deux images en miroir d'une molécule. Mais c'est une tâche difficile: les deux versions de la molécule ont des propriétés chimiques identiques; seule leur forme tridimensionnelle diffère.

Des scientifiques du PSI, de l'ETH Lausanne EPFL et de l'Université de Genève ont envoyé de la lumière de type rayons X de la Source de Lumière Suisse SLS à travers des lentilles de diffraction spéciales appelées «plaques de zones spiralées». Celles-ci courbent le front d'onde de manière hélicoïdale, de sorte que la lumière elle-même devient chirale. Les travaux ont montré que les énantiomères absorbaient ce rayonnement de manière différente. Les signaux ont pu être utilisés pour distinguer les deux images en miroir et se sont même révélés plus nets qu'avec la méthode utilisée jusque-là. Une véritable alternative!



# Advanced Manufacturing

Les puces informatiques présentent une densité incroyable: on y dénombre jusqu'à 100 milliards de transistors sur une surface équivalente à l'ongle d'un pouce. De tout temps, la recherche a contribué de manière décisive aux techniques de fabrication ultramodernes. On planche aujourd'hui sur la fabrication avancée de demain. Avec un nouveau record mondial, que le PSI a établi en créant les plus petites structures par photolithographie.

1

Toile de fond

Plus rapide, précise et fiable:  
la production et son avenir

Page 10

2

Infographie

La lumière: un outil pour  
les plus fines structures

Page 16

3

Entretien

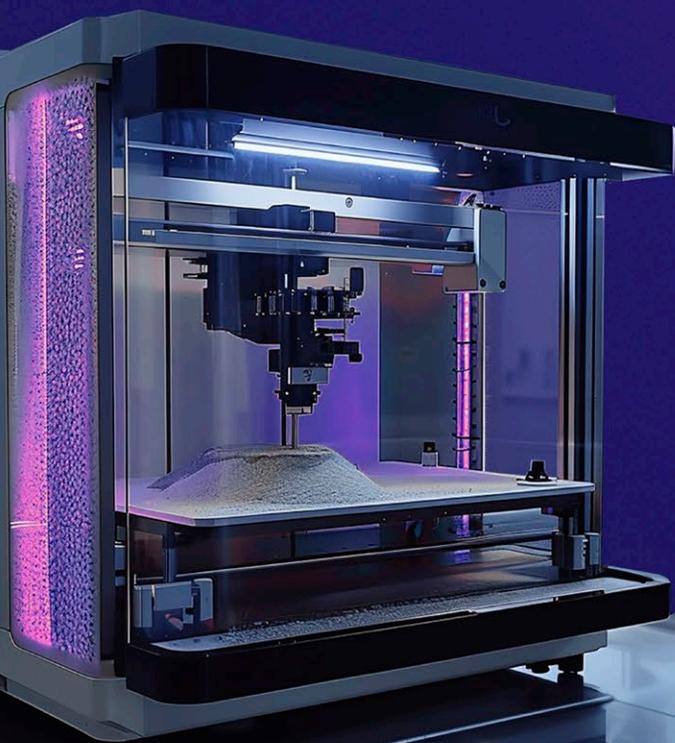
Quand la science rencontre l'industrie,  
l'innovation a de l'impact

Page 18

# Plus rapide, précise et fiable: la production et son avenir

De nouvelles techniques de fabrication ultramodernes – dites de «fabrication avancée» (*advanced manufacturing*) – représentent l'une des clés pour l'avenir de la place industrielle suisse. A l'Institut Paul Scherrer PSI, les scientifiques travaillent à perfectionner l'impression 3D. Ils étudient également de nouveaux matériaux pour l'industrie des semi-conducteurs et développent une «peau de robot», couverte de minuscules capteurs, pour rendre sensible la pointe des doigts de machines.

Texte: Barbara Vonarburg



Si l'on veut réaliser de manière fiable des composants standardisés par impression 3D pour l'industrie, il faudra faire encore évoluer ce procédé. Mais, pour Steven Van Petegem, du Centre des sciences photoniques du PSI, son potentiel est important. Pour ce portrait, il pose devant une imprimante virtuelle.

L'impression 3D, c'est-à-dire le fait d'imprimer des pièces ou des produits entiers en trois dimensions, est peut-être l'exemple le plus connu de «fabrication avancée» (*advanced manufacturing*). Cette technique de fabrication additive est particulièrement prometteuse pour l'industrie aéronautique et aérospatiale, l'industrie automobile et la médecine. «Son potentiel est énorme», relève Steven Van Petegem, chercheur du groupe Structure et mécanique de nouveaux matériaux au Centre des sciences photoniques du PSI. Mais d'importants défis subsistent pour son utilisation à l'échelle industrielle: à l'heure actuelle, la méthode n'est pas encore suffisamment fiable. «Il existe peu de matériaux avec lesquels il est possible de produire, par impression 3D, des milliers d'exemplaires d'un composant standardisé avec une qualité élevée et constante, explique-t-il. Pour produire des pièces destinées à un avion, par exemple, des améliorations sont encore nécessaires.»

Le composant en question pourrait en effet présenter des fissures ou des pores. Si l'on découvre ce qui se passe lors du processus d'impression, il devient possible d'expliquer pourquoi cela se produit. C'est pour cette raison que les scientifiques du PSI ont mis au point des mini-imprimantes spéciales qu'ils peuvent intégrer aux grandes installations de recherche. «Nos installations et nos machines uniques en leur genre nous permettent de scruter les profondeurs du matériau pendant le processus d'impression et de voir comment la microstructure évolue durant la fabrication», explique Markus Strobl, responsable du groupe de recherche Matériaux avancés au Centre de recherche avec neutrons et muons du PSI.

Les scientifiques du PSI ont commencé, il y a cinq ans, avec un appareil qui mesurait tout juste 50 centimètres et qui était prévu pour la Source de Lumière Suisse. Entre-temps, la mini-imprimante de Villigen est devenue si prisée à l'international qu'elle est constamment en service. Elle est également utilisée aux synchrotrons de Hambourg et de Grenoble. Ce succès a poussé les scientifiques à construire un deuxième appareil, qu'ils ont installé pour la première fois, en 2024, à la source suisse de neutrons à spallation SINQ. «Les expériences menées avec cet appareil ont d'emblée fonctionné, ce qui représente une performance remarquable, notamment pour notre doctorante Shieren Sumarli», souligne Markus Strobl.

Les deux mini-imprimantes appliquent la même méthode, qui figure parmi les plus répandues dans l'impression 3D à grande échelle: la fusion sur lit de poudre par laser. Le métal est déposé sous forme de poudre fine sur une plaque support. Puis le rayon laser passe sélectivement sur la poudre, la fait fondre et lui donne la forme souhaitée. Vient la couche de poudre suivante, que le laser fait fondre à son tour. Le composant grandit ainsi, couche après couche. La lumière synchrotron ou les neutrons permettent de suivre ce processus sur place (*in situ*) et en temps réel (*operando*).

Actuellement, les scientifiques s'intéressent tout particulièrement à la fabrication d'échantillons composés de plusieurs matériaux. En effet, une impression 3D de multimatériaux pourrait permettre la fabrication de pièces fonctionnelles et de se passer des procédures d'assemblage et de montage. Dans le cadre de leurs expériences à la SINQ, les chercheuses et les chercheurs ont imprimé une combinaison d'acier et de cuivre qui se prête à la construction d'échangeurs de chaleur. L'acier fournit la stabilité mécanique, alors que le cuivre conduit particulièrement bien la chaleur. À l'aide des neutrons, les scientifiques ont pu suivre pour la première fois la formation de ce qu'on appelle les «phases magnétiques» pendant le processus d'impression. Ils pensent qu'il pourrait exister un lien entre ce phénomène et la formation de fissures.

Dans le cadre d'autres expériences à la SLS, ils ont examiné des combinaisons de cuivre et de nickel, et de cuivre et d'aluminium. «Nous avons obtenu des résultats impressionnants qui montrent ce qui se passe lorsque le matériau fondu se refroidit particulièrement vite, explique Steven Van Petegem. Grâce à la lumière synchrotron, nous pouvons réaliser des prises de vues de manière extrêmement rapide, jusqu'à 40 000 par seconde.» Cela permet de scruter surtout des échantillons très minces. Les neutrons de la SINQ, en revanche, pénètrent plus profondément dans le matériau et permettent de visualiser, entre autres, des tensions dans le réseau cristallin, au niveau des atomes. «Les deux méthodes se complètent de façon idéale», conclut Markus Strobl.

Mais il est aussi possible d'entendre les fissures en train d'apparaître pendant l'impression et donc de les mesurer de manière acoustique. Un micro ultrasensible est positionné dans ce qu'on appelle une «chambre d'impression» pour enregistrer les signaux acoustiques pendant le processus de fabrication. Ce projet est soutenu par le Fonds national suisse dans le cadre du programme Sinergia; hormis le PSI, l'EPFL et l'Empa y participent également. Les scientifiques utilisent les faisceaux de rayons X et les neutrons pour attribuer la bonne signification à certains signaux acoustiques. Ensuite, l'intelligence artificielle entre en jeu. Grâce à l'apprentissage automatique, l'enregistrement sonore peut être interprété instantanément, alors qu'il reste chaotique pour les êtres humains. De la sorte, si l'on remarque une anomalie, on peut la corriger pendant le

**«Il est essentiel d'atteindre une très grande précision. C'est seulement à cette condition que l'industrie utilisera ce procédé pour le contrôle qualité.»**

Steven Van Petegem, chercheur au Centre des sciences photoniques du PSI



«Ces dernières années, pratiquement tous les fabricants de microprocesseurs sont venus faire des tests au PSI.»

Yasin Ekinci, directeur de laboratoire au Centre des sciences photoniques du PSI

Les puces informatiques sont à base de silicium. Yasin Ekinci, directeur de laboratoire au Centre des sciences photoniques du PSI, nous montre un *wafer* rond, fabriqué à partir de ce matériau ultrapur. L'industrie des semi-conducteurs utilise la photolithographie pour créer les structures les plus fines à leur surface. Nous les avons esquissées sur le *wafer* par traitement d'image.



processus. «Il est essentiel d'atteindre une très grande précision, explique Steven Van Petegem. C'est seulement à cette condition que l'industrie utilisera ce procédé pour le contrôle qualité.»

### Epauler la place industrielle suisse

«Les exigences envers les matériaux sont aujourd'hui beaucoup plus élevées que par le passé, explique Frithjof Nolting, directeur du Laboratoire de physique de la matière condensée au Centre des sciences photoniques du PSI. La fabrication avancée est une importante thématique d'actualité, avec laquelle nous épaulons la place industrielle suisse.» Nombre de matériaux sont composés de différents éléments qui ont des fonctions diverses. Cela nécessite des connaissances précises et détaillées. Alors qu'auparavant, pour simplifier les choses, on s'intéressait uniquement à la dureté, à la composition ou à l'élasticité d'un matériau, il faut aujourd'hui impérativement connaître sa structure micrométrique et nanométrique pour comprendre comment il se comportera lors d'un processus de fabrication. «Au PSI, avec nos techniques, nous sommes en mesure de fournir ces informations, souligne Frithjof Nolting. C'est notre force.»

En 2019, ce chercheur faisait partie des fondateurs du centre de transfert de technologie ANAXAM, qui offre aux entreprises de l'industrie un accès facilité aux grandes installations de recherche du PSI afin qu'elles puissent y analyser leurs matériaux et leurs processus de production. ANAXAM est l'acronyme de Analytics with Neutrons and X-Rays for Advanced Manufacturing. Le centre est financé aux deux tiers par des fonds publics et le troisième tiers est assuré par des contributions des partenaires de l'industrie. «ANAXAM met ses compétences d'analyse et les grandes installations de recherche SLS et SINQ du PSI à la disposition des entreprises industrielles et des instituts de recherche dans le cadre d'expériences et de mesures, explique Christian Grünzweig, directeur du centre. Nos clients peuvent ainsi optimiser leurs processus et leurs produits, notamment dans le domaine de la fabrication avancée.»

A une ligne de faisceau de la SLS, l'entreprise genevoise Givaudan a ainsi étudié la structure 3D de snacks soufflés, fabriqués avec de nouveaux ingrédients. La société Huba Control, sise à Würenlos et spécialisée dans la technologie de mesure de pression et de débit, a pu augmenter la robustesse des capteurs qu'elle venait de développer. L'examen mené par tomographie synchrotron à haute résolution a permis d'optimiser le parcours des fibres de verre dans la pièce en plastique, moulée par injection, du tube de mesure. Quant à l'entreprise Winterthur Gas & Diesel (WinGD), qui développe des moteurs de navires, elle a analysé à la SLS des buses d'injection de moteurs diesel fabriqués de manière additive afin d'améliorer le processus de fabrication et de produire des buses avec des propriétés d'écoulement optimales.

«ANAXAM s'est fixé pour objectif d'épauler les clients de l'industrie pendant l'ensemble du cycle de vie de leurs produits et de leurs processus, afin qu'ils puissent mettre sur le marché des produits innovants et de haute qualité», rappelle Christian Grünzweig. «Avec une cinquantaine de projets par an, cela représente une belle *success-story*», renchérit Frithjof Nolting. En 2023, un deuxième centre de technologie a été fondé au PSI. Le Swiss Photonics Integration Center (Swiss PIC) offre ses services à l'industrie photonique, qui exploite la lumière pour la transmission d'informations. Les deux centres sont membres de l'association faitière Advanced Manufacturing Technology Transfer Centers (AM-TTC), qui s'engage à ce que les nouvelles technologies de fabrication passent des laboratoires de recherche à des applications industrielles.

