

Le magazine de l'Institut Paul Scherrer

01 / 2024

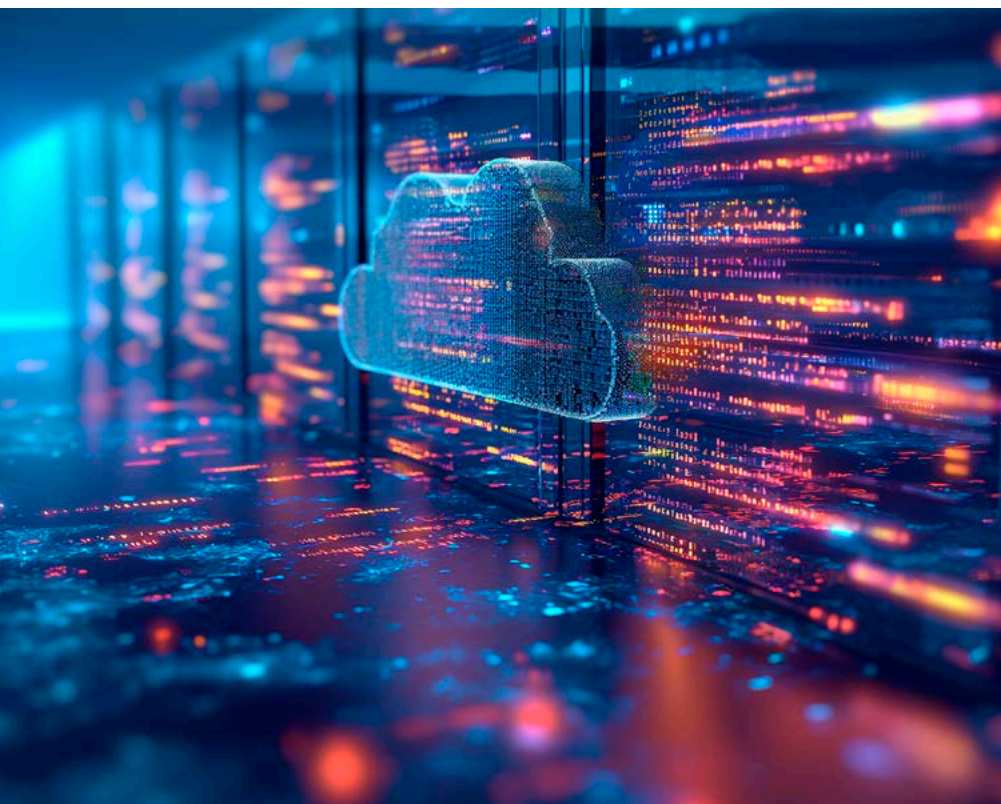
2025

DOSSIER

VERS PLUS DE SAVOIR, RAPIDEMENT, AVEC L'IA



DOSSIER: VERS PLUS DE SAVOIR, RAPIDEMENT, AVEC L'IA

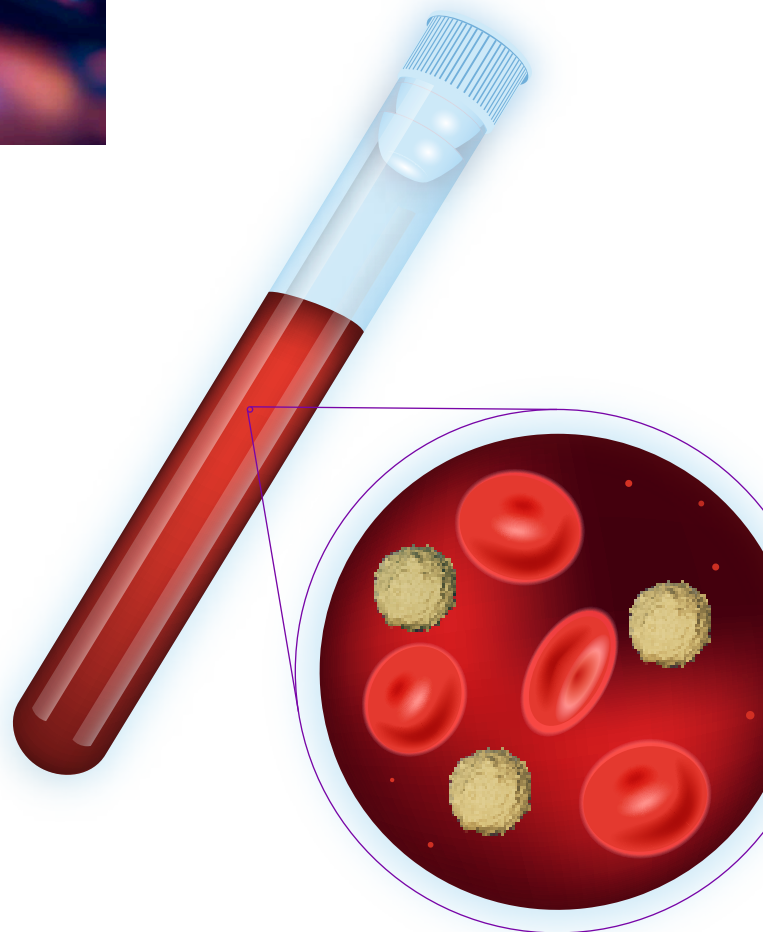


TOILE DE FOND

Un raccourci possible

Les scientifiques du PSI ouvrent de nouvelles voies vers la connaissance. Par exemple, en découvrant de nouveaux matériaux, en améliorant la sécurité des centrales nucléaires ou en optimisant les analyses d'aérosols dans la recherche atmosphérique.

Page 10





TOILE DE FOND

Un changement fondamental

Les protéines sont les bêtes de somme du vivant. Sans elles, il ne se passe rien dans les cellules biologiques. Leur composition en différents acides aminés est cruciale pour leur fonction. Ces derniers, alignés comme les perles d'un collier, déterminent leurs propriétés. Les scientifiques du PSI utilisent l'intelligence artificielle pour déchiffrer ce code.

Page 18

INFOGRAPHIE

Les tumeurs en ligne de mire

Entre autres, l'intelligence artificielle est capable de reconnaître des modèles de manière rapide et précise. Son point fort: formée de manière adéquate, elle peut également identifier des modèles qui lui étaient inconnus jusque-là. Les scientifiques du PSI exploitent cet aspect pour améliorer à la fois le diagnostic des tumeurs et le suivi du succès thérapeutique.

Page 16

CONTENU

EDITORIAL	4
QUOTIDIEN	
Tout en couleurs	6
RECHERCHE	
Optimiser la production	7
 DOSSIER: VERS PLUS DE SAVOIR, RAPIDEMENT, AVEC L'IA	8
 TOILE DE FOND Un raccourci possible	10
 INFOGRAPHIE Les tumeurs en ligne de mire	16
 TOILE DE FOND Un changement fondamental	18
EN IMAGE	
Le mystère de la formation des nuages	21
EN SUISSE	
De l'espoir pour les enfants cancéreux	22
Depuis deux décennies, l'expertise du Centre de protonthérapie dans le traitement des jeunes patients est sollicitée dans toute la Suisse.	
EN BREF	
Actualité de la recherche au PSI	26
1 Etude sur le trafic aérien climatiquement neutre	
2 Aperçu sur l'impression 3D	
3 De meilleures batteries pour les voitures électriques	
4 Reprogrammation mécanique des tissus	
GALERIE	
Des idées qui font mouche	28
Nous avons confié aux scientifiques une tâche délicate: esquisser l'idée de base de leur recherche au moyen d'un simple dessin. Résultat: des réponses qui mettent dans le mille et qui laissent pressentir, mieux que les mots, ce dont il s'agit.	
PORTRAIT	
Le réseau, un énorme atout	34
Torsten Tritscher travaille comme ingénieur pour l'entreprise américaine TSI, qui développe des appareils de mesure de la qualité de l'air et les distribue dans le monde entier. Il a acquis une bonne partie de ses compétences pendant son doctorat au PSI.	
QUI SOMMES-NOUS?	38
IMPRESSUM	40
DANS LE PROCHAIN NUMÉRO	41



Christian Rüegg, directeur du PSI



Un formidable outil

L'intelligence artificielle (IA) fait beaucoup parler d'elle. Elle transforme la recherche moderne et améliore la manière dont nous faisons de la science, tout en accélérant le rythme des découvertes. Elle est devenue, en peu de temps, un outil de recherche indispensable et contribuera certainement à résoudre nombre d'énigmes.