### Les fabricants de microprocesseurs testent de nouveaux matériaux

Dans l'industrie des semi-conducteurs, l'institut de recherche de Villigen est une adresse bien connue. «Ces dernières années, pratiquement tous les fabricants de microprocesseurs sont venus faire des tests au PSI, raconte Yasin Ekinci, directeur du Laboratoire de nanosciences et de technologie des rayons X, également hébergé au Centre des sciences photoniques. Dans le secteur de l'industrie des semi-conducteurs, la fabrication avancée désigne principalement la photolithographie.» De la lumière ultraviolette frappe un masque photographique qui sert de modèle aux pistes conductrices et aux transistors de la puce. Un système optique complexe réduit l'image de ce masque et la projette à plusieurs reprises sur une couche de silicium enduite d'une résine photosensible, appelée «*photoresist*».

«Au début, on dénombrait un millier de transistors sur une puce et, aujourd'hui, 100 milliards sur une surface équivalente à l'ongle de votre pouce», explique Yasin Ekinci. Si cette incroyable miniaturisation a été rendue possible, c'est grâce à l'évolution de la photolithographie, qui est passée à une lumière avec des longueurs d'onde toujours plus courtes. Désormais, les puces les plus performantes, qui équipent par exemple les principaux smartphones, utilisent ce qu'on appelle du rayonnement ultraviolet extrême (EUV) d'une longueur d'onde de 13,5 nanomètres (1 nanomètre équivaut à 1 millionième de millimètre). Mais, pour y arriver, il a fallu mettre au point une technique entièrement nouvelle, au développement de laquelle le PSI a contribué de manière essentielle.

Les puces à haute performance sont fabriquées dans ce que l'on appelle des «*scanners*», qui sont les machines les plus complexes jamais construites. Les tests sur les appareils d'origine seraient très risqués et impliqueraient un effort disproportionné. A la place, l'industrie exploite le rayonnement ultraviolet extrême que produit la Source de Lumière Suisse SLS. «Ici, à la

SLS, nous avons une méthode beaucoup plus efficace, plus rapide et meilleur marché pour la lithographie EUV, explique Yasin Ekinici. Nous ne pouvons pas l'utiliser pour fabriquer des transistors mais les structures les plus fines et offrir différentes possibilités de tests.» Son équipe détient même un record du monde. Alors que la photolithographie industrielle fabrique des structures faites de lignes espacées d'environ dix nanomètres, les plus fines produites à la SLS présentent un motif avec des interlignes de seulement cinq nanomètres. «Il s'agit des structures les plus fines jamais créées par l'être humain», précise Yasin Ekinici.

Ce sont surtout de nouvelles résines photosensibles qui font l'objet d'innombrables tests au PSI. Car, pour la photolithographie EUV, les matériaux courants ne conviennent plus. Les tests ont permis de savoir si une nouvelle résine photosensible satisfaisait aux exigences de résolution et de sensibilité lors de la gravure. Dans ce contexte, la collaboration avec l'industrie demandait du doigté et de la discrétion. Yasin Ekinici aurait volontiers développé lui-même un nouveau *photoresist*, mais il a longtemps hésité: «Si nous avions fait quelque chose de similaire à nos clients, cela aurait pu être perçu comme une rupture de confiance, explique-t-il. Mais nous avons osé nous lancer dans quelque chose de complètement nouveau.»

Les résines photosensibles existantes sont composées de polymères, autrement dit de longues chaînes de molécules. «Au niveau atomique, cela ressemble à un amas de câbles, décrit Yasin Ekinici. Or, si l'on veut graver de manière toujours plus fine, on a besoin de molécules beaucoup plus petites comme éléments constitutifs.» Au cours des deux dernières années, son groupe a donc développé un matériau novateur fondé sur un oxyde métallique. Le transfert de cette recherche académique vers un produit industriel nécessite d'importants investissements. Voilà pourquoi le groupe du PSI collabore désormais avec l'entreprise finlandaise PiBond, qui a fondé une succursale au Park Innovaare. PiBond doit poursuivre le développement du PSI et le commercialiser.

### Une peau pour les robots

Inveel, l'entreprise spin-off récemment fondée par Barbara Horvath, a, elle aussi, son siège au Park Innovaare. «Imaginez un robot qui veut soulever cette tasse de café, explique cette spécialiste des sciences des matériaux en saisissant la tasse posée devant elle sur la table. Avec la peau que nous avons développée pour ses doigts, il y parviendra très facilement.» Barbara Horvath s'est vu attribuer un Founder Fellowship du PSI, par lequel l'institut la soutient dans la réalisation d'un produit fondé sur ses résultats de recherche.

Lorsqu'elle était postdoctorante au PSI, cette ancienne chercheuse a en effet développé une méthode de fabrication novatrice en vue d'imprimer des circuits

électroniques sur une surface en polymère. «Et ce à très haute résolution, à très grande vitesse et sur de grandes surfaces», précise-t-elle. A présent, elle travaille avec son équipe à la mise au point d'un prototype de peau pour robot. De minuscules capteurs sont imprimés les uns à côté des autres sur un film de grande surface, avec une échelle de mesure qui descend jusqu'à quelques centaines de nanomètres. «Si l'on applique cette peau sur le bout des doigts d'un robot, celui-ci sentira non seulement les points isolés, mais il les assemblera pour composer une sorte de carte tactile: celle-ci lui indiquera s'il touche l'objet par le haut, par le bas ou au milieu, poursuit Barbara Horvath. Il pourra ainsi mieux le saisir et le manipuler.»

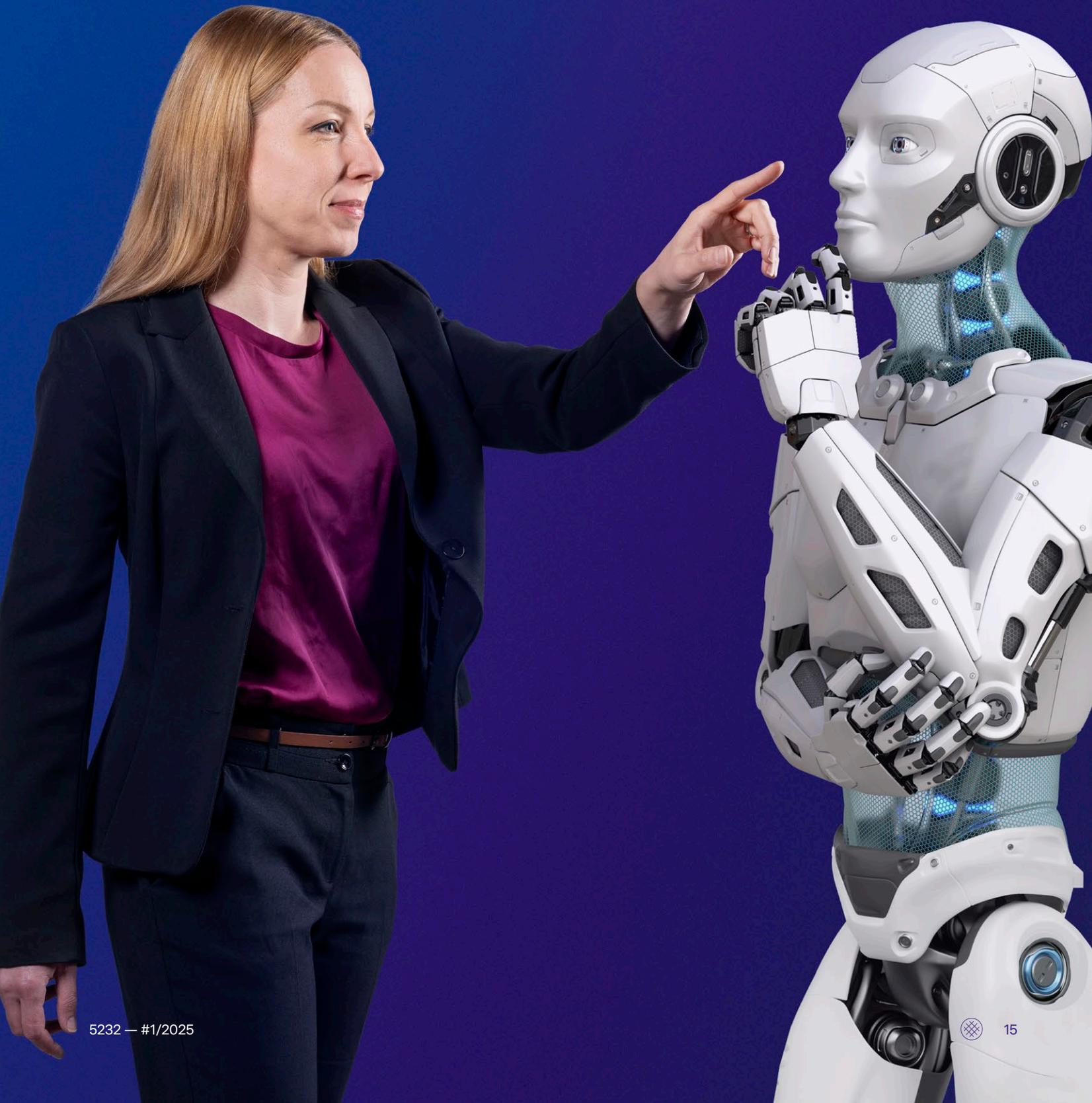
La méthode de Barbara Horvath commence par la conception et la fabrication d'un tampon précis. Cette fabrication se fait dans la salle blanche de 450 mètres carrés récemment construite par le PSI au Park Innovaare: «Nous y disposons des machines high-tech dont nous avons besoin ainsi que d'excellentes conditions», souligne-t-elle. Le tampon est mis en contact avec le matériau afin de préparer la surface. Cela permet de placer précisément des nanoparticules métalliques à l'étape suivante, qui sont ensuite fusionnées pour former de minuscules nanofils. Barbara Horvath ne veut pas en dire plus: «Nous sommes toujours en train de déposer des brevets et je ne veux pas compromettre ce processus», explique-t-elle.

Ce procédé de fabrication pourrait servir à d'autres fins: par exemple, des fenêtres intelligentes qui ne laisseraient passer que certaines longueurs d'onde de lumière incidente et réguleraient ainsi la température intérieure. Mais, pour l'instant, Barbara Horvath veut se concentrer sur la mise au point de la peau de robot en vue de sa commercialisation. Des capteurs de température et d'humidité pourraient également être imprimés sur la surface en polymère. Le robot pourrait ainsi sentir si quelqu'un respire près de lui. «Pour l'instant, cela semble très futuriste», admet-elle. Mais elle est convaincue que ce développement finira par s'imposer: «Il se pourrait bien que, très bientôt, un robot de ce genre soit capable de saisir ma tasse et de la rapporter», affirme Barbara Horvath. ●

«Si l'on applique cette peau sur le bout des doigts d'un robot, celui-ci sentira non seulement des points isolés, mais il les assemblera pour composer une sorte de carte tactile.»

Barbara Horvath, CEO et cofondatrice d'Inveel GmbH

Avec son entreprise spin-off Inveel, Barbara Horvath, ancienne chercheuse au PSI, développe une méthode de fabrication qui permet d'imprimer des circuits électroniques sur une surface en polymère. Son objectif est de créer une sorte de peau électronique pour robots, comme celui, fictif, que nous avons inséré dans cette image.