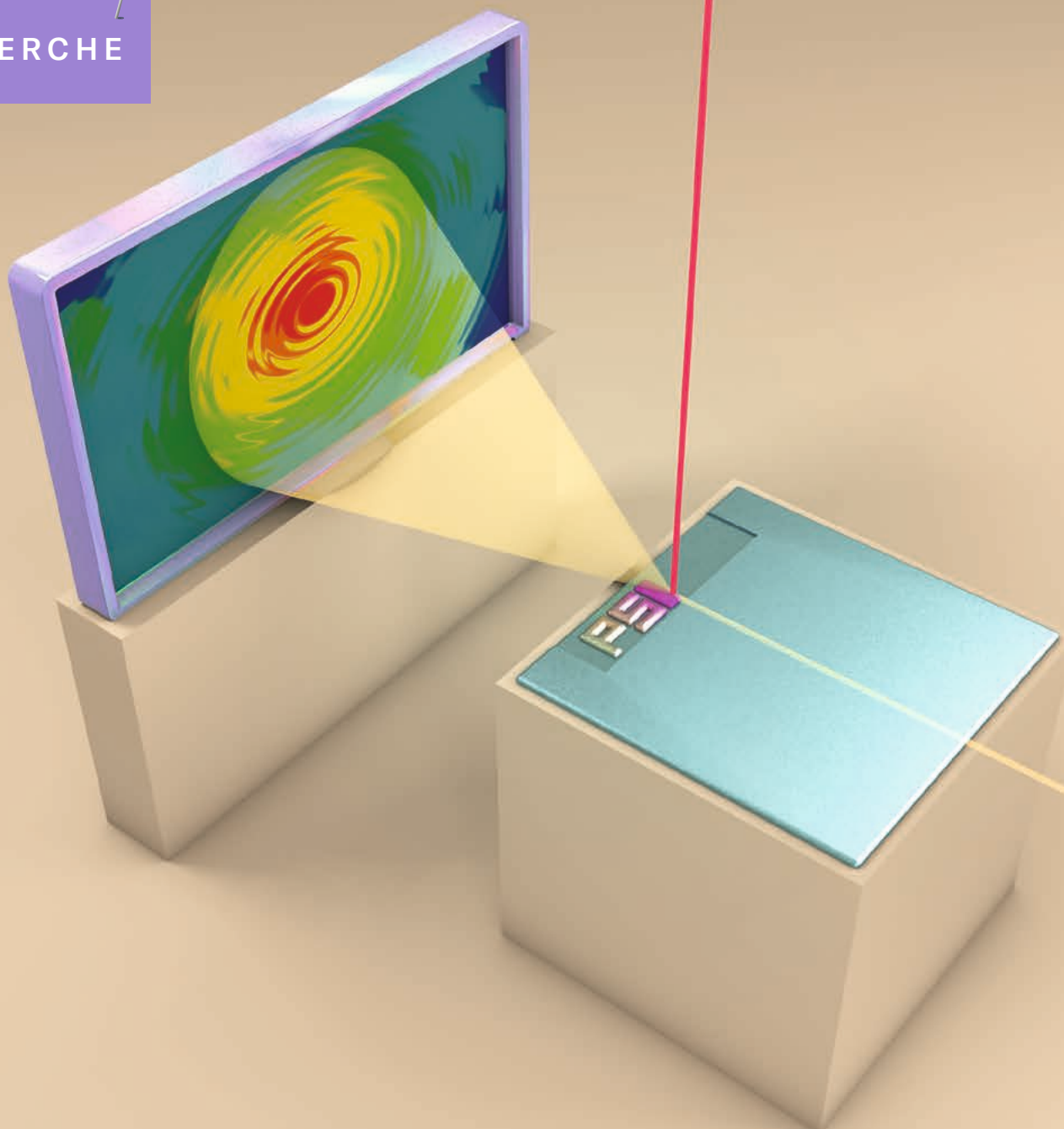
Deux points forts de l'IA résident dans sa capacité à, d'un côté, exploiter d'énormes quantités de données et, de l'autre, à identifier les schémas avec rapidité et précision dans ces vastes jeux de données. Or, ces deux qualités répondent précisément aux exigences de nombreux scientifiques au PSI. En effet, avec nos grandes installations de recherche, nous créons d'énormes quantités de données. Pour les traiter, nous avons besoin des modèles de l'IA, mais aussi de l'infrastructure adéquate, par exemple de lignes de données et d'ordinateurs. Aujourd'hui, l'IA fournit une aide précieuse pour accomplir des progrès dans les domaines qui jouent un rôle central au PSI: par exemple dans la recherche médicale et pharmaceutique ou encore les sciences de l'énergie et de l'environnement. Dans ce numéro, nous vous présentons quelques exemples remarquables montrant que l'intelligence artificielle est un formidable outil. Mais nous aurons toujours besoin de têtes pensantes pour l'utiliser à bon escient. Si l'on veut qu'elle serve le bien commun, il faut user de cette nouvelle technologie de manière responsable, cela va de soi.

Outre son utilité, l'IA peut apporter plus de joie dans la vie. Pour le démontrer, nous avons conçu une partie de ce numéro avec des applications d'IA, toujours sous la direction professionnelle de nos collaborateurs, bien entendu. Le décor où vous me voyez en est un bon exemple: cette salle de serveurs n'existe pas dans la réalité, ni sur le site du PSI, ni ailleurs. C'est une pure invention de l'IA qui l'a générée. Je vous invite à vous immerger dans l'univers fascinant de la recherche menée au PSI avec l'IA.

Tout en couleurs

La lumière du jour se compose d'une multitude de couleurs différentes, comme le montre l'arc-en-ciel. On peut également l'observer en exposant la face inférieure d'un CD ou d'un DVD à la clarté. Les mêmes reflets irisés apparaissent alors. Ce phénomène est dû à la diffraction de la lumière, composée de longueurs d'onde très différentes. Nous percevons chacune sous forme de couleur: bleu, vert, jaune ou rouge. Contrairement à ce que sa surface réfléchissante pourrait laisser croire, la face inférieure d'un DVD n'est pas lisse, mais présente de minuscules sillons et saillies qui servent à stocker l'information. Si la lumière blanche tombe dessus, elle est diffractée par ces sillons et saillies. Sa diffraction s'opère de manière différente pour chaque couleur, ce qui entraîne de nouveau sa décomposition en diverses composantes colorées. Nos yeux peuvent alors les percevoir séparément et se délecter de leurs irisations.





Optimiser la production

La lumière de type rayons X peut être diffractée tout comme la lumière visible. Par exemple, quand elle traverse un échantillon de matériau. Derrière ce dernier, selon sa nature, on obtient un diagramme de diffraction spécifique, un peu comme lorsque la lumière éclaire la face inférieure d'un DVD. Pour les profanes, ces diagrammes de diffraction semblent diffus. Mais les scientifiques du PSI sont en mesure d'en déduire, grâce à des procédés complexes, la nature précise de l'échantillon. Ils utilisent ensuite ces informations pour optimiser l'impression 3D. Un laser (représenté ici sous forme de rayon rouge), dirigé sur une poudre, la solidifie couche par couche. Les rayons X produits à l'aide de la Source de Lumière Suisse SLS traversent l'échantillon et sont diffractés en fonction de sa nature. Par l'analyse du diagramme de diffraction, les scientifiques sont capables d'identifier des modifications structurelles locales et d'établir une corrélation avec les paramètres d'impression.



1

TOILE DE FOND
Un raccourci possible
Page 10



Vers plus de savoir, rapidement, avec l'IA

L'intelligence artificielle révolutionne la recherche. Elle permet d'obtenir des résultats plus rapidement, moyennant moins d'efforts expérimentaux. Mais, dans certains cas, elle ouvre aussi de toutes nouvelles voies vers la connaissance des principes fondamentaux qui gouvernent la nature et la matière. Les scientifiques du PSI exploitent, eux aussi, les avantages qu'offre l'IA, que ce soit en science des matériaux ou dans la recherche atmosphérique, nucléaire et médicale.

2

INFOGRAPHIE
Les tumeurs
en ligne de mire

Page 16

3

TOILE DE FOND
Un changement
fondamental

Page 18

Magazine avec IA

Dans ce numéro, nous avons utilisé l'IA Midjourney pour concevoir les fonds de la couverture, de l'éditorial et de l'ensemble du dossier. Un travail aussi utile que passionnant. Mais nous avons également réalisé à quel point les compétences de nos collaborateurs en design et en photographie restaient indispensables pour composer des scènes cohérentes à partir de ces décors et des scientifiques représentés.

Un raccourci possible

L'apprentissage machine et l'intelligence artificielle font désormais partie des outils de la plupart des scientifiques du PSI. Ces méthodes modifient parfois en profondeur la science.

Texte: Bernd Müller

Est-il possible de calculer l'avenir du monde et de tous les atomes de l'univers? Une intelligence qui connaîtrait toutes les forces en serait capable, estimait le mathématicien français Pierre Simon Laplace (1749–1827): «Rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir, comme le passé, serait présent à ses yeux.». Aujourd'hui, nous savons qu'il se trompait: l'univers ne pourra jamais être complètement calculé ni prédit. La théorie de la relativité et la physique quantique, notamment, l'ont démontré de façon saisissante.

Vraiment? Peut-être que le fameux démon de Laplace connaît une forme de raccourci qui lui permet de conclure d'une cause à un effet, sans devoir effectuer tous les calculs physiques intermédiaires. Ce raccourci existe bel et bien: il s'appelle «apprentissage automatique» et «apprentissage profond par réseaux de neurones». Ces deux champs relèvent de l'intelligence artificielle (IA).

L'apprentissage machine fait désormais partie intégrante de la physique, de la chimie et de la biologie ainsi que de nombreuses autres disciplines scientifiques. Le plus souvent, il s'agit d'identifier des rapports de cause à effet, sans les calculs normalement nécessaires pour résoudre toutes les équations physiques au sens de Laplace. Au PSI, on utilise l'apprentissage machine, les réseaux neuronaux et les méthodes de l'IA dans le cadre de nombreux projets. Voici quatre exemples montrant comment ces méthodes changent la recherche au PSI, voire la révolutionnent, pourrait-on dire.

Science des matériaux: la fin des tâtonnements par essais et erreurs

Que se passe-t-il dans une batterie lithium-ion? Lorsqu'elle est chargée, les ions lithium migrent vers la cathode; lorsqu'elle se décharge, les ions remigrent depuis la cathode. On sait que, ce faisant, le nombre d'électrons dans le matériau de la cathode varie constamment. «Mais que se passe-t-il précisément et quelles sont les forces en jeu? Les calculs informatiques avaient jusqu'à présent énormément de difficulté à le saisir correctement», explique Nicola Marzari, responsable du Laboratoire de simulations des matériaux au PSI et professeur à l'EPFL de Lausanne. Or, ce point était décisif pour construire, par exemple, de meilleurs accumulateurs pour les voitures électriques.

Les physiciens comme Nicola Marzari calculent ces processus avec l'équation de Schrödinger, la plus fondamentale de la physique quantique, mais qui est malheureusement très complexe. Pour déterminer la dynamique de seulement quelques ions lithium, il faudrait la puissance de calcul de tous les ordinateurs du monde. Heureusement, en 1965, Walter Kohn, chimiste, a réussi à simplifier l'application numérique de l'équation de Schrödinger.

Celle-ci dépasse pourtant les capacités de calcul actuelles, même sous cette forme. S'il existait un raccourci, il serait très utile. Un raccourci qui contourne le calcul complexe et qui permette de conclure directement au résultat sur la base des conditions de départ. Sans avoir à considérer chaque ion lithium pris isolément. Cela se prête à l'apprentissage automatique, que les scientifiques utilisent avec succès depuis quelques années. «Notre modèle est une boîte noire, relève Nicola Marzari. Il fournit directement la dynamique des ions lithium sans la complexité des calculs quantiques complets.»

Auparavant, le modèle doit être entraîné. Pour ce faire, Nicola Marzari calcule toute une série de configurations atomiques différentes au moyen de la théorie de Walter Kohn, en faisant varier la température, les déplacements et la diffusion de tous les atomes d'un matériau. Il produit ainsi des «instantanés» physiques, avec lesquels il alimente son modèle. Après cet entraînement, ce dernier est capable de créer de nouveaux instantanés, sans recourir à des formules complexes ni à une puissance de calcul massive. L'équipe du PSI se sert de cette méthode pour développer des électrolytes solides pour des batteries qui ne s'enflamment pas aussi facilement que celles actuelles à électrolytes liquides inflammables. Pour le stockage énergétique à large échelle, il serait par ailleurs intéressant de remplacer le lithium par d'autres matériaux moins rares de la croûte terrestre, comme le sodium, le magnésium ou le potassium.

De meilleurs matériaux pour les batteries: ce n'est qu'un exemple de la révolution en cours, menée grâce aux simulations quantiques et à l'apprentissage automatique en science des matériaux. Au Laboratoire de simulations des matériaux – rattaché à la division de recherche Calcul scientifique, théorie et données fondée en 2021 –, les méthodes de calcul permettant



Nicola Marzari, responsable du Laboratoire de simulations des matériaux et professeur à l'EPFL de Lausanne, cherche de nouveaux composés dotés de propriétés électroniques et magnétiques uniques, comme le jacutingaite, dont voici la formule structurale.

Terttaliisa Lind, ingénieure au Laboratoire de physique des réacteurs et d'hydraulique thermique du PSI, et l'un de ses collaborateurs, Christophe D'Alessandro, ingénieur en énergie, développent des simulations pour maîtriser en toute sécurité les incidents au sein de centrales nucléaires.



de prédire et de caractériser les propriétés des matériaux sont en cours de développement. De surcroît, ce laboratoire du PSI collabore étroitement avec l'EPFL et le Pôle de recherche national MARVEL, également dirigé par Nicola Marzari. MARVEL est l'acronyme de *Materials' Revolution: Computational Design and Discovery of Novel Materials*. C'est l'un des Pôles de recherche nationaux financés par le Fonds national suisse pour la période 2014–2026. «Notre objectif est de comprendre comment les matériaux se comportent et quelles sont leurs propriétés afin d'en découvrir de nouveaux et de plus performants, explique le chercheur. Nous pouvons le faire sans apport expérimental. Nous travaillons uniquement sur la base de simulations quantiques fondamentales. Mais, ensuite, nous allons trouver nos collègues du PSI, qui conduisent des expériences, et nous collaborons à la synthèse et aux tests de ces matériaux.»

Un exemple où le principe des essais et des erreurs a encore fonctionné est le graphène, une couche de carbone d'une épaisseur de seulement une couche atomique avec une multitude d'atomes de carbone disposés en nid d'abeille. Il s'agit d'une forme de plaque bidimensionnelle qui confère au graphène ses nombreuses propriétés particulières. Durant des décennies, les scientifiques ont nettoyé le graphite, qu'ils utilisaient en laboratoire comme matériau de test, en y fixant une bande adhésive qu'ils décollaient ensuite. Lorsqu'en 2004 deux physiciens ont examiné pour la première fois les salissures résiduelles du scotch, ils ont mis au jour des couches ultraminces de carbone. Le graphène, qui a des propriétés fascinantes, a valu un prix Nobel, en 2010, à ses découvreurs.

Avec MARVEL, on aurait peut-être trouvé le graphène plus tôt. En se servant de leurs ordinateurs, les scientifiques du PSI et de l'EPFL ont examiné en détail les propriétés de matériaux cristallins inorganiques, comme le silicium, l'arséniure de gallium ou encore les pérovskites. Sur 80 000 composés inorganiques, ils ont identifié – à l'aide d'algorithmes de mécanique quantique, de simulations et d'apprentissage automatique – plus de 2 000 matériaux aptes à se détacher en couches bidimensionnelles. Ceux-ci pourraient être fabriqués à partir du matériau de base tridimensionnel, aussi facilement que le graphène à partir du graphite.

Ce travail a abouti à un premier succès, le jacutingaite, découvert au Brésil en 2008. Ce minéral, com-

posé de platine, de mercure et de sélénium, présente pratiquement la même structure que le graphène, mais il est beaucoup plus lourd. Avec ses méthodes de simulation, Nicola Marzari avait prédit les propriétés électriques et magnétiques uniques du jacutingaite. Il s'agit du premier et seul matériau connu qui réalise la physique d'un isolant avec effet Hall de spin quantique, comme l'avaient imaginé, en 2005, Charles Kane et Eugene Mele, deux physiciens de l'Université de Pennsylvanie. Des expérimentateurs de l'Université de Genève, inspirés par cette découverte, ont réussi à fabriquer du jacutingaite de manière artificielle et l'ont étudié à l'aide du rayonnement synchrotron. Résultat: l'expérimentation a confirmé l'exactitude des pronostics.

Centrales nucléaires: maîtriser les incidents en toute sécurité

C'est une chose que l'on souhaite ne voir se produire dans aucune centrale nucléaire: le courant est coupé, la pompe de refroidissement s'arrête et le réacteur nucléaire atteint une température critique. Il faut injecter rapidement de l'eau de refroidissement. Mais pas trop: en 2011, lors de l'accident de Fukushima, au Japon, l'injection d'eau en excès avait eu des conséquences néfastes. Tels sont les scénarios au moyen desquels le personnel de centrale nucléaire s'entraîne régulièrement pour faire face aux incidents possibles et les maîtriser en toute sécurité. Cependant, les simulations ne se déroulent pas à la bonne vitesse et ne représentent pas avec une précision suffisante les processus physiques et chimiques au sein du réacteur. De plus, elles ne reproduisent que les perturbations mineures fréquentes.

Il en va tout autrement des images que Terttaliisa Lind, ingénieure au Laboratoire de physique des réacteurs et d'hydraulique thermique du PSI, observe sur un écran. «Ce n'est pas une vidéo, explique-t-elle. Il s'agit d'une simulation avec de la vraie physique, calculée à chaque instant.» Si une personne test intervient durant le déroulement, par exemple en ouvrant une valve, la simulation s'adapte immédiatement. Mais comment est-ce possible? Les processus thermodynamiques et chimiques dans un réacteur sont d'une telle complexité que même l'ordinateur le plus performant serait incapable de les calculer en temps réel. Il aurait besoin de dix minutes pour traiter ce qui ne dure qu'une minute dans la réalité. Ainsi, les incidents graves, notamment, ne peuvent pas être simulés de manière réaliste. D'autre part, dans de telles circonstances, certains processus sont très lents et peuvent durer des heures. Les sujets se tourneraient les pouces la plupart du temps.

Les exploitants de centrales nucléaires ont besoin de simulations qui se déroulent en temps réel et que l'on puisse accélérer, sans que la précision en souffre. C'est justement ce sur quoi travaille Terttaliisa Lind dans le cadre d'un projet pour Euratom, un organisme

«Nous créons des simulations avec de la vraie physique, calculée à chaque instant.»

Terttaliisa Lind, ingénieure au Laboratoire de physique des réacteurs et d'hydraulique thermique

public de coordination et de surveillance de l'usage civil de l'énergie et de la recherche nucléaire en Europe. Son équipe est l'un des quatorze partenaires issus de dix pays européens. Le projet a démarré en novembre 2022 et durera quatre ans. Son objectif est de créer un simulateur d'incidents atypiques et graves, qui en reproduise de manière réaliste le déroulement, conformément aux lois de la physique. «Il n'existe rien de tel, actuellement», souligne Christophe D'Alessandro, ingénieur en énergie et expert en ASTEC au PSI.