# La lumière: un outil pour les plus fines structures

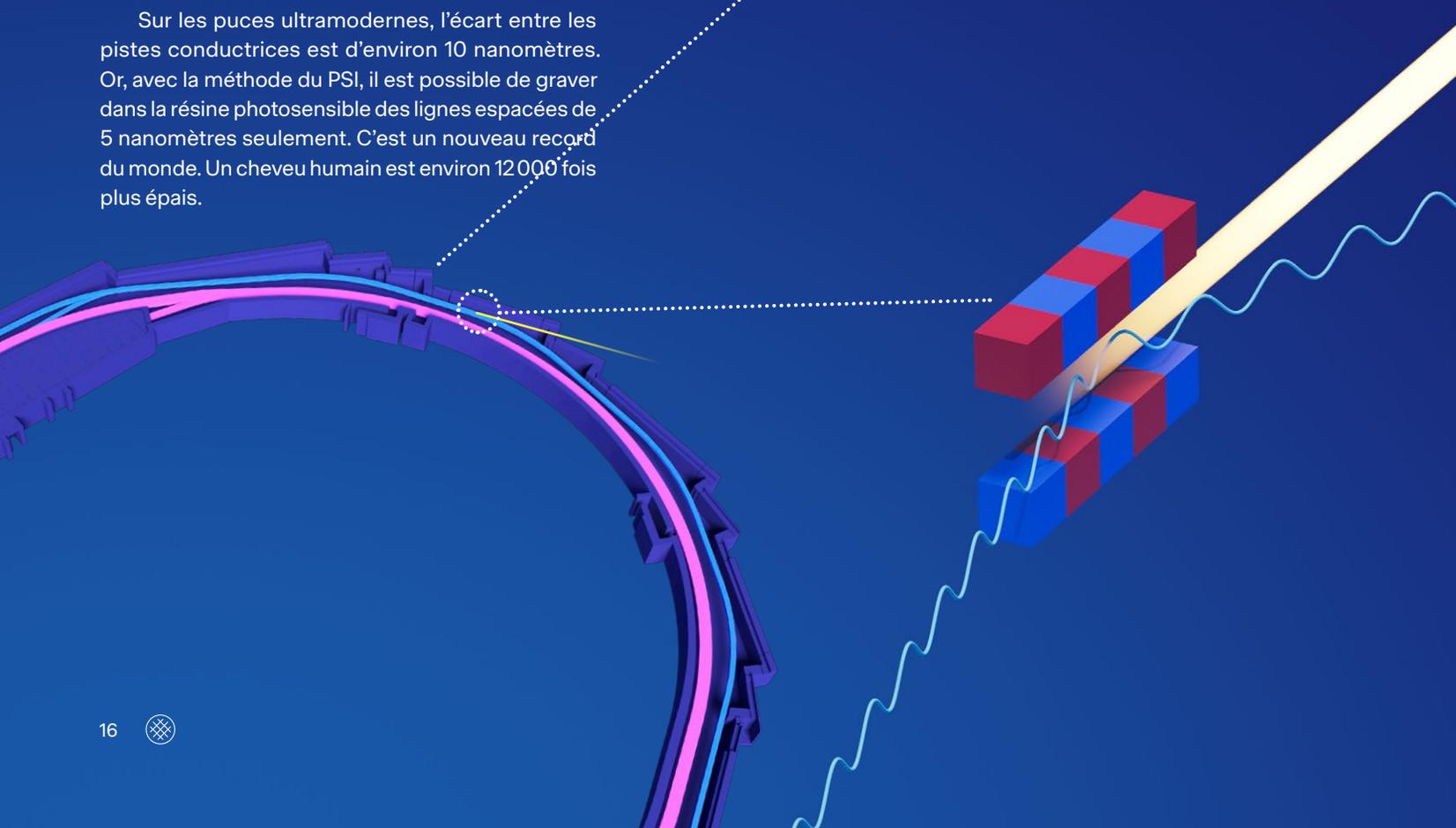
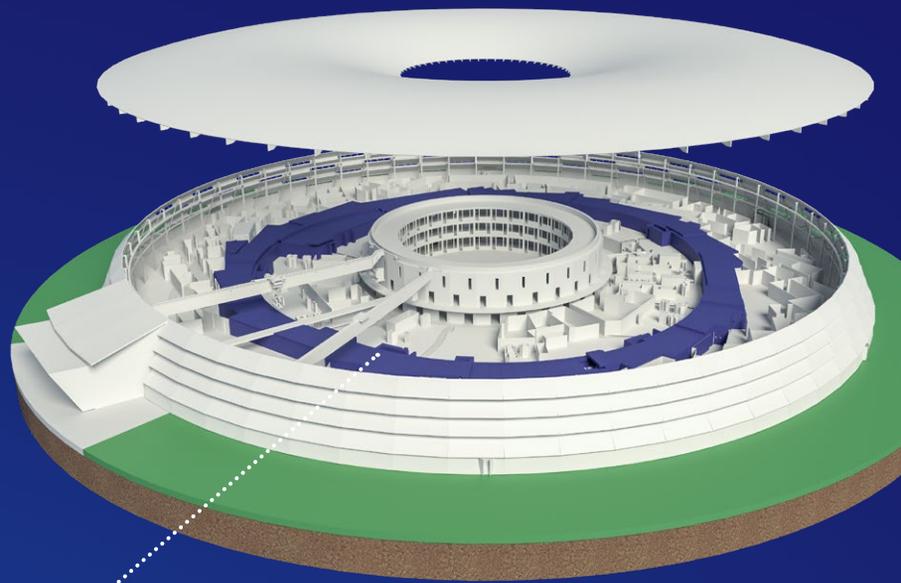
Ce qui est invisible à l'œil nu détermine pourtant la performance de nos smartphones et de nos cartes graphiques. Dans ce domaine, la méthode baptisée «photolithographie» joue un rôle essentiel: une lumière spéciale dessine le schéma de construction de la puce sur une plaquette de silicium, appelée «*wafers*», qui est enduite d'une résine photosensible. Dans le cas des puces ultramodernes, on utilise le rayonnement ultraviolet extrême (EUV) comme lumière pour réaliser des structures aussi fines que possible. Les installations qui fabriquent ces puces de haute performance sont extrêmement complexes et coûteuses. La lumière, issue d'une source de plasma à 200 000 degrés Celsius, est dirigée à travers un système optique composé de 35 000 éléments.

Au PSI, les scientifiques ont mis au point une nouvelle méthode de lithographie EUV. Plus simple et meilleur marché, elle est fondée sur la superposition de deux faisceaux lumineux, ce qui a pour effet d'amplifier ou d'atténuer la lumière. Cette superposition est appelée «interférence» (EUV-IL). La nouvelle méthode n'a pas besoin de source de plasma et fonctionne avec une optique plus simple. Elle ne se prête pas à la fabrication de puces, mais elle est abondamment utilisée par l'industrie pour tester des matériaux et elle peut produire des motifs très fins avec une résolution maximale.

Sur les puces ultramodernes, l'écart entre les pistes conductrices est d'environ 10 nanomètres. Or, avec la méthode du PSI, il est possible de graver dans la résine photosensible des lignes espacées de 5 nanomètres seulement. C'est un nouveau record du monde. Un cheveu humain est environ 12 000 fois plus épais.

## De la lumière issue des grandes installations de recherche

A la Source de Lumière Suisse SLS du PSI, on se sert d'électrons accélérés pour produire une lumière particulièrement intense. Les électrons foncent à une vitesse proche de celle de la lumière sur une trajectoire circulaire d'une circonférence totale de 288 mètres. Ce faisant, ils émettent du rayonnement synchrotron. Ce dernier peut être utilisé pour de nombreuses applications, dont la photolithographie.



## Rayonnement ultraviolet extrême

Le trajet circulaire de la SLS comporte des portions rectilignes, dans lesquelles sont intégrés un ensemble d'aimants permanents alternés. Cet onduleur contraint les électrons sur une trajectoire d'onde et produit ainsi de la lumière de la longueur d'onde souhaitée. Pour la fabrication des structures les plus fines, les scientifiques du PSI utilisent du rayonnement ultraviolet extrême (EUV), adapté à la norme industrielle de 13,5 nanomètres.

### Miroirs et sténopé

Le faisceau de lumière EUV est focalisé par une série de miroirs sur un sténopé.

### Motifs ultrafins

Après le sténopé, le faisceau atteint en principe un masque avec une grille de lignes fines et se divise. Là où les faisceaux se croisent de nouveau apparaît un motif d'interférence avec des lignes séparées par un écart beaucoup plus étroit que dans la grille génératrice. La résine photosensible est irradiée avec ce motif d'interférence.

En remplacement du masque avec grille, les scientifiques du PSI ont développé un dispositif avec des miroirs. Après le sténopé, le milieu du faisceau EUV est bloqué et seules les deux zones extérieures peuvent poursuivre leur route. Deux miroirs disposés en angle aigu amènent alors ces deux parties du faisceau sur le même point, où une interférence se produit de nouveau, avec un motif correspondant dans la résine photosensible. C'est ainsi que les scientifiques du PSI ont réussi à obtenir une résolution de 5 nanomètres seulement. Quant à la structure avec les deux miroirs, elle n'est pas plus grosse qu'une pièce de 5 francs.

# Quand la science rencontre l'industrie, l'innovation a de l'impact

Depuis 2023, le néerlandais VDL Enabling Technologies Group (VDL ETG) s'est implanté au Park Innovaare, à Villigen – à proximité immédiate du PSI. Filiale de VDL Groep, VDL ETG fournit des entreprises du monde entier qui fabriquent des installations de production high-tech et utilisent des lignes de production ultramodernes. Hans Priem est *business development manager* chez VDL ETG et Cees Maris est le responsable principal de VDL ETG au Park Innovaare.

Interview: Barbara Vonarburg

## Que fabrique votre entreprise?

**Hans Priem:** Nous sommes ce qu'on appelle un «*contract manufacturing partner*» («partenaire de fabrication sous contrat»). Nos clients vendent, par exemple, des machines destinées à la fabrication de semi-conducteurs ou de produits dans les domaines de l'analyse, de la navigation spatiale ou de la médecine... Ces machines sont incroyablement complexes: elles utilisent par exemple le vide poussé, possèdent une très haute précision et ont un énorme rendement. Nos clients externalisent une partie du développement, de la production, du montage et des tests de modules ou encore des systèmes entiers vers notre entreprise. Nous sommes donc sous-traitants dans la fabrication de haut de gamme et de haute technologie.

## Que signifie pour vous la fabrication avancée?

**Cees Maris:** Nous nous efforçons de repousser les limites du faisable dans notre secteur. Pour y parvenir, nous devons précisément comprendre la physique qui se cache derrière les produits que nous développons. De la sorte, nous pouvons offrir à nos clients des solutions optimales qui débouchent sur des produits innovants, avec une performance au top niveau. C'est le type de démarche que je qualifierais de «fabrication avancée», accomplie grâce à une collaboration étroite avec le PSI et les sociétés partenaires du Park Innovaare, et en associant recherche et industrie.

**Hans Priem:** Pour l'instant, nous avons l'infrastructure et les capacités adéquates pour répondre aux besoins de nos clients. Mais le défi ne réside pas uniquement dans le fait de disposer de ces technologies à l'heure actuelle. Nous réfléchissons donc à ce dont nous aurons besoin dans cinq ou dix ans. En nous fondant sur les commentaires de nos clients et sur nos propres estimations, nous avons décidé de renforcer notre relation et notre collaboration avec le PSI et d'ouvrir une succursale au Park Innovaare.

Nous connaissons bien l'institut, car nous avons déjà collaboré avec le PSI lors de la construction du SwissFEL et dans le cadre de différents projets.

## Le laser à rayons X à électrons libres SwissFEL est la plus récente des grandes installations de recherche du PSI. Quelle a été la contribution de VDL ETG à la construction de cette installation, qui s'étire sur plus de 700 mètres et abrite un accélérateur linéaire?

**Hans Priem:** Nous avons fabriqué plus de 12 000 composants de haute précision qui constituent, une fois réunis, les éléments centraux du tube accélérateur du SwissFEL. Ces disques de cuivre de forme spéciale doivent respecter des tolérances de forme et de position très précises, de quelques micromètres seulement. Par ailleurs, la géométrie varie d'un disque à l'autre. Ils ont été fabriqués par VDL ETG Switzerland à Trübbach, en Suisse orientale. Le fait d'en fabriquer une quantité pareille avec une telle précision a représenté quelque chose de spécial pour nous. Lorsqu'on est bon dans la fabrication de précision – et je pense que nous le sommes –, il est très important d'être associé à de tels projets en raison du progrès technologique. C'est là, avant tout, que s'offre l'opportunité de poursuivre le développement de nos compétences et d'appliquer cette fabrication de précision à nos principaux domaines d'activité. Par exemple, en tant que fournisseur pour la construction de grands microscopes électroniques spéciaux, dotés d'une résolution particulièrement élevée, et pour nos clients de l'industrie des semi-conducteurs.

## Dans quelle mesure peut-on utiliser la technologie des accélérateurs dans la production de semi-conducteurs?

**Cees Maris:** Nous travaillons notamment dans la métrologie des semi-conducteurs, autrement dit leur technique de mesure. Nous constatons un besoin



L'entreprise VDL ETG est active au niveau international et possède un siège au Park Innovaare, avec vue directe sur la SLS du PSI. En collaboration avec des scientifiques du PSI, VDL ETG travaille, entre autres, sur des prototypes pour l'inspection des micropuces dans le domaine de la technologie des aimants et de la cryogénie, expliquent Hans Priem (à gauche) et Cees Maris.

croissant d'inspection des micropuces et des *wafers*: l'industrie des semi-conducteurs comporte en effet de nombreuses étapes nécessaires à la fabrication d'une puce et à la réalisation d'un *wafer*. Dans le cas d'un *wafer*, il faut souvent compter 600 étapes. Le contrôle qualité exige des procédures de test et de mesure. Les sources de rayons X basées sur des accélérateurs ont une importance croissante pour l'inspection. Avec la Source de Lumière Suisse SLS et le laser à rayons X à électrons libres SwissFEL, le PSI dispose d'une impressionnante somme de connaissances dans le domaine des sources de rayons X basées sur des accélérateurs. Pour réaliser de telles installations de recherche, il faut par ailleurs se munir de puissants aimants et produire un vide de qualité. Ce sont des points qui sont également utilisés dans

nos produits. Voilà pourquoi la technologie sous-jacente revêt un grand intérêt pour nous.

**Hans Priem:** Par ailleurs, la technologie des accélérateurs est utilisée en médecine, par exemple dans le domaine de la protonthérapie, où le PSI a fait œuvre de pionnier. Elle est aussi importante pour le développement de la radiothérapie «flash», un traitement du cancer très ciblé, qui consiste à délivrer localement une forte dose de radiations sous forme d'impulsions courtes.

#### Les domaines où VDL ETG est actif coïncident donc en partie avec les domaines de recherche du PSI?

**Hans Priem:** Oui, les scientifiques du PSI se penchent sur les mêmes défis que nous, mais d'un autre point

de vue. La combinaison de ces deux manières de voir a fait émerger, des deux côtés, toute une série de nouvelles connaissances importantes. C'est aussi la raison pour laquelle faire partie du Park Innovaare et du PSI revêt une signification stratégique pour nous. Il s'agit d'un investissement à long terme afin d'être toujours prospère dans cinq ans. Dans le cadre des projets que nous menons sur nos sites aux Pays-Bas, il nous arrive de travailler sur des questions auxquelles il existe peut-être déjà des réponses au PSI. C'est à ce genre de projet que nous voulons contribuer, avec notre équipe, au Park Innovaare.

#### Pouvez-vous nous en donner un exemple?

**Hans Priem:** Oui, nous faisons partie de l'équipe qui construit des prototypes pour l'inspection des micro-puces. Un autre domaine est celui de la technologie des aimants et de la cryogénie, autrement dit la technologie de production des basses températures. Lorsqu'on construit un prototype sans connaître précisément les bases de la physique, on risque de se heurter par la suite à un problème de production. Voilà pourquoi il est beaucoup plus pertinent d'ancrer un tel projet au Park Innovaare. Car si nous découvrons quelque chose que nous ne comprenons pas, il suffit de traverser la rue pour trouver, au PSI, les bons experts, dotés des compétences adéquates et susceptibles de nous aider.