ASTEC est un code système développé en France pour simuler des incidents graves dans les centrales nucléaires. Il calcule les variables thermohydrauliques comme la pression et la température dans la cuve du réacteur, les circuits de refroidissement et l'enceinte de confinement, mais il est très lent. Dans le cadre du projet d'Euratom, Christophe D'Alessandro développe le simulateur et utilise, pour ce faire, une astuce: le modèle saute la multitude de formules physiques que l'ordinateur met tant de temps à appliquer et, partant du début, conclut directement à la fin d'une étape temporelle, lorsqu'un sujet ouvre par exemple une vanne. Comment cela se fait-il? Par l'apprentissage automatique. Le modèle est alimenté par de nombreuses simulations ASTEC. À un moment donné, il est en mesure de relier cause et effet et de prédire correctement le résultat pour de nouvelles situations, comme s'il avait calculé toutes les formules.

Recherche sur le cancer: dépister les tumeurs

S'il est identifié de manière précoce, le cancer est souvent curable. G.V. Shivashankar, responsable du Laboratoire de biologie à l'échelle nanométrique du PSI et professeur de mécanogénomique à l'ETH Zurich, a franchi une étape importante dans cette voie. Son équipe a réussi à prouver que certaines modifications dans l'organisation du noyau de cellules sanguines spécifiques fournissaient un indice sûr de la présence d'une tumeur dans le corps. Grâce à l'apprentissage automatique, les scientifiques sont en mesure de distinguer les sujets sains des sujets malades avec une précision d'environ 85%. Par ailleurs, ils ont réussi à déterminer correctement le type de cancer dont souffraient les patients: mélanome, gliome ou cancer de la tête et du cou. «C'est la première fois au monde que l'on y parvient avec un biomarqueur fondé sur l'IA pour l'imagerie de la chromatine», se réjouit G.V. Shivashankar (voir infographie, page 16).

Les tumeurs se trahissent par la chromatine des cellules sanguines. C'est ainsi que l'on appelle l'espace de pelote au sein de laquelle l'ADN est emballé. Les scientifiques ont saisi des images au microscope à fluorescence. Ils les ont analysées à l'aide de l'IA et ont entraîné cette dernière à les utiliser. Cela promet des approches potentielles pour le diagnostic précoce du cancer ou l'évaluation des résultats thérapeutiques.

Chimie de l'atmosphère: calculer mille fois plus vite

On ne les voit pas, mais ils sont partout: les aérosols sont de minuscules particules en suspension dans l'air, issues de poussières, du sel, de pollens, de gaz d'échappement, de l'abrasion des pneus et de quantité d'autres sources... Alors qu'en zone rurale les habitants inhalent seulement quelques centaines de particules par centimètre cube d'air, ce nombre peut grimper à plusieurs dizaines de milliers dans les agglomérations, avec les risques sanitaires qui s'ensuivent. Les scientifiques en chimie de l'atmosphère déterminent les quantités et les types d'aérosols présents autour du globe, en se servant d'expériences de diffusion de la lumière à bord de satellites et d'avions ou bien dans des stations de mesure au sol. Leur objectif: comprendre la formation et les effets des aérosols.

Ce faisant, ils se heurtent à un problème: les données de mesure varient suivant les propriétés des aérosols. Mais, inversement, comment les déduire de telles données? Robin Modini – avec une équipe de physique des aérosols et d'optique du Laboratoire de chimie de l'atmosphère du PSI – a fait des découvertes révolutionnaires à ce sujet, en entraînant des réseaux de neurones artificiels dans un ordinateur (ceux-ci sont fréquemment utilisés pour reconnaître des modèles). À cette fin, les scientifiques commencent par simuler les modèles de diffusion de la lumière produits par les aérosols à l'aide d'équations physiques. Puis ils entraînent le réseau neuronal avec ces modèles virtuels, lequel génère alors les propriétés des aérosols pour des données de mesure spécifiques. Enfin, on applique une astuce presque magique: la polarité du réseau neuronal peut être inversée afin de déterminer les modèles de diffusion de la lumière pour certaines propriétés spécifiques des aérosols.

Les mesures de contrôle en laboratoire montrent à quel point cela fonctionne déjà bien. Des échantillons d'air sont envoyés dans un néphélomètre polaire, qui quantifie la lumière laser diffusée par les aérosols. Ces mesures correspondent à la théorie et aux prédictions du réseau neuronal. Les scientifiques disposent ainsi d'un instrument puissant qui leur permet de mieux interpréter les données issues des mesures de diffusion de la lumière effectuées par les satellites ou les avions. Mais ce n'est pas tout: comme les équations physiques sont laissées de côté après l'entraînement du réseau neuronal, la méthode est extrêmement rapide. «Avec l'apprentissage automatique, nous calculons les propriétés des aérosols mille fois plus vite qu'auparavant», relève Robin Modini. Les scientifiques du PSI souhaitent combiner ces développements d'algorithmes avec leur surveillance à long terme des aérosols, opérée en continu depuis 1995 au Jungfraujoch. ♦

Robin Modini, du Laboratoire de chimie de l'atmosphère, cherche à améliorer la mesure des aérosols à l'aide de l'IA. Ses méthodes devraient un jour être utilisées à la station de recherche du Jungfraujoch, située à plus de 3 000 mètres d'altitude.

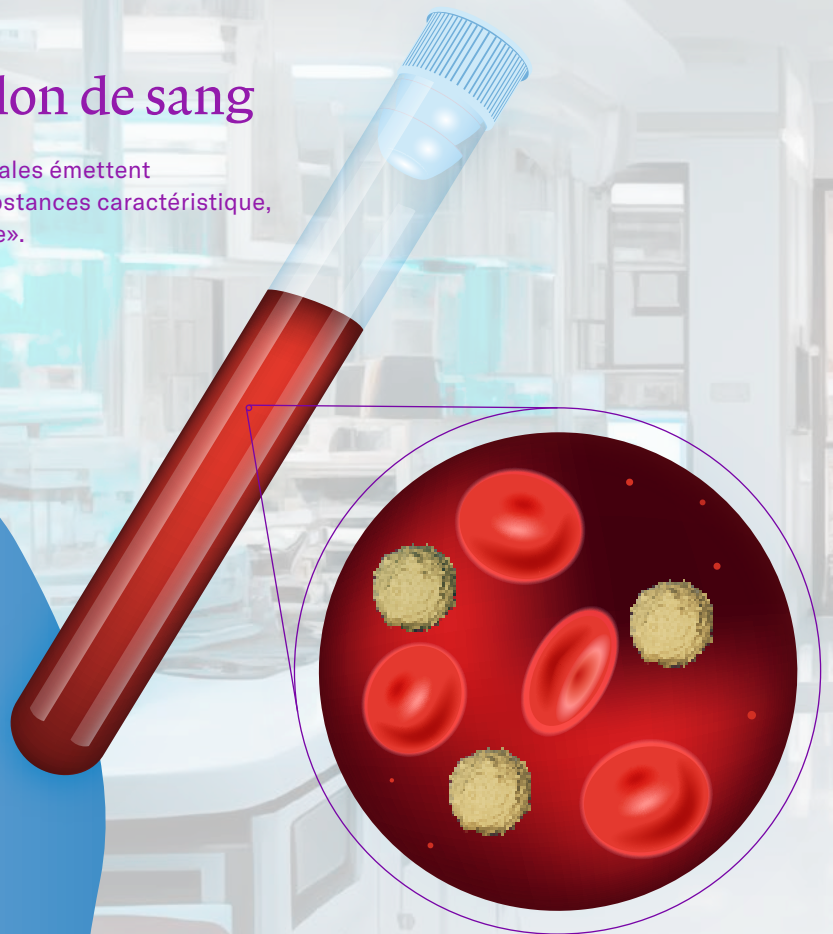


Les tumeurs en ligne de mire

Les scientifiques du PSI travaillent à améliorer le diagnostic et le traitement des tumeurs. L'intelligence artificielle peut les aider dans cette tâche. Elle permet par exemple de déterminer de manière précise et rapide les changements au sein des cellules sanguines, visibles par l'imagerie.

Echantillon de sang

Les cellules tumorales émettent un mélange de substances caractéristique, appelé «sécrétome».



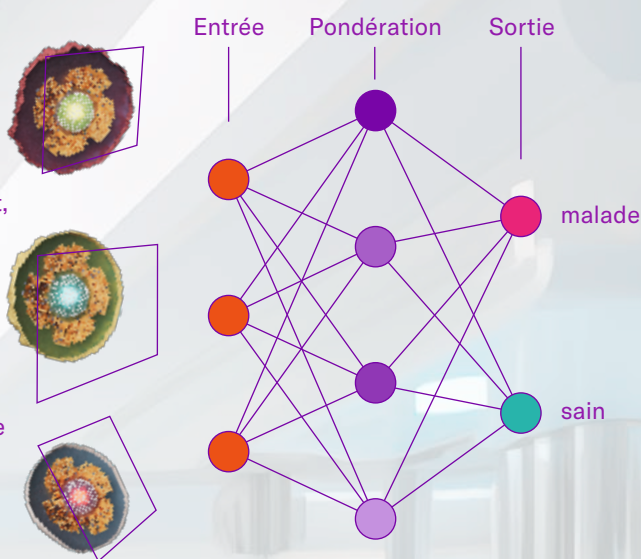
Cellules sanguines

Le sécrétome des tumeurs diffère selon leur type. Certaines cellules du sang (illustrées ici en jaune), appelées «cellules mononucléaires», réagissent de manière spécifique au sécrétome et modifient après leur apparence.

Entraîner l'algorithme

L'ordinateur reçoit des images de cellules à l'entrée. Pendant la phase d'entraînement, il apprend à pondérer leurs différentes caractéristiques et anomalies, selon leur pertinence. Cela lui permet d'estimer si une cellule indique ou non la présence d'une tumeur. A terme, l'IA doit être en mesure de reconnaître avec précision des cellules anormales, dont elle n'a pas encore reçu d'image exacte comme modèle.

Informations supplémentaires:
<https://psi.ch/fr/node/60742>



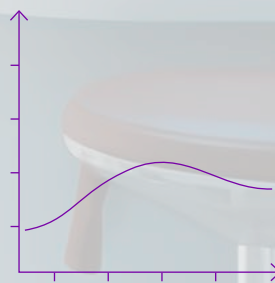
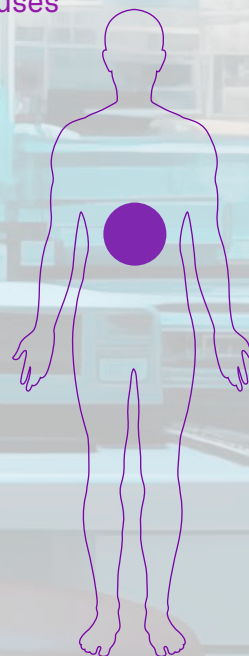
De meilleurs diagnostics

À long terme, l'objectif de tous ces efforts serait de rendre possibles des diagnostics plus rapides, plus simples et meilleurs.



Identification d'éventuelles maladies cancéreuses

Identification de différentes tumeurs



Suivi de l'efficacité du traitement

Dépistage

L'IA permet d'identifier, chaque fois, les cellules qui se sont anormalement modifiées. Les algorithmes apprennent de manière autonome à enregistrer ces anomalies et à les différencier.

Un changement fondamental

Les grandes installations de recherche du PSI fournissent énormément de données, que ce soit le laser à rayons X à électrons libres suisse SwissFEL ou la Source de Lumière Suisse SLS, surtout après la mise à niveau SLS 2.0. L'intelligence artificielle facilite leur exploitation efficace et aide à épuiser tout le potentiel de ces installations pour la recherche.

Texte: Bernd Müller

Les protéines sont les bêtes de somme du vivant. Ces minuscules machines moléculaires sont présentes dans toutes les cellules et impliquées dans la quasi-totalité des processus biologiques, du métabolisme à la communication cellulaire. Leur diversité est immense: à lui seul, le corps humain renferme des centaines de milliers de protéines différentes, dont chacune assume une fonction propre. Ce sont aussi des cibles importantes pour les médicaments: comprendre leur structure et leur fonction représente une tâche essentielle en biologie. En développant des médicaments, le défi est de trouver une substance active qui interagisse, si possible, avec un seul type de protéine – et non avec tous les autres.

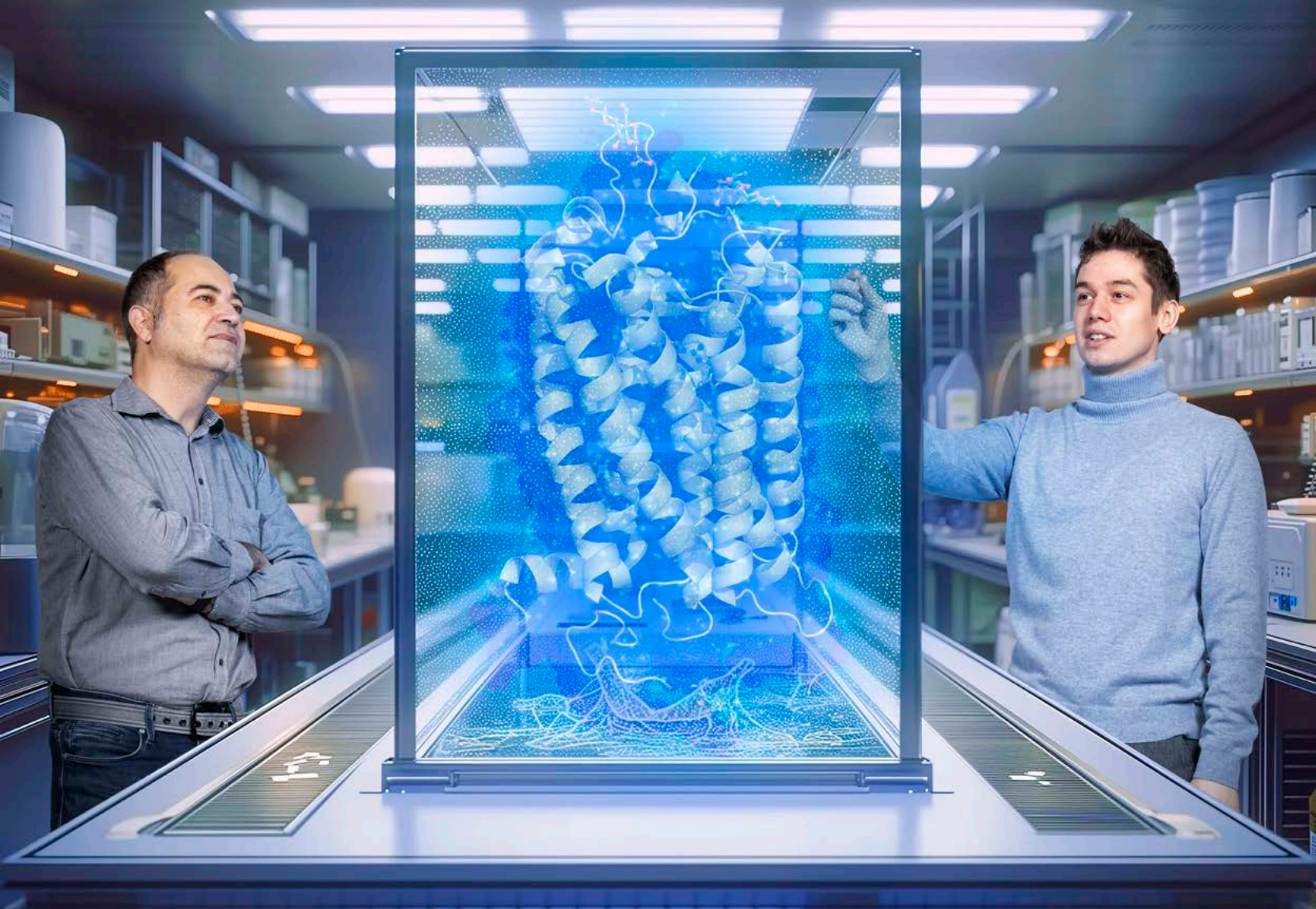
Pour réussir un tel tour de force, il faut d'abord comprendre le langage des protéines. Ce dernier est une espèce d'alphabet de vingt composants comparables à des lettres: les acides aminés. Chaque protéine contient une chaîne ordonnée d'acides aminés, qui détermine à son tour une grande partie de ses propriétés. Actuellement, les scientifiques cherchent à savoir quelle séquence protéique mène à quelle propriété. C'est là qu'interviennent les grands modèles linguistiques («*large language models*») à la GPT4. Le chatbot d'IA ChatGPT, qui fait sensation depuis 2022, est fondé sur GPT4. Tous deux ont été développés par la société Open-AI. ChatGPT puise dans un vaste ensemble de données – issues de textes rédigés par des humains – pour apprendre les modèles et les structures du langage. Lorsque l'utilisateur saisit une question ou une tâche, le modèle produit une réponse fondée sur sa compréhension du contexte et sur les modèles appris pendant l'entraînement. Il est ainsi capable d'écrire des poèmes, des romans et même du code de programmation.

Flurin Hidber, un doctorant supervisé par Xavier Deupi, lui-même expert en bio-informatique et en structure des protéines au PSI, utilise l'IA dans ses travaux de recherche sur les protéines. Il se sert d'un modèle sophistiqué qui ressemble à ChatGPT. Mais au lieu de produire un langage de type humain,

celui-ci est entraîné à prédire les acides aminés dans des séquences protéiques. Cette capacité unique imite non seulement la puissance des modèles linguistiques d'IA, mais elle fournit également de précieuses informations sur la structure et la fonction des protéines. Les pharmaciens pourraient y recourir en vue d'adapter les médicaments et de raccourcir considérablement le long processus d'essais et d'erreurs en laboratoire, au terme duquel seule une petite part des substances actives candidates présente des propriétés prometteuses.