#### A quel projet de prototype collaborez-vous en ce moment avec les scientifiques du PSI?

**Cees Maris:** Avec une équipe de la section Aimants du PSI, nous menons des expériences sur ce qu'on appelle des «caloducs oscillants» ou «*pulsating heat pipes*» (PHP) à très basses températures. Un PHP est un tube rempli d'un médium disponible aussi bien en phase gazeuse qu'en phase liquide dans la plage de température appliquée. Les bulles de gaz produites dans le PHP induisent un mouvement de va-et-vient du liquide. Notre idée est de réussir à utiliser les PHP pour transporter très efficacement la chaleur depuis un aimant supraconducteur jusqu'au système de refroidissement.

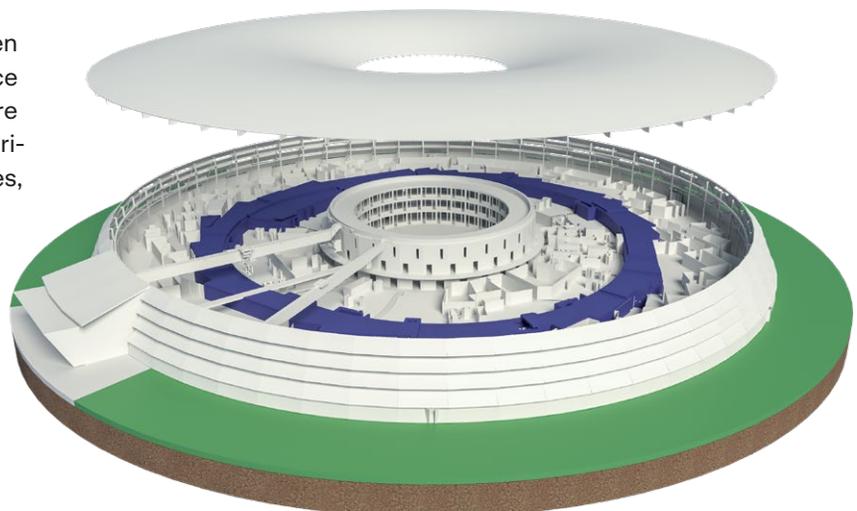
Les aimants supraconducteurs sont de plus en plus utilisés dans les accélérateurs et la résonance magnétique nucléaire. La supraconductivité offre toute une série d'avantages. Il est possible de fabriquer des aimants très puissants et peu énergivores,

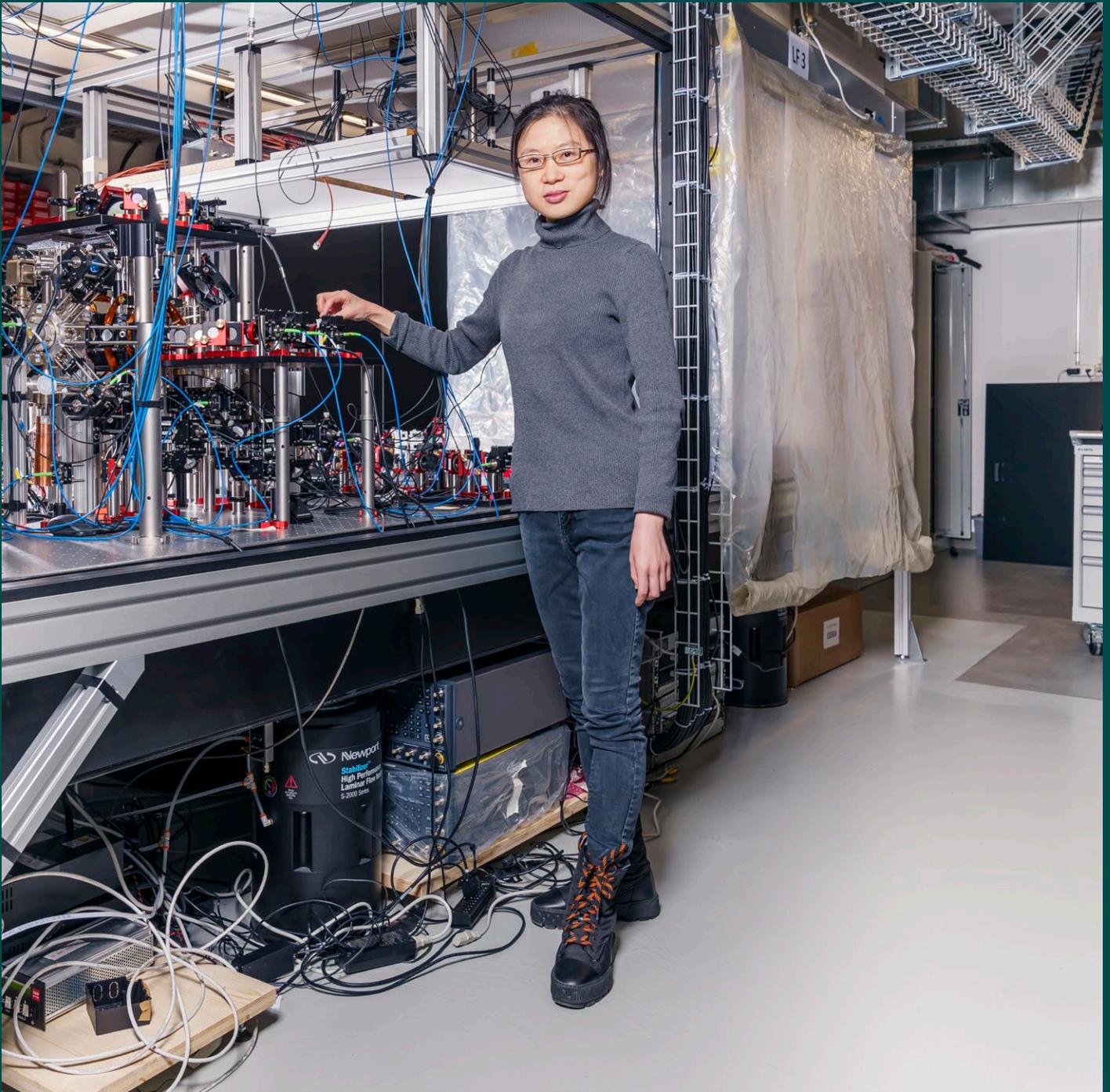
mais qu'il faut refroidir à très basse température. Notre équipe commune a construit un banc d'essai au laboratoire du PSI dédié aux aimants. Nous avons rempli le PHP avec du néon et nous avons testé sa conductivité thermique à une température de  $-245$  degrés Celsius. Pour ce genre d'expérience, les installations du PSI sont excellentes. Mais c'est surtout le personnel de la section Aimants, du département Technologie des accélérateurs et de la section Vide qui a rendu ce projet possible, et ce dans le cadre d'une collaboration très agréable. Les premiers résultats de ces essais sont prometteurs. Nous pensons que ces technologies pourraient trouver des applications dans l'industrie des semi-conducteurs et la navigation spatiale. Pour cette dernière, l'intéressant est que le système fonctionne sans gravitation.

#### Diriez-vous que votre collaboration avec le PSI et le Park Innovaare, où nous nous trouvons, représente quelque chose de très particulier?

**Hans Priem:** Je ne saurais trop souligner l'importance de notre amitié avec le PSI et avec l'équipe du Park Innovaare. D'un point de vue rationnel, elle est de nature stratégique, mais elle est aussi très agréable. Et nous sommes très fiers de faire partie de ce réseau innovant et extrêmement productif. ●

VDL Groep est un groupe industriel et une entreprise familiale sis à Eindhoven, aux Pays-Bas. VDL Enabling Technologies Group (VDL ETG) fait partie de VDL Groep et emploie quelque 6 000 collaborateurs. L'un des sites de VDL ETG se trouve à Trübbach, en Suisse orientale. VDL ETG Switzerland compte environ 200 collaborateurs et est spécialisée dans l'intégration de systèmes de composants de haute précision, de systèmes mécatroniques et de modules complets dans différents domaines de l'industrie high-tech. Hans Priem est néerlandais. Il travaille, depuis 2010, comme manager chez VDL ETG. Cees Maris est néerlandais, lui aussi, et ingénieur. Employé depuis 2018 chez VDL ETG, il met en place, depuis 2023, le bureau de VDL ETG au Park Innovaare.





## Connaissances quantiques appliquées

Wenchao Xu travaille au Centre des sciences photoniques, dans le domaine de l'optique et de l'ingénierie quantiques. En laboratoire, elle utilise les effets de la mécanique quantique pour explorer les fondements physiques de ce champ de recherche et développer des applications pratiques. À cette fin, elle contrôle et manipule des atomes électriquement neutres au niveau de l'atome unique et se sert de leurs interactions pour des simulations et des calculs quantiques. Son objectif: construire un ordinateur quantique à grande échelle qui corrige les erreurs et permette des opérations de calcul rapides.

# La recherche du PSI dans le musée le plus visité de Suisse



Energy Science for Tomorrow (ES4T) est une initiative conjointe de l'ETH Zurich, de l'ETH Lausanne EPFL, de l'Empa, du PSI et du Musée suisse des transports. Son objectif est de rendre les thématiques énergétiques compréhensibles et tangibles pour toutes les générations. Mais aussi d'encourager les échanges entre les milieux scientifiques, le monde économique et la société.



Rendre la recherche énergétique tangible: Alicia Siliézar dans la House of Energy. Le Musée des transports a créé une plate-forme pour encourager le dialogue politique et social autour des thématiques énergétiques.

Texte: Benjamin A. Senn

Au Musée suisse des transports, *Emission Explorer* confronte les visiteurs à des questions intimes: ce dispositif numérique interactif veut savoir comment je me nourris ou encore à quelle fréquence je fais du shopping. Suis-je plutôt «végane» ou du genre à manger de la viande «comme un lion»? Est-ce que je ne fais «presque jamais de shopping» ou est-ce que «j'adore ça»? Ces questions sont présentées sur un écran couleur avec cinq réponses possibles, choix qui demande un auto-examen critique et une pincée de courage. Car, en donnant sa réponse personnelle sur l'écran, on s'expose au jugement des visiteurs suivants dans la file d'attente.

*Emission Explorer* se trouve dans la House of Energy et, depuis octobre 2024, il fait partie de l'exposition permanente du Musée des transports, le musée le plus visité de Suisse, qui a enregistré plus d'un million d'entrées en 2023. Ce dispositif a été financé par le Conseil des EPF, qui, dans le cadre de l'initiative conjointe ES4T, cherche à encourager le dialogue social. Comme son nom le suggère, il vise à explorer le comportement des visiteurs en matière d'émissions et à les sensibiliser à leur empreinte carbone personnelle.

«Par le biais de cinq questions simples, nous cherchons à montrer de manière ludique en quoi notre comportement individuel peut influencer les émissions de CO<sub>2</sub>», explique Alicia Siliézar, collaboratrice de projet à ES4T. Diplômée en archéologie, elle a acquis de l'expérience dans divers musées et expositions. Parallèlement à son activité dans le cadre de l'initiative conjointe ES4T, elle travaille au Centre des visiteurs du PSI. «En plus des émissions personnelles, notre dispositif présente également les émissions systémiques, auxquelles on contribue indirectement, parce qu'elles sont générées par les infrastructures locales», ajoute-t-elle.

### Une plate-forme de dialogue pour les thématiques énergétiques

Avec la House of Energy, le Musée des transports a inauguré, en avril 2023, un nouveau bâtiment moderne et extrêmement efficace en termes énergétiques. En même temps, il s'est aventuré dans un nouveau territoire thématique avec l'exposition qui l'accompagne. Située dans le voisinage immédiat de la Halle du transport ferroviaire – un lieu qui réveillera la nostalgie des voyages



A l'aide de stations interactives et variées, la nouvelle exposition permanente «*Experience Energy!*» met en lumière différents aspects de l'énergie et du climat. Notamment, la protection du climat, la sécurité énergétique du futur et les effets de la consommation d'énergie sur le réchauffement climatique.

scolaires chez certains visiteurs helvétiques –, l'exposition permanente «*Experience Energy!*» se dévoile aujourd'hui et entraîne les visiteurs à la découverte de la Suisse durable de demain.

Différents partenaires du monde économique et des milieux de la formation et de la recherche sont impliqués dans la conception de l'exposition et trouvent ainsi une plate-forme de dialogue politique et social. Hormis les institutions du Domaine des EPF, Swissgrid, le gestionnaire du réseau de transport d'électricité argovien, et BWK, le fournisseur d'énergie et d'infrastructures, sont également représentés. Avec son dispositif numérique, BWK démontre le potentiel qu'offrira l'habitat intelligent du futur en termes de réduction de la consommation d'énergie.

Pour la recherche menée au PSI, l'initiative conjointe ES4T présente de nouvelles possibilités: «Cette plate-forme nous aide à rendre les thématiques énergétiques plus proches d'un large public et à mieux faire comprendre l'importance et l'urgence de la transformation de notre approvisionnement énergétique en vue d'abandonner les énergies fossiles au profit des énergies renouvelables», explique Christian Bauer, scientifique

spécialiste de l'environnement au Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du PSI. Mirjam van Daalen, responsable de la communication du PSI, le souligne également: «Par cette initiative commune, nous portons vers un public familial un faisceau de savoirs issus de notre recherche dans le Domaine des EPF.»

Lors de la cérémonie d'ouverture de la House of Energy, Martin Bütikofer, directeur du Musée des transports, a motivé comme suit l'intégration de la thématique de l'énergie dans le musée: «Nous aurions pu décider de construire un nouveau bâtiment pour y accueillir de vieilles locomotives. Il y aurait aussi d'innombrables vieux vélos, que nous n'avons pas encore, expliquait-il dans la *Luzerner Zeitung* sous forme de clin d'œil. Tout cela, ce sont des super hobbies. Mais ils ne nous font pas avancer en tant que société. Alors que l'énergie, elle, est liée à 100 % à la mobilité.»

L'énergie comme mode de propulsion ne constitue toutefois qu'un aspect de l'exposition. Celle-ci met également en lumière des thématiques d'actualité comme le réchauffement climatique, la protection du climat ou la garantie future de l'approvisionnement en énergie. Un hologramme de Bertrand Piccard, pionnier suisse

de l'environnement, nous entraîne dans un voyage vers le système énergétique suisse renouvelable de 2050, tandis qu'un globe numérique permet de visualiser le lien entre l'utilisation de l'énergie par l'être humain et son impact sur le climat et la planète.

### L'art de faire passer le message

Mais comment s'y prend-on pour communiquer sur des sujets scientifiques complexes de manière adaptée aux tranches d'âge d'un large public? «Au cours des trois premiers mois, *'Experience Energy!'* a atteint les 200 000 visiteurs, relève Alicia Siliézar. C'est une visibilité impressionnante. Ce sont surtout des grands-parents et leurs petits-enfants qui viennent. Et là réside le grand défi: comment créer des objets d'exposition et des ateliers qui couvrent une telle différence d'âge?»

Il n'existe pas de recette miracle pour l'expo parfaite. «Les objets émergent de la collaboration, explique Alicia Siliézar. En tant qu'institutions, nous fournissons les idées, nous les discutons à fond et nous en cherchons la bonne réalisation avec le Musée des transports.»

C'est ainsi qu'*'Emission Explorer'* a vu le jour: en se fondant sur une étude scientifique de l'Empa, l'initiative s'est accordée sur les cinq questions du quotidien. «Au fil des discussions, une idée a émergé: emprisonner le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) en train de se former dans un ballon pour le visualiser», raconte Alicia Siliézar.

Le premier prototype était une simple boîte à chaussures qui gonflait un ballon *via* un système hydraulique et qui soufflait le dioxyde de carbone contenu en lui au visage des visiteurs. «Par la suite, nous sommes tombés d'accord sur une variante, où un ballon numérique apparaissait à l'écran», se souvient Alicia Siliézar. Avant d'ajouter en riant: «Mais le système hydraulique et donc les pompes à activer sont restés. Car les visiteurs ne veulent pas seulement un message facile à comprendre, mais quelque chose à toucher.»

### Chacun apporte sa propre expertise

Il n'y a pas que la science qui doit être transmise. Dans une initiative commune aussi diversifiée, des compétences en communication interne sont également requises: «C'est la première fois que l'on vise une coopération de ce genre, intégrant les différences de perspectives et de besoins des institutions impliquées, souligne Alicia Siliézar. Nous avons beaucoup appris les uns des autres en collaborant pour réaliser des objets d'exposition et des ateliers intéressants.»

Une partie importante de l'ES4T consiste également à organiser des événements sur place. «En coopération avec l'iLab, le laboratoire des élèves du PSI, nous avons pu organiser un atelier au Musée des transports pendant les Journées de l'énergie: le week-end thématique sur les énergies renouvelables, raconte Alicia Siliézar. Lors de cet événement de trois jours, les enfants ont



«Par cette initiative commune, nous portons vers un public familial un faisceau de savoirs issus de notre recherche dans le Domaine des EPF.»

Mirjam van Daalen, responsable de la communication du PSI

pu mettre la main à la pâte et mener des expériences simples sous la direction d'experts et de chercheurs du PSI.»

Dans la conception d'objets d'exposition, il faut faire preuve de beaucoup de créativité: «En ce moment, nous travaillons à mettre au point un diorama, c'est-à-dire une vitrine composée d'éléments mécaniques et numériques, explique Alicia Siliézar. Dans le cadre de quatre histoires, qui correspondent aux quatre saisons, les visiteurs en apprennent davantage sur les différentes formes de stockage de l'énergie dans un système flexible. Dans ce cas précis, le lead est chez nous, au PSI.» En même temps, l'ETH Zurich est en train d'élaborer un dispositif interactif pour les tout-petits, destiné à expérimenter différentes formes d'énergie avec les sens. «L'idée est avant tout d'interpeller un très jeune public, mais aussi de permettre à leurs accompagnants d'apprendre quelque chose de nouveau», précise Alicia Siliézar.

L'exposition *«Experience Energy!»* s'agrandit: en plus de leur empreinte carbone personnelle, les visiteurs pourront bientôt en apprendre davantage sur des aspects passionnants de la recherche énergétique menée au sein du Domaine des EPF. ●

# Actualité de la recherche au PSI

## 1 Les sources du smog à Beijing

Chaque année, la pollution atmosphérique est responsable de plusieurs millions de décès dans le monde. A Beijing, la capitale chinoise, des mesures locales et régionales ont permis d'améliorer la qualité de l'air, mais pas tout à fait au niveau espéré.

Des scientifiques du PSI, de l'Université de technologie chimique de Beijing et de l'Université d'Helsinki ont utilisé une nouvelle méthode pour mieux étudier le smog dans la métropole. Ils l'ont analysé au niveau moléculaire grâce à un spectromètre de masse, en vue d'en comprendre les sources et la formation.

Résultat: les particules fines organiques secondaires – en suspension dans l'air et qui se sont formées dans l'atmosphère – proviennent de sources distinctes suivant la saison: en hiver, de la combustion du bois et du charbon dans la grande région Beijing-Tianjin-Hebei; en été, lorsque les courants d'air viennent du sud, les émissions urbaines, par exemple celles du trafic routier et de l'industrie, prédominent et proviennent probablement de la zone Xi'an-Shanghai-Beijing, encore plus vaste. Dès lors, il est clair que les causes de la pollution atmosphérique ne se situent pas seulement dans la métropole, mais à des centaines de kilomètres de là.

Informations supplémentaires:  
<https://bit.ly/4hdHIGk>



## 2 L'ESA s'implante en Suisse

L'Agence spatiale européenne (ESA) a un nouveau point d'ancrage en Suisse: l'European Space Deep-Tech Innovation Centre ESDI, qui a été lancé en collaboration avec le PSI. Son siège se trouve au Park Innovaare, à proximité immédiate du PSI.

Le contrat signé entre l'ESA et le PSI définit une première plate-forme de l'ESDI: le Phi-Lab, rattaché au PSI, qui crée des instruments pour encourager l'innovation. Sa mission est de monter des programmes de recherche qui soutiennent financièrement de nouveaux projets innovants en Suisse. Le premier de ces programmes d'encouragement démarre en 2025 et se concentre sur des développements technologiques dans les domaines de la recherche quantique, de la science des données et des sciences des matériaux.

L'ESDI a été lancé par le secrétariat d'Etat à la formation, à la recherche et à l'innovation (SEFRI) et est soutenu, depuis 2025, par le Domaine des EPF.

Informations supplémentaires:  
<https://bit.ly/4i2g00f>



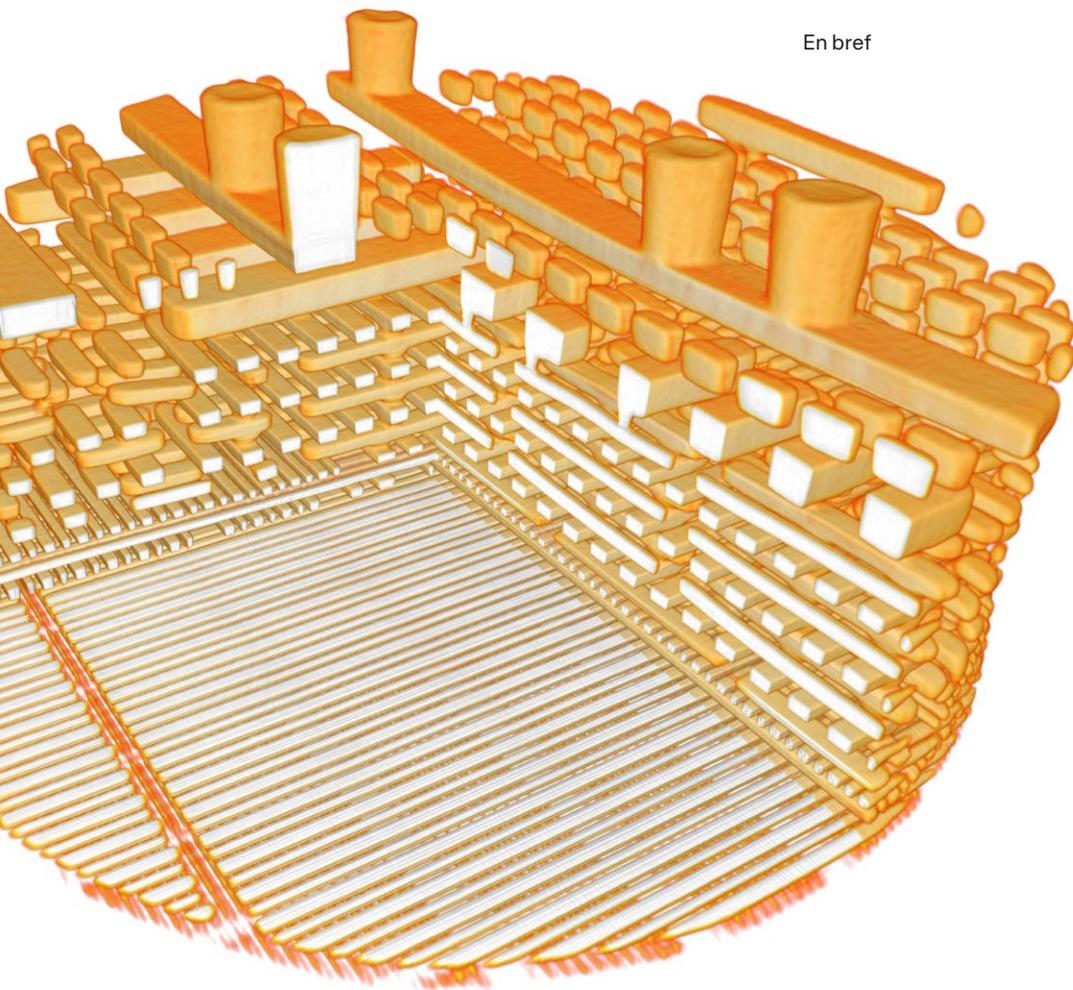
## 3 92 millions d'années

Si l'on veut expliquer la formation des astéroïdes et des planètes ou encore dater les roches, il est crucial de connaître la demi-vie du samarium-146 de manière aussi précise que possible. Un nouveau résultat de recherche vient de fournir la valeur suivante:  $92,0 \pm 2,6$  millions d'années. C'est le temps qu'il faut pour que la moitié de cet isotope radioactif se désintègre. Des mesures antérieures, menées depuis les années 1950, parvenaient à des résultats contradictoires.

Etant donné que le samarium-146 n'existe pas sur Terre, les expériences et les mesures qui l'impliquent représentent un réel défi. Cette détermination a été réalisée dans le cadre d'une collaboration entre le PSI et l'Université nationale australienne. Les scientifiques ont réussi à extraire une minuscule quantité de samarium-146 d'un échantillon irradié à la source de neutrons de spallation suisse SINQ. Cette quantité était extrêmement faible: un seul grain de sucre en poudre pèse dix fois plus. Les mesures nécessaires ont donc duré plusieurs mois. Les scientifiques ont utilisé des méthodes ultramodernes pour déterminer avec précision le nombre d'atomes du samarium-146 ainsi que leur taux de désintégration. C'est sur cette base qu'ils ont pu calculer sa demi-vie.

Informations supplémentaires:  
<https://bit.ly/4hV5cRt>





**4** nanomètres ou 4 millièmes de millimètre: telle est la résolution que la nouvelle méthode de ptychographie a permis d'atteindre.

**15** millions d'images de détecteurs ont été produites pour reconstituer la puce en 3D.

**100** millions de transistors par millimètre carré se trouvent sur les puces informatiques modernes.

#### 4 Nouveau record mondial de microscopie à rayons X

Visualiser une puce informatique ultra-moderne en trois dimensions avec une résolution de 4 nanomètres: c'est le record mondial de microscopie à rayons X que les chercheurs du PSI ont établi dans le cadre d'une collaboration avec l'ETH Lausanne EPFL, l'ETH Zurich et l'University of Southern California.

Les puces informatiques sont des petites merveilles de technologie. Aujourd'hui, il est possible de loger plus de 100 millions de transistors par millimètre carré dans des circuits intégrés. Et la tendance est à la hausse. Dans les salles blanches, des installations optiques hautement automatisées gravent des pistes conductrices de la taille du nanomètre sur des pièces en silicium. Cette production est coûteuse et compliquée, de même que de caractériser et de visualiser les minuscules structures obtenues.

Pour ce faire, les scientifiques ne misent pas sur des lentilles optiques mais sur ce qu'on appelle la «ptychographie»: un procédé informatique qui réunit beaucoup d'images isolées en une seule prise de vue à haute résolution. Grâce à un raccourcissement du temps d'exposition et à l'optimisation d'un algorithme, ils ont réussi, et de loin, à battre leur propre record du monde de 2017. Pour leurs expériences, ils ont utilisé la lumière de type rayons X de la Source de Lumière Suisse SLS.