Un objectif ambitieux

Xavier Deupi et Flurin Hidber poursuivent donc un objectif ambitieux: déterminer la séquence d'acides aminés précise qui conduit à la propriété protéique désirée. Les protéines photosensibles sont l'un des points principaux de leur recherche. Ce domaine de spécialité du groupe de Xavier Deupi fait aussi l'objet d'études au SwissFEL. Les protéines photosensibles se trouvent chez de nombreux organismes, des microbes à l'être humain, et recèlent un potentiel médical. Flurin Hidber se sert de l'IA pour prédire leurs propriétés sur la seule base de la séquence de leurs éléments constitutifs, ce qui représente une avancée significative. En déterminant notamment leurs propriétés d'absorption de la lumière, ses travaux pourraient ouvrir la voie au développement de molécules dotées de caractéristiques sur mesure. Une étape qui pourrait avoir de profonds effets sur l'optogénétique, technique scientifique utilisant la lumière pour contrôler et surveiller l'activité de certaines cellules dans des organismes vivants, comme les cellules nerveuses du cerveau. Les scientifiques introduisent des gènes qui y codent les protéines photosensibles afin d'influencer finement leur comportement en les exposant à la lumière. Cette technologie pourrait contribuer à la compréhension et au traitement des maladies neurologiques en fournissant un outil qui permettrait d'examiner et de contrôler l'activité de certaines cellules cérébrales avec une précision



Xavier Deupi (à gauche) et Flurin Hidber, du groupe de recherche de physique théorique de la matière condensée, s'efforcent de mieux comprendre le lien entre fonction et structure des protéines. Ils se concentrent surtout sur les protéines photosensibles.

sans précédent. Pour l'avenir, Xavier Deupi et Flurin Hidber ont comme objectif d'inverser ce processus et de concevoir de nouvelles protéines dotées de propriétés adaptées à des besoins spécifiques: par exemple, répondre à une lumière d'une certaine couleur. Ce plan pourrait ensuite être vérifié expérimentalement en laboratoire et, ils l'espèrent, confirmé.

La dynamique des protéines est également au cœur des recherches de Cecilia Casadei. Cette physicienne a développé un nouvel algorithme pour exploiter avec plus d'efficacité les mesures effectuées au laser à rayons X à électrons libres SwissFEL. Les constituants du vivant exécutent souvent des mouvements ultrarapides. Le fait de pouvoir les observer précisément se révèle décisif pour mieux les comprendre. A long terme, cela four-

nira de précieuses informations sur les processus pathologiques et facilitera le développement de nouvelles approches médicales.

Exploiter les flashes extrêmement courts de rayons X

Le SwissFEL fournit des flashes de rayons X extrêmement intenses et courts qui permettent de mesurer ces mouvements ultrarapides de protéines. Celles-ci se présentent sous forme de cristaux. Leur structure se révèle dans ce qu'on appelle des diagrammes de diffraction, qui résultent de la disposition régulière des protéines dans le cristal et qui sont enregistrés par un détecteur. Mais les données relatives à un seul cristal ne contiennent que deux pour cent des informations d'un diagramme complet.

«La façon de faire de la science est en train de changer radicalement.»

Xavier Deupi, groupe de recherche de théorie de la matière condensée

Pour contourner ce problème, elles sont normalement divisées en périodes temporelles approximatives et toutes celles d'une période sont moyennées. De nombreuses informations de détail sont alors perdues. «On pourrait dire que les images individuelles du film de protéines sont alors un peu floues, explique Cecilia Casadei. Nous avons donc développé une méthode qui permet d'obtenir davantage d'informations à partir des données de mesure.»

La nouvelle méthode que Cecilia Casadei et son équipe ont mise au point porte le nom de «*low-pass spectral analysis*» (LPSA). Par le biais d'équations mathématiques très complexes, les scientifiques suppriment le bruit indésirable des données, sans perdre pour autant les détails pertinents de la dynamique des protéines. Au lieu des diagrammes de diffraction flous, on peut réaliser ainsi des prises de vue nettes sur des laps de temps très courts, qui suivent le mouvement de la protéine en douceur et sans à-coup. L'effet est du même ordre que le passage d'un ancien téléviseur à tube cathodique à une vidéo en haute résolution.

«Le nouvel algorithme aide les scientifiques, au SwissFEL, à obtenir davantage d'informations à partir de leurs données», relève Cecilia Casadei. A l'inverse, l'algorithme peut contribuer à raccourcir les temps de mesure. Comme le temps de faisceau est toujours limité aux grandes installations de recherche en général, et au SwissFEL en particulier, c'est une perspective très bienvenue pour ceux qui font de la recherche dans le domaine des protéines et qui utilisent cette installation de pointe.

Avec le projet SLS 2.0, les scientifiques vont faire face à un nouveau défi. Après sa mise à niveau, la Source de Lumière Suisse SLS fournira, dès 2025, des quantités de données de mesure plusieurs fois supérieures à celles d'avant, que même des ordinateurs extrêmement puissants ne pourront guère traiter. L'apprentissage automatique jouera donc un rôle central. Pour la SLS 2.0, les scientifiques ont développé des algorithmes qui, à partir des valeurs de luminosité enregistrées par les détecteurs, déterminent rapidement les déphasages des rayons lumineux entrants et livrent ainsi des informations particulièrement précieuses sur l'échantillon. «Le PSI est leader mondial dans ce domaine», souligne Gebhard Schertler, responsable de la division de recherche Biologie et chimie au PSI.

Une autre force de l'apprentissage automatique est de combiner des données issues de différentes méthodes de mesure. Par exemple, on pourrait réaliser des images de noyaux cellulaires au microscope optique, tandis que les techniques radiographiques utilisées à la SLS 2.0 fournissent des images en haute résolution. L'IA pourrait combiner ces différentes données et les informations cliniques biochimiques des patients. Il n'est pas possible d'étudier une même cellule avec différentes méthodes analytiques, mais l'apprentissage automatique permet de synchroniser les ensembles de données des diverses méthodes. L'algorithme reconnaît les propriétés des cellules issues d'expériences distinctes. C'est presque comme si l'on avait étudié la même cellule avec toutes ces méthodes en même temps.

Les grandes installations de recherche restent indispensables

Les grandes installations de recherche, comme le SwissFEL ou la SLS, seront-elles bientôt superflues, lorsque tout pourra être étudié avec l'IA et l'apprentissage automatique? Xavier Deupi s'inscrit en faux contre cette idée: «Les grandes installations de recherche restent indispensables, même à l'ère de l'IA, insiste-t-il. Certes, les grands modèles linguistiques offrent de puissants outils pour l'analyse de données connues, mais ils ne sauraient remplacer la capacité à générer de nouvelles données fondamentales.»

Néanmoins, l'IA fait désormais partie intégrante des dispositifs de recherche: de l'acquisition de connaissances extraites d'un grand nombre de publications scientifiques à la rédaction d'articles fondés sur des données expérimentales, en passant par la génération automatique de lignes de code. «Ces instruments font partie de notre routine quotidienne», confirme Flurin Hidber. Xavier Deupi, de son côté, souligne: «En dépit de ces progrès, des scientifiques expérimentés restent indispensables pour interpréter et discuter les résultats de manière critique.» Il l'admet, cependant: «Les jeunes chercheurs, comme Flurin, travaillent tout autrement que moi-même voici vingt ans. La manière de faire de la science a fondamentalement changé.» ♦





Le mystère de la formation des nuages

Au Laboratoire de chimie de l'atmosphère, Lubna Dada étudie la formation des nuages. Elle a notamment découvert que certains hydrocarbures – appelés «sesquiterpènes» – jouent là un rôle important. Les sesquiterpènes proviennent avant tout de la végétation. Ces substances naturelles sont des composants importants des huiles essentielles, que nous pouvons sentir, par exemple, lorsque nous nous promenons dans la nature. Ils sont très rares et, par comparaison avec d'autres composés de l'atmosphère, ils contribuent de façon disproportionnée à la formation des germes de condensation des nuages. Ces connaissances permettent d'améliorer les modèles et les prévisions climatiques.

De l'espoir pour les enfants cancéreux

Les jeunes patients sont les premiers à bénéficier d'une radiothérapie par protons contre le cancer. Heureusement, le Centre de protonthérapie du PSI a acquis une expérience considérable dans ce domaine, au cours des deux dernières décennies: ses compétences sont demandées par les cliniques d'oncologie pédiatrique de toute la Suisse.

Texte: Brigitte Osterath





Les perles de courage accompagnent les enfants et les adolescents atteints du cancer tout au long de leur traitement. Les perles de verre colorées sont fabriquées par des bénévoles.

Un garçonnet de 6 ans est allongé sur une table d'examen et dort profondément. Un réseau rigide en plastique est ajusté à la forme de sa tête et l'empêche de bouger pendant son sommeil. L'appareil de radiothérapie rotatif, appelé Gantry, est déjà orienté vers son crâne. La technicienne en radiologie du PSI vérifie une dernière fois que l'enfant est correctement étendu, avant de quitter l'espace. Depuis la salle de contrôle attenante, elle lance le faisceau de protons.

Un faisceau de protons concentré sort alors de la tête d'irradiation de Gantry et balaie la tumeur dans le cerveau du jeune patient, au millimètre près. Ces particules riches en énergie détruisent le matériel génétique des cellules cancéreuses, si bien qu'elles meurent. Le principe est le même que pour la radiothérapie classique à l'hôpital, qui utilise des rayons X. Mais les protons présentent un avantage décisif par rapport à ces derniers: lors de l'irradiation, ils déposent la majeure partie de leur énergie dans une portion très étroite de l'organisme, c'est-à-dire dans la tumeur proprement dite – et ils y restent. Ainsi, les tissus sains situés devant et derrière la tumeur sont épargnés. Autrement dit, ils seront moins endommagés que lors d'une radiothérapie classique.

Les enfants atteints du cancer profitent tout particulièrement de la protonthérapie, explique Damien Weber, médecin-chef et directeur du Centre de protonthérapie (CPT) au PSI. «Les enfants sont en pleine croissance et lorsque des cellules saines situées près de la tumeur sont endommagées durant la radiothérapie, elles sont susceptibles de transmettre ces dommages à toujours plus de cellules à chaque division cellulaire ultérieure.» Par ailleurs, dans un corps de petite taille, la probabilité qu'une structure critique – comme la colonne vertébrale ou le cerveau – se trouve à proximité de la tumeur est beaucoup plus importante que dans l'organisme bien plus grand d'un adulte.

Pour les enfants, le risque que le traitement d'un cancer par radiothérapie occasionne des dommages à long terme (dont ils auront à souffrir durant le reste de leur vie) est donc plus important: cela va des tumeurs induites par la radiothérapie aux difficultés d'apprentissage, en passant par les pertes d'audition et les troubles de la croissance. «Lorsqu'un enfant en Suisse a besoin d'une radiothérapie ciblée contre le cancer, la protonthérapie ultraprécise est presque toujours une méthode de radiothérapie de choix», relève Damien Weber.

Une histoire à succès

C'est depuis 1999 que le Centre de protonthérapie traite des enfants et des adolescents atteints de cancer. En 2004, un bambin a été soigné sous narcose par protonthérapie: il venait d'avoir 2 ans et souffrait d'une tumeur des tissus mous au niveau de l'orbite.

Contrairement aux adultes, les très jeunes patients ont besoin d'une anesthésie. «Une radiothérapie aussi précise que la protonthérapie n'a aucun sens si la personne bouge pendant le traitement, explique Damien Weber. Or, pour les petits enfants, il est extrêmement difficile de demeurer immobile pendant toute la durée de l'irradiation.» Une narcose légère permet que les enfants dorment et restent tranquilles pendant que le faisceau de protons antitumoral fait son travail. Dans l'ensemble, près de la moitié des enfants et des adolescents de moins de 18 ans sont irradiés sous anesthésie.

Depuis 2004, le Centre de protonthérapie du PSI et le service d'anesthésie de l'Hôpital pédiatrique universitaire de Zurich coopèrent étroitement. Cette collaboration permet qu'un médecin-chef et un infirmier anesthésiste de l'hôpital pédiatrique soient présents à l'institut: ils commencent la narcose, surveillent l'état des petits patients, changent les pansements et assurent de manière générale les meilleurs soins possible.

«Avec les enfants, nous prenons tout notre temps, souligne Ilka Schmidt-Deubig, médecin-chef anesthésiste à l'Hôpital pédiatrique de Zurich. Le but est d'éviter de les confronter chez nous à une atmosphère hospitalière.» C'est pourquoi l'équipe fait toujours venir les parents et leur enfant au moins une demi-heure avant la radiothérapie. Ils peuvent ainsi arriver tranquillement dans la salle de jeux spécialement aménagée à cet effet. «Au bout d'une ou deux semaines, même les enfants traumatisés finissent par nous faire confiance», affirme la spécialiste.

Au début du traitement du cancer, les enfants reçoivent un cordon avec leur prénom composé de lettres en perles multicolores. «Au fil des soins, de nouvelles perles viennent s'y ajouter, explique Ilka Schmidt-Deubig. Ce sont les perles du courage.» Par exemple, lorsque le cathéter à chambre implantable est posé pour que l'anesthésiste administre des médicaments. Une perle thérapeutique avant l'irradiation. Une perle de jeûne, parce que l'enfant ne doit ni boire ni manger avant la narcose – ce qui n'est pas toujours facile lorsqu'on a faim ou soif.

Entre 60 et 70 enfants et adolescents sont traités chaque année au PSI, soit, à ce jour, plus de 800 jeunes patients au total. La plupart souffrent de tumeurs du cerveau et de la moelle épinière. Viennent ensuite les sarcomes, c'est-à-dire des cancers issus des tissus conjonctifs, des tissus de soutien ou des tissus musculaires.

Un centre de compétence pour toute la Suisse

«Le traitement du cancer chez les enfants qui ont besoin d'une narcose pendant la radiothérapie nécessite davantage de planification, explique Katrin Scheinemann, responsable des services d'hématologie



Elle apprécie la collaboration avec le PSI et le directeur du Centre de protonthérapie, Damien Weber (à droite): Katrin Scheinemann, oncologue à l'hôpital pédiatrique de Suisse orientale de Saint-Gall et présidente du Groupe d'oncologie pédiatrique suisse (SPOG).

et d'oncologie pédiatriques à l'Hôpital pédiatrique de Suisse orientale de Saint-Gall. Nous sommes donc ravis d'avoir, en Suisse, un centre de radiothérapie aussi expérimenté que celui du PSI. Par comparaison avec d'autres pays, nous disposons de l'un des centres de protonthérapie les plus anciens, spécialisé dans l'irradiation des enfants.»

Katrin Scheinemann préside le Groupe d'oncologie pédiatrique suisse (SPOG), un réseau de neuf centres suisses possédant un service d'oncologie pédiatrique. Avec l'Hôpital pédiatrique de Suisse orientale de Saint-Gall, ce réseau comprend les hôpitaux universitaires de Berne, Bâle, Zurich, Lausanne et Genève, de même que les hôpitaux pédiatriques de Lucerne, Aarau et Bellinzone. En tant qu'organisation à but non lucratif, le SPOG coordonne et est responsable des études cliniques et des programmes de recherche sur le cancer chez les enfants et les adolescents de Suisse.

Une chose est sûre: les enfants et les adolescents sont toujours traités selon les directives de protocoles internationaux. «De fait, peu importe dans lequel des neuf centres les parents se rendent avec leur enfant: ils reçoivent partout le même traitement et donc la meilleure qualité de soins.»

Le PSI traite environ 70% des enfants en Suisse qui ont besoin d'une radiothérapie ciblée. Le CPT est ainsi devenu le plus grand centre de radiothérapie pédiatrique.

Des perspectives prometteuses

Pour le garçonnet de 6 ans, la séance de radiothérapie est à présent terminée. Tout s'est bien passé. Le faisceau de protons riches en énergie a balayé la

tumeur dans son cerveau pendant vingt minutes environ. La technicienne en radiologie lui retire le masque facial et l'emmène, toujours endormi, dans la salle de réveil, où ses parents l'attendent. Il pourra s'y reposer en toute tranquillité et s'y ranimer complètement.

La séance de radiothérapie suivante est prévue le lendemain. Au total, six semaines de traitement, du lundi au vendredi. Une période qui n'est facile à vivre ni pour les enfants ni pour leurs parents. Mais il y a de l'espoir: les chances de guérison d'un cancer pédiatrique ont considérablement augmenté durant ces dernières décennies. Selon le registre suisse du cancer de l'enfant, le taux de survie à dix ans en Suisse, chez les enfants atteints d'un cancer diagnostiqué entre 1989 et 1998, était de 76%. Vingt ans plus tard, pour la période comprise entre 2009 et 2018, ce taux était passé à 85%. On peut s'attendre à ce que ces chiffres s'améliorent encore dans la prochaine décennie. Et les traitements au CPT du PSI y contribueront certainement. ◆

Des études pionnières

Hormis les études pédiatriques, le PSI est également impliqué dans des études cliniques sur le traitement du cancer chez l'adulte. Actuellement, on recrute des participants pour l'étude clinique européenne PROTECT, à laquelle contribuent le PSI et la Clinique de radio-oncologie de l'Hôpital universitaire de Zurich. PROTECT compare les effets indésirables de la radiothérapie conventionnelle avec ceux de la protonthérapie dans le traitement du cancer de l'œsophage. Si cette étude clinique démontrait que la protonthérapie apporte également un avantage dans le cas de ce cancer, les patients pourraient recevoir un traitement de routine au PSI. Le cancer de l'œsophage se retrouverait alors durablement sur la liste d'indications de l'Office fédéral de la santé et les caisses d'assurance maladie prendraient en charge les coûts de la protonthérapie.

Actualité de la recherche au PSI



1 Etude sur le trafic aérien climatiquement neutre

Des scientifiques du PSI et de l'ETH Zurich ont déterminé par calcul comment le trafic aérien pourrait devenir climatiquement neutre d'ici 2050. Résultat: remplacer le kérosène fossile par du carburant synthétique et durable ne suffirait pas. Une réduction du trafic aérien serait également nécessaire. Pour rendre l'ensemble des opérations aériennes climatiquement neutres, il faudrait en effet qu'en plus des vols, la production de carburant et l'ensemble des infrastructures de transport aérien ne nuisent pas davantage au climat. Or, selon les résultats de l'étude, cet objectif ne saurait être atteint d'ici 2050, avec les mesures environnementales prises à ce jour pour protéger le climat dans le secteur de l'aviation. Les nouveaux moteurs, les carburants respectueux du climat et la filtration du CO₂ de l'atmosphère pour le stocker en sous-sol (captage et stockage du carbone ou «*carbon capture and storage*» [CCS]) ne suffiront pas pour parvenir au but. Il faudra également réduire le trafic aérien. L'augmentation du prix des billets pourrait y contribuer. D'après l'étude, pour compenser complètement l'impact réel sur le climat, un billet devrait coûter environ trois fois plus cher qu'aujourd'hui.

Informations supplémentaires:
<https://psi.ch/fr/node/58104>

Environ **3,5** %: c'est la part du trafic aérien dans le réchauffement climatique global.

Environ **20** %: c'est la part des émissions de CO₂ pures dans l'effet sur le climat.

Environ **0,8** %: telle est la réduction annuelle du trafic aérien nécessaire d'ici 2050.