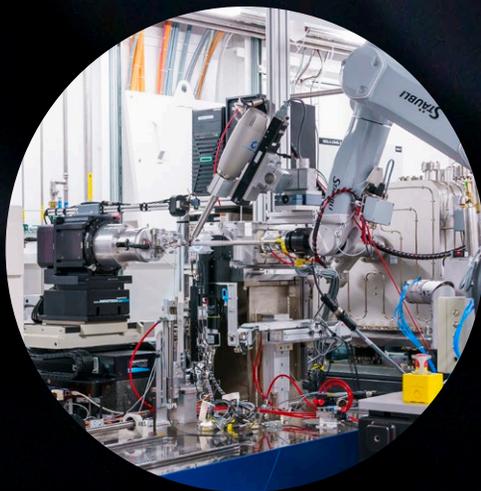
Informations  
supplémentaires:  
<https://bit.ly/3Xkg2IA>



# Kelvin: l'échelle du froid

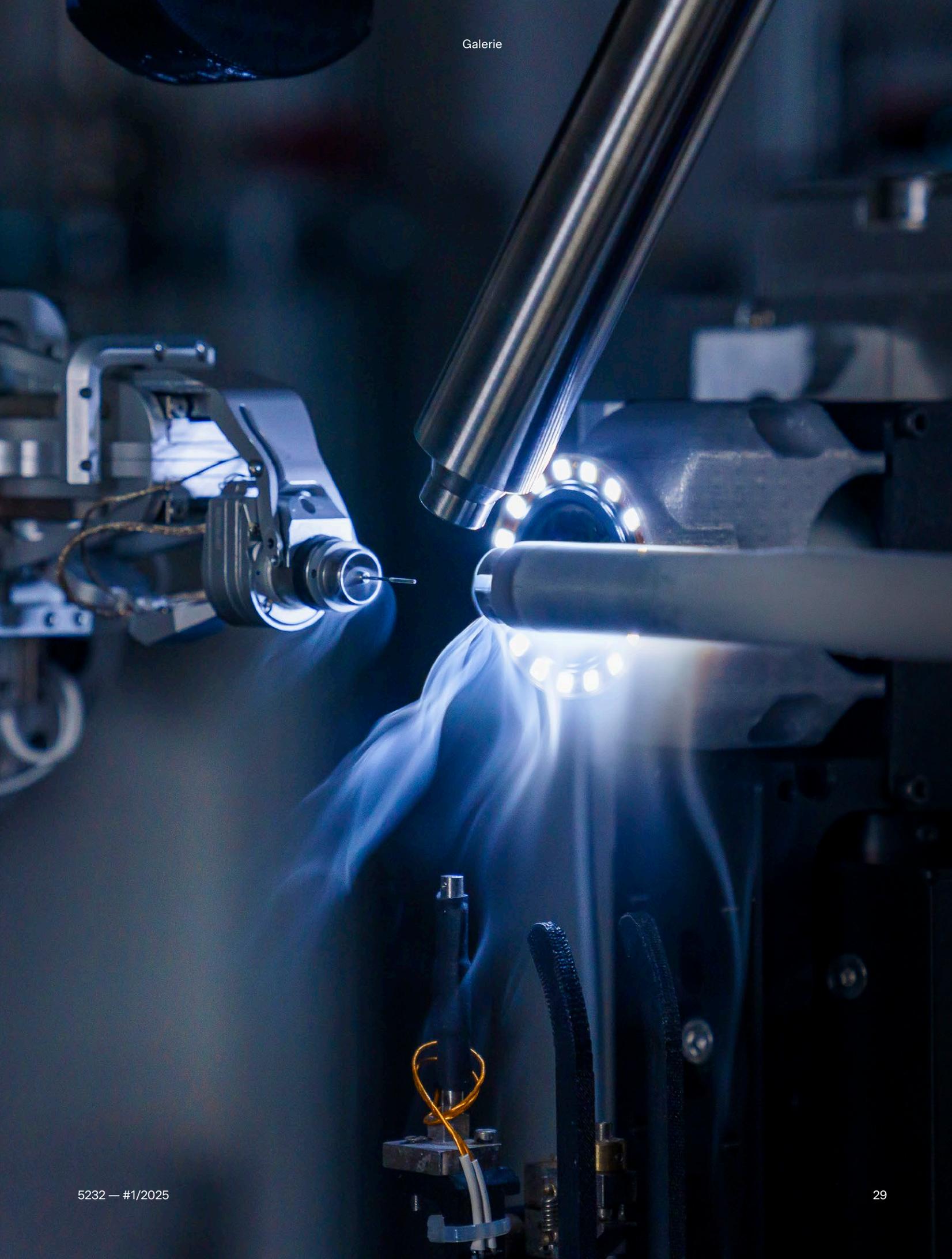
Zéro Kelvin, c'est le zéro absolu de la température. Comme la chaleur est de l'énergie, le froid, lui, est synonyme d'énergie moindre. Mais il n'existe pas d'énergie négative. Exprimé sur l'échelle Celsius qui nous est familière, zéro Kelvin (0 K) correspond à  $-273,15$  degrés Celsius: rien ne peut être plus froid. Certains scientifiques du PSI réalisent des expériences à basses températures, proches de ce chiffre; d'autres bricolent pour abaisser la température le plus efficacement possible.

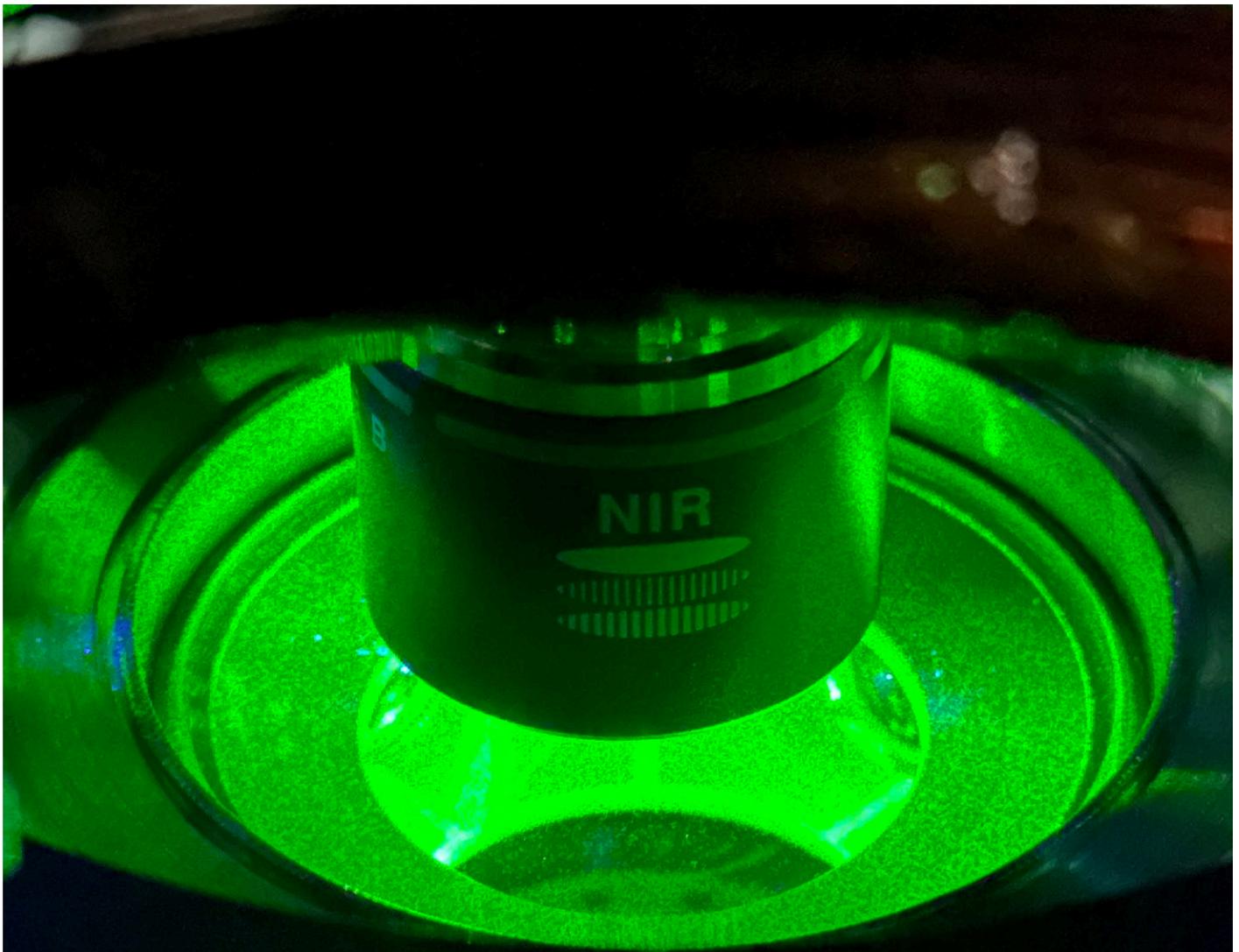
Texte: Christian Heid



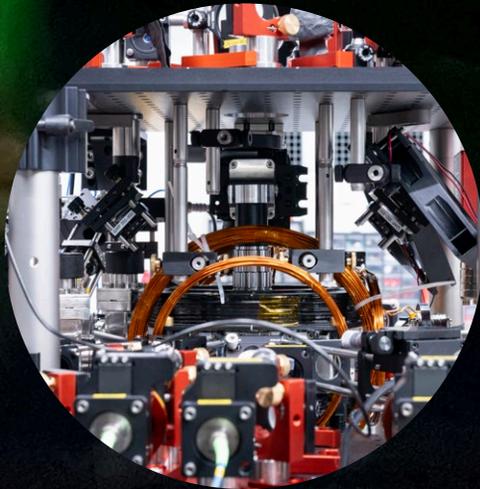
## Echantillon de protéines

On devine des cristaux de glace à l'extrémité du bras robotisé, sur le porte-échantillon tubulaire, qui s'est déplacé horizontalement depuis le bord droit de l'image jusqu'à l'avant du cercle lumineux: le robot prélève automatiquement des échantillons de protéines dans un bain d'azote liquide refroidissant et les amène au poste d'expérimentation qui se trouve, comme une aiguille, en face du porte-échantillon. Les cristaux de protéines sont ensuite irradiés avec de la lumière de type rayons X à la Source de Lumière Suisse SLS. A partir du diagramme de diffraction, il est alors possible de calculer la structure tridimensionnelle de la protéine. Les scientifiques obtiennent ainsi des informations sur l'architecture moléculaire et sur le fonctionnement des protéines.





## Atomes froids

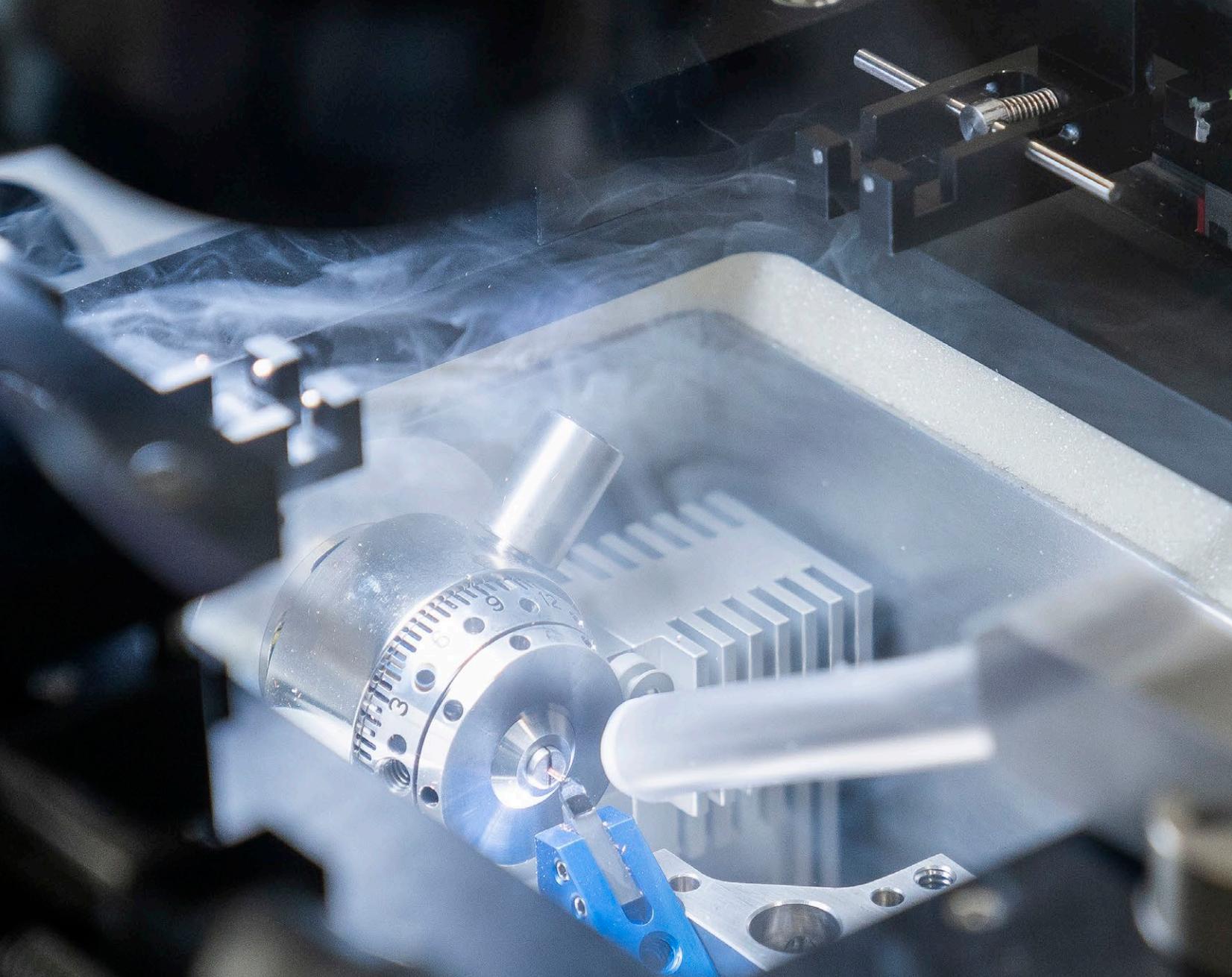


Une lumière verdâtre se répand depuis la chambre d'expérimentation à vide, où se trouvent des atomes qu'il s'agit de refroidir. La lumière verte, qui provient d'un laser, percute ces atomes de manière parfaitement coordonnée. Lorsqu'ils absorbent l'énergie de quelques paquets de lumière, ils libèrent immédiatement davantage d'énergie et deviennent donc, à chaque fois, plus froids. Ce principe porte le nom de «refroidissement par laser» («*laser cooling*»). Il amène les atomes à une température, proche du zéro absolu, de  $-273,15$  degrés Celsius. De cette manière, leur nature quantique devient saisissable et analysable. Au Centre des sciences photoniques, cette méthode permet d'acquérir de nouvelles connaissances dans le domaine de la mécanique quantique.

## Caloducs oscillants

Dans ces fins tubes chauffants d'apparence argentee se trouve un flux biphasique d'hélium ou de néon: cela signifie que les substances contenues sont disponibles en partie sous forme gazeuse et en partie sous forme liquide. Les tubes, disposés à la verticale, sont reliés à leur extrémité inférieure à une source de chaleur. A leur extrémité supérieure, un condenseur est relié à un cryoréfrigérateur: cet appareil de refroidissement permet d'obtenir des températures basses et constantes, inférieures à  $-240$  degrés Celsius. Dans ce système, appelé «caloducs oscillants» ou «*pulsating heat pipes*», le flux d'hélium ou de néon produit un transfert de chaleur efficace et passif. Cette connexion thermique est un élément-clé pour l'optimisation des systèmes supraconducteurs qui doivent être refroidis à basses températures. Le développement et l'application de ce dispositif font partie des efforts conjoints de la section Aimants du PSI et de la société VDL ETG (voir page 20).





## Coupes de tissus

L'intérieur du microtome, instrument utilisé pour réaliser des coupes, baigne dans un brouillard d'azote froid. Une lame en diamant est fixée sur un support bleu. Directement derrière la surface de coupe de la lame se trouve un très petit échantillon de tissus congelés, fixé dans une espèce de mandrin. L'échantillon est mû de haut en bas, pendant que la lame se déplace vers lui, ce qui permet d'obtenir des coupes ultrafines de 50 à 150 nanomètres d'épaisseur. L'échantillon doit être très froid pour être conservé, dans son état naturel, dans de la glace amorphe: à  $-150$  degrés Celsius. Au Laboratoire de recherche biomoléculaire, les préparations tissulaires ultrafines sont utilisées pour comprendre des processus physiologiques. De nouvelles possibilités thérapeutiques seront explorées à partir de là.



## Matériau quantique



Dans ce cryostat de deux mètres de diamètre, unique au monde – un appareil de refroidissement qui atteint des températures proches du zéro absolu –, se trouve un aimant quantique, dont on étudie les propriétés avec la lumière de type rayons X du SwissFEL, le laser à rayons X à électrons libres. A des températures très basses d'environ 1 Kelvin et moins, le matériau quantique adopte un état magnétique que la diffraction des rayons X permet de directement visualiser. Ici, on se penche par exemple sur l'influence des effets quantiques sur les domaines magnétiques ainsi que sur leur contrôle dynamique par des impulsions micro-ondes.



# Conseil en technologie de pointe

Stephanie Smit, ancienne doctorante au PSI, travaille comme ingénieur-conseil en propriété industrielle pour une société qui compte parmi les plus importantes au monde. Celle-ci construit en effet des machines qui valent une fortune et sont très recherchées.

Texte: Jan Berndorff

Une entreprise importante n'est pas forcément connue du grand public. Dans le classement des sociétés les plus valorisées au monde, Apple et Microsoft caracolent en tête avec chacune une valeur de marché de 3 000 milliards de dollars. Mais les affaires de ces deux grands groupes de la high-tech dépendent, pour le meilleur et pour le pire, d'une entreprise qui a son siège dans la paisible ville de Veldhoven, aux Pays-Bas, et où travaille, depuis cinq ans maintenant, Stephanie Smit, ancienne doctorante du PSI. La société ne figure pas parmi les plus chères du monde, mais avec une valeur de marché de 250 milliards de dollars, elle fait partie du top five en Europe. Pourtant, étonnamment, la plupart des gens ignorent son existence.

ASML? «Honnêtement, lorsque je me suis présentée à ce poste, je n'en avais jamais entendu parler non plus», avoue Stephanie Smit. ASML, coentreprise de Philips et d'ASM International, a été fondée en 1984 et a récemment connu une forte croissance: depuis 2019, son chiffre d'affaires a doublé pour atteindre 28 milliards de dollars par an et son bénéfice a plus que triplé pour s'élever à 8 milliards de dollars par an. ASML compte plus de 43 000 collaboratrices et collaborateurs dans le monde, dont 23 000 travaillent au siège.

Si presque personne ne connaît cette société, c'est parce qu'elle ne produit pas pour le consommateur final. Ses clients sont les grands fabricants de microprocesseurs comme Intel, Samsung et TSMC, qui fournissent à leur tour les entreprises de la tech comme Microsoft et Apple. ASML fabrique en effet des machines qui permettent d'«imprimer» des parties essentielles des microprocesseurs *via* un procédé de photolithographie. Et les microprocesseurs sont plus demandés que jamais, car elles équipent les ordinateurs, les téléphones mobiles, les tablettes et tous les appareils intelligents. Elles sont l'élément de base du monde numérique moderne.

ASML est le leader mondial du secteur des machines de photolithographie. «ASML est le groupe dont le monde dépend», titrait le journal autrichien *Der Standard* en 2023.

Dans cette société, Stephanie Smit veille en tant qu'ingénieur-conseil à ce que les nouvelles idées et technologies soient juridiquement protégées. Mais comment une ancienne chercheuse du PSI, spécialisée dans la nanofabrication, est-elle devenue conseil en brevets?

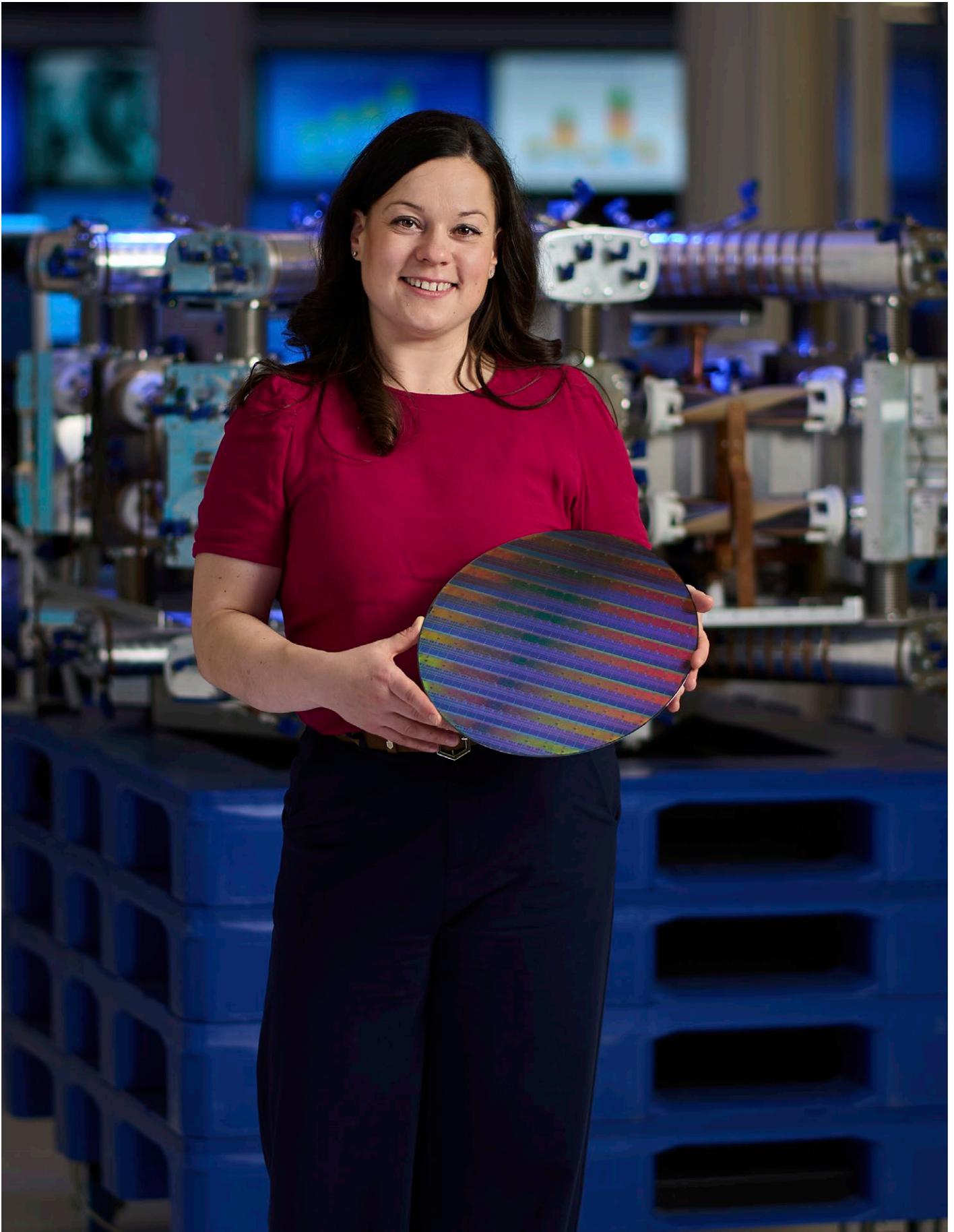
## Un ingénieur-conseil n'est pas forcément juriste

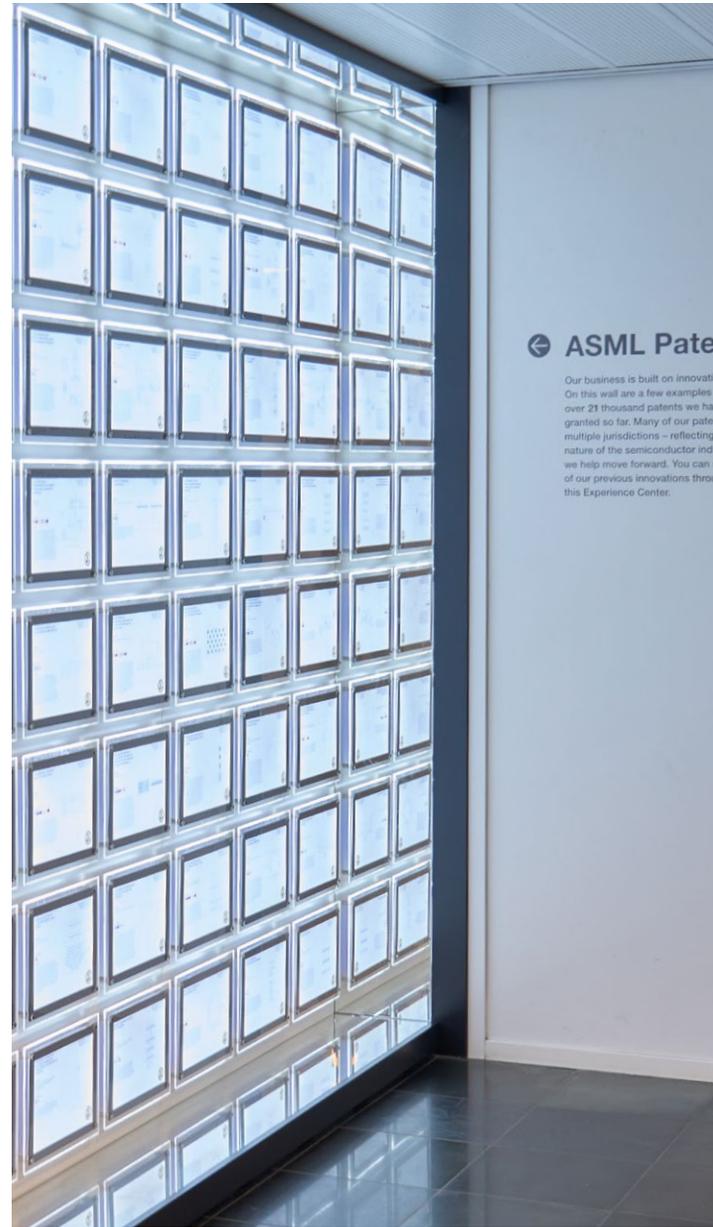
«Il existe un malentendu très répandu, selon lequel les conseils en brevets sont des juristes», explique Stephanie Smit. Il faut s'y connaître en droit des brevets, évidemment. Mais le contexte scientifique est tout aussi important, car la fonction exige de comprendre la recherche et la technologie qui sont derrière les produits et de traduire l'innovation en langage juridique. «Et, pour cela, mes études de physique, mais surtout mon travail au PSI représentaient la meilleure préparation possible», souligne Stephanie Smit.

Stephanie Smit a grandi en Ecosse, dans l'archipel des Shetland, et fait ses études à Aberdeen. «Mon père m'a transmis, dès l'enfance, sa passion pour la physique et la technique», raconte-t-elle. Ce pilote amateur émérite a su communiquer à sa fille sa fascination pour l'aéronautique. «J'ai passé mon brevet de pilote, dit-elle. Mais j'ai ensuite choisi quelque chose de plus terre à terre et suivi des études de physique.»

Stephanie Smit nourrissait en même temps un intérêt pour les langues et les cultures. Une fois son diplôme de premier cycle en poche, elle est partie un an à Cracovie pour s'immerger dans la culture polonaise. Hormis l'anglais et un peu de polonais, elle maîtrise aujourd'hui le français, l'allemand et le néerlandais. Pour son travail de conseil en brevets européens, cette aisance internationale, associée à son caractère ouvert et communicatif, représente un avantage indéniable. Après tout, elle doit échanger avec des spécialistes de différents pays en vue de protéger les brevets.

Après son diplôme, l'année passée à Cracovie l'a incitée à faire un stage à l'étranger. «J'ai posé ma candidature auprès de l'organisation IAESTE, qui prodigue





«Il n'y a pas si loin de la recherche high-tech  
à l'industrie high-tech.»

Stephanie Smit, conseil en brevets chez ASML

des stages techniques et scientifiques à l'étranger, y compris au Japon et au Canada, raconte-t-elle. Mais le PSI était mon premier choix, car on y mène de la recherche en étant en première ligne.» Ainsi, il lui a été proposé de collaborer de façon concrète sur un sujet complexe: l'imagerie ptychographique, qui consiste à balayer un échantillon avec un faisceau de particules et à l'observer au microscope. On attendait de Stephanie Smit qu'elle construise de manière autonome une configuration laser spéciale. «J'en savais très peu sur le sujet par mes études, dit-elle. Mais mes collègues m'ont beaucoup soutenue.»

Il s'est révélé passionnant de participer à cette démarche de recherche complètement nouvelle. A côté du travail, elle a apprécié ce premier séjour en Suisse, où elle a fait beaucoup d'activités avec d'autres stagiaires et étudiants. Elle y a notamment rencontré son mari, originaire des Pays-Bas et également en stage au PSI.

### Promotion à la Source de Lumière Suisse

Après avoir tous deux obtenu leur master à Aberdeen, ils sont revenus au PSI pour leur doctorat. Stephanie Smit a alors travaillé au Laboratoire de microtechnologie et nanotechnologie, où elle étudiait les structures magnétiques d'échantillons à l'aide de la Source de Lumière Suisse SLS. «Je suis très contente de ce que j'ai appris au PSI, dit-elle. Cela m'aide aujourd'hui dans mon travail. Mais surtout, j'y ai connu de nombreuses personnes formidables et brillantes, avec lesquelles je suis toujours en contact.»

C'est l'une de ses collègues qui lui a suggéré de devenir conseil en brevets: «Elle disait que, me connaissant, cela me plairait, raconte-t-elle. Il a d'abord fallu que je m'informe. Mais c'est un fait: ce travail correspond précisément à mes intérêts.» Après son doctorat, Stephanie Smit a suivi des études postuniversitaires dans le domaine des brevets à l'Université Queen Mary, à Londres, et travaillé pour un cabinet de conseil en brevets. «Mais l'atmosphère internationale de la recherche et le lien avec la technologie me manquaient, dit-elle. De plus, mon mari et moi-même avons eu entre-temps deux de nos trois enfants et nous voulions les élever aux Pays-Bas.»

Lorsqu'elle a appris qu'ASML cherchait un conseil en brevets, elle y a vu une opportunité. «Et, effectivement, lors de l'entretien d'embauche, nous avons tout de suite senti que les choses s'emboîtaient bien, notamment en raison de mon passé au PSI: il n'y a pas si loin de la recherche high-tech à l'industrie high-tech.»

Au sujet des machines de son employeur, Stephanie Smit déclare: «Les toutes dernières installations de photolithographie font probablement partie des machines les plus complexes que l'humanité ait

jamais inventées.» Elles sont grandes comme une maison et bourrées de technique laser et d'éléments optiques.

*Grosso modo*, la photolithographie fonctionne de la manière suivante: de la lumière fortement concentrée est projetée à travers un masque sur une plaque de silicium – appelée «*wafer*» – de quelques millimètres d'épaisseur. Ce faisant, une couche de résine photosensible – appelée «*photoresist*» – est fixée en de minuscules structures, pendant que le reste de la couche non exposé est éliminé avec précision. Ou inversement. La procédure se répète plusieurs fois et, pour finir, on obtient un *wafer* apparemment lisse, sur lequel de petits transistors microscopiques sont disposés en rangs serrés. C'est au moyen de ces commutateurs que la micropuce électronique traite les charges de travail de calcul.

### Une question de longueur d'onde

Les machines de photolithographie utilisent la lumière ultraviolette (UV), car sa faible longueur d'onde permet des marquages plus précis que la lumière visible. La densité des transistors détermine la puissance de la micropuce. ASML a débuté avec 2200 transistors par millimètre carré. Aujourd'hui, la même surface minuscule en héberge 45 millions.

Les appareils modernes travaillent avec ce qu'on appelle le «*deep ultraviolet*» (DUV), c'est-à-dire des UV profonds, le plus souvent d'une longueur d'onde de 193 nanomètres. ASML possède une part d'environ 85 % du marché mondial de ces machines. Mais c'est le seul fournisseur au monde à proposer depuis peu des systèmes EUV (ultraviolet extrême), d'une longueur d'onde de 13,5 nanomètres seulement, ce qui permet de réaliser des puces encore plus puissantes.

ASML a livré sa première machine EUV à Intel début 2024. Selon l'agence de presse Reuters, pour un prix d'environ 350 millions de dollars. Mais les variantes DUV ne sont guère meilleur marché. Il n'est donc pas étonnant qu'ASML gagne bien en écoulant seulement quelques centaines de ces engins par an. Et rien d'étonnant à ce que les personnes privées soient rarement en contact avec ceux-ci et qu'ASML ne soit pas aussi connue que Microsoft ou Apple.

Nulle surprise donc si Stephanie Smit trouve passionnant de négocier les brevets d'un tel fabricant: ASML en détient plus de 21000 au total, au sujet de toutes sortes de pièces et de mécanismes de machines. «Cela fait maintenant cinq ans et je suis encore vivement impressionnée de travailler pour une entreprise dont dépendent tant de choses, déclare Stephanie Smit. Mais ce qui me plaît tout particulièrement ici, ce sont mes collègues. Ils sont aussi formidables que ceux du PSI!» ●

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



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 2300 collaboratrices et 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 scientifiques, 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 scientifiques.

S'ils veulent obtenir du temps de mesure pour leurs expériences, les scientifiques 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 scientifiques 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 de ceux-ci. Lors de leurs expériences, les scientifiques «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.

## L'Institut Paul Scherrer 5232 Villigen PSI, Suisse



800  
articles scientifiques publiés  
chaque année dans des revues  
spécialisées et qui reposent  
sur des expériences menées  
aux grandes installations  
de recherche

5000  
scientifiques du monde entier  
mènent chaque année  
des expériences à ces grandes  
installations de recherche

5  
grandes installations de recherche  
uniques en Suisse

#### Nos quatre principaux domaines de recherche

Mais le PSI n'est pas seulement prestataire de services pour d'autres scientifiques; il a son propre programme de recherche et ce dernier est ambitieux. Les découvertes faites par les scientifiques 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 scientifiques 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 quatre points principaux. Dans le domaine Technologies d'avenir, nous étudions les multiples propriétés des matériaux. Avec ces connaissances, nous créons les bases de nouvelles applications – que ce soit en médecine, dans

les technologies de l'information, dans la production et le stockage énergétiques – ou de nouveaux procédés de production dans l'industrie.

Dans le domaine Energie et climat, nos travaux ont pour objectif de développer de nouvelles technologies pour un approvisionnement énergétique durable, sûr et respectueux de l'environnement. De plus, nous y étudions les interdépendances au sein du système climatique de la Terre.

Dans le domaine Innovation santé, les chercheuses et les chercheurs s'efforcent d'identifier les causes de certaines maladies et les méthodes thérapeutiques possibles. Par ailleurs, nous exploitons la seule installation de Suisse permettant de traiter des 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.

Dans le domaine Fondements de la nature, les scientifiques cherchent des réponses à la question essentielle des structures élémentaires de la matière et des principes fondamentaux de la nature. Ils étudient la structure et les propriétés des particules élémentaires – les plus petits composants de la matière – et élucident des processus primordiaux chez les organismes vivants. Ces connaissances ouvrent de nouvelles pistes de réflexion en science, en médecine ou dans le domaine des technologies.

#### Les cerveaux derrière les machines

Le travail aux grandes installations de recherche du PSI est exigeant. Nos scientifiques, ingénieurs et professionnels sont des experts hautement spécialisés. Pour nous, il est important de préserver ces connaissances. Nous attendons donc de nos collaboratrices et 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 collaboratrices et collaborateurs sont des apprentis, des doctorants et des postdocs.

Impressum

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

Paraît deux fois par an.  
Numéro 1/2025 (avril 2025)  
ISSN 2571-6891

#### Editeur

Institut Paul Scherrer  
Forschungsstrasse 111  
5232 Villigen PSI  
www.psi.ch

#### Rédaction

Monika Gimmel,  
Martina Gröschl,  
Christian Heid,  
Dr Laura Hennemann (resp.),  
†Sebastian Jutzki (resp.),  
Benjamin A. Senn,  
Dr Mirjam van Daalen

#### Traduction

Catherine Riva

#### Correction

Étienne Diemert

#### Concept de design

Scholtysik & Partner AG et  
Studio HübnerBraun

#### Conception, direction artistique et mise en page

Studio HübnerBraun

#### Photos

Institut Paul Scherrer PSI/  
Markus Fischer, sauf: pages 35–36:  
Henning Mack; page 41: Adobe Stock.

#### Génération d'images par IA

Page 15: Adobe Stock (IA);  
Page 10: Midjourney par Studio  
HübnerBraun.

#### Infographies

Studio HübnerBraun,  
sauf: pages 6–7: Daniela Leitner;  
pages 16–17, 20: Mahir Dzambegovic.

#### Pour en savoir plus sur le PSI

www.psi.ch/fr/

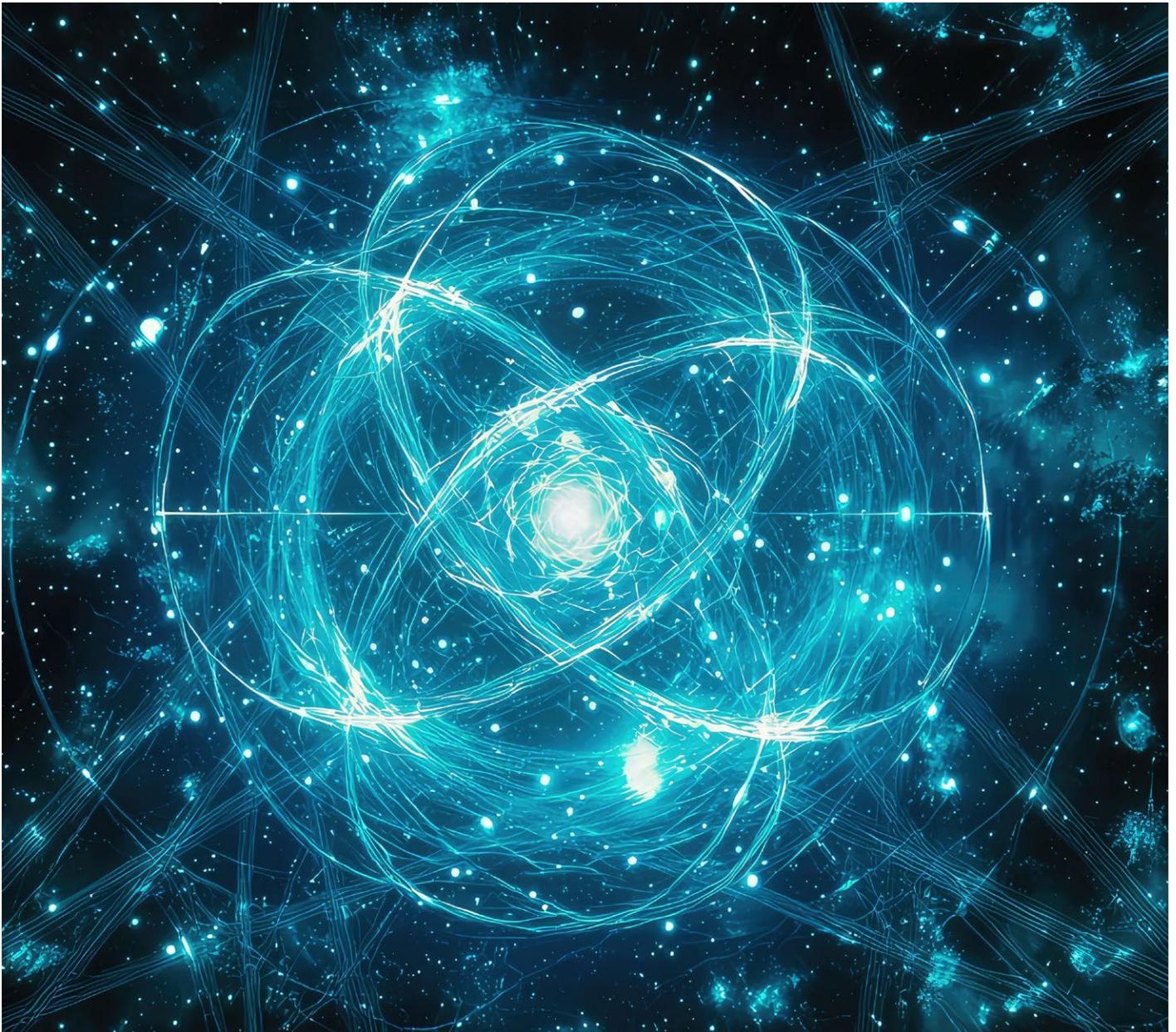
#### 5232 est disponible sur Internet et sur abonnement gratuit

www.psi.ch/fr/5232

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

www.psi.ch/de/5232

www.psi.ch/en/5232



## Ce qui vous attend dans le prochain numéro

Il y a cent ans, en 1925, l'humanité découvrait comment la nature se comporte et se laisse décrire dans l'infiniment petit: la mécanique quantique était née. Cette théorie permet de représenter les lois physiques, au niveau des atomes et en deçà, par des formules mathématiques, de sorte que des prédictions deviennent possibles.

Aujourd'hui, la mécanique quantique est un domaine central de la physique moderne à l'origine d'innombrables développements et technologies. Leurs effets sont exploités, au PSI, dans le cadre d'expériences modernes. On fraie la voie qui mène aux calculateurs quantiques. Les propriétés quantiques de matériaux novateurs sont étudiées et pourraient constituer la base de technologies futures. Et même dans le développement de produits pharmaceutiques, la mécanique quantique vient prêter main-forte.



**Institut Paul Scherrer PSI**  
Forschungsstrasse 111  
5232 Villigen PSI  
Suisse  
[www.psi.ch](http://www.psi.ch)