2 Aperçu sur l'impression 3D

La technologie d'impression 3D permet de réaliser des formes extrêmement complexes. Mais l'impression de céramique au moyen d'un laser s'avère difficile. Pour la première fois au monde, les scientifiques du PSI ont enregistré, à l'aide de tomographies, ce qui se passe à l'échelle microscopique lors de ce processus de fabrication. Le matériau, sous forme de poudre fine, est appliqué sur une plaque de construction; le rayon laser se pose sur la poudre, la fait fondre et lui confère la forme souhaitée. Puis vient la couche de poudre fine suivante, que le laser fait fondre à son tour. C'est ainsi, couche après couche, que la pièce se développe. On a déjà étudié ce qui se déroule durant la fusion laser sur lit de poudre à l'aide des rayons X de la Source de Lumière Suisse SLS au PSI et dans d'autres instituts. Mais ces aperçus microscopiques ne fournissaient que des images bidimensionnelles. Les expériences menées à la ligne de faisceau de tomographie TOMCAT de la SLS livrent de nouveaux aperçus en trois dimensions sur ce processus de fabrication d'avenir. Ces connaissances contribueront à améliorer cette méthode prometteuse.

Informations supplémentaires:
<https://psi.ch/fr/node/59299>

3 De meilleures batteries pour les voitures électriques

Les scientifiques du PSI utilisent des neutrons pour visualiser les modifications qui se produisent dans l'électrolyte, c'est-à-dire dans le liquide conducteur d'électricité des batteries. En menant des expériences à la Source suisse de neutrons de spallation SINQ, ils ont pu suivre les modifications physico-chimiques induites à différentes températures (entre moins 20 et 50 degrés Celsius). Il s'est avéré qu'à basse température le liquide se durcissait. Ce fait est connu depuis longtemps, raison pour laquelle, en hiver, il faut chauffer les batteries des voitures électriques avant la charge. L'expérience du PSI permet désormais de savoir précisément où et comment le processus se déroule dans la batterie. Les images spectroscopiques montrent même comment deux composants organiques se séparent à basse température et comment une fraction s'écoule vers le bas. Les mesures fournissent également, pour la première fois, des informations spatiales sur les électrolytes et sur les températures auxquelles cette transition de phase se produit. Cette analyse permet de mieux comprendre certaines modifications physico-chimiques et de développer des batteries dotées de meilleures propriétés.

Informations supplémentaires:
<https://psi.ch/fr/node/60002>

4 Reprogrammation mécanique des tissus

Les scientifiques du PSI et de l'ETH Zurich ont transplanté dans une peau lésée des cellules de tissus conjonctifs, reprogrammées mécaniquement en cellules semblables à des cellules souches. Dans le cadre d'un essai en laboratoire, ils ont pu montrer que cette méthode permettait de favoriser la cicatrisation des plaies. Les scientifiques n'ont recouru ni au génie génétique ni à la chimie. Ils ont obtenu cette reprogrammation des cellules au moyen d'une stimulation purement mécanique. Au-delà des tissus cutanés, la régénération de cellules musculaires et cérébrales serait également envisageable. Cette découverte s'inscrit dans la tendance générale de la médecine personnalisée, où les substances sont adaptées individuellement aux patients. Dans le cas présent, il s'agit même de cellules corporelles sans ajout de substance étrangère.

Informations supplémentaires:
<https://psi.ch/fr/node/60488>

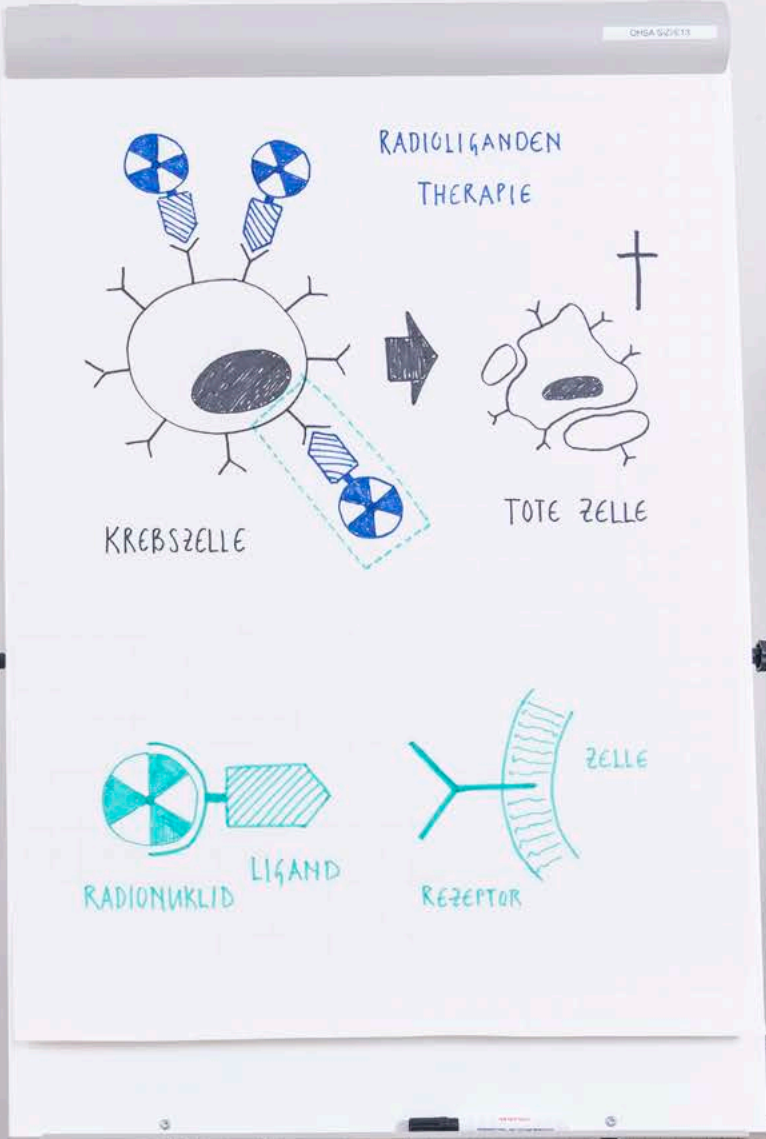
Des idées qui font mouche

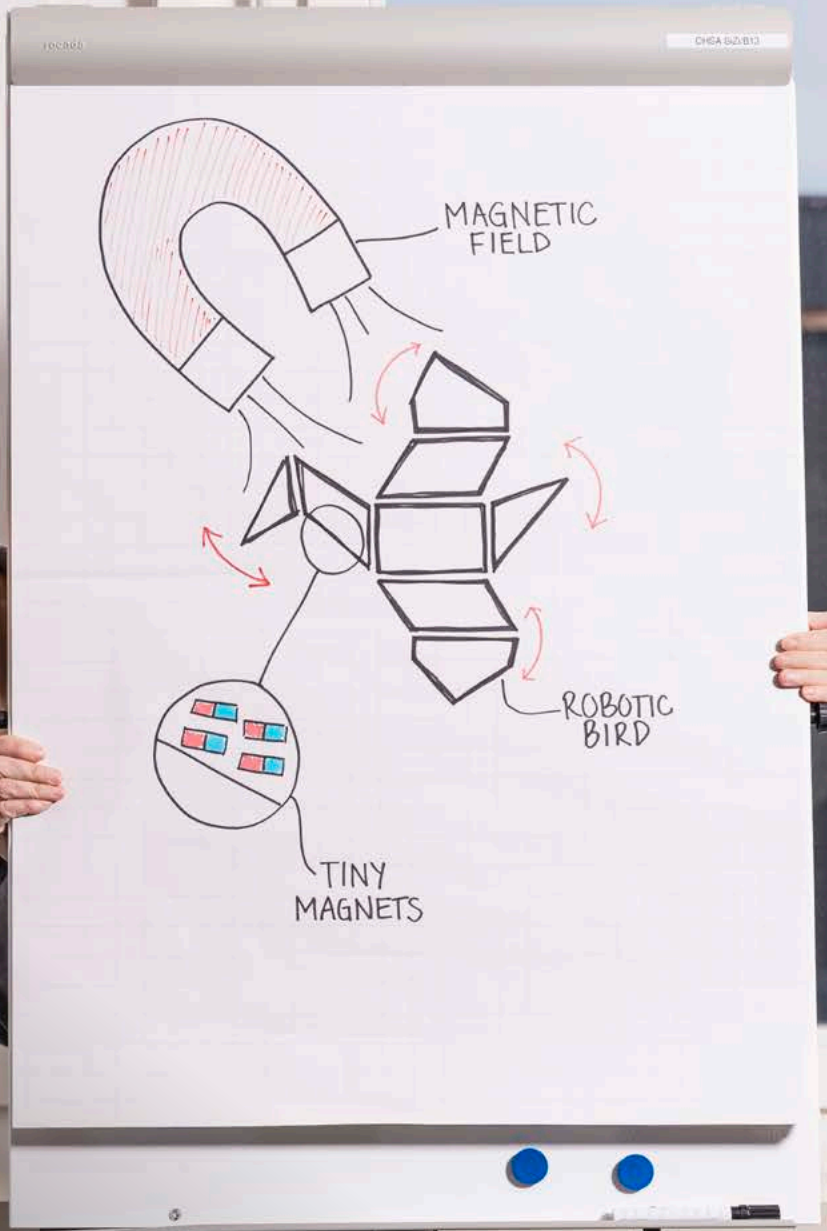
La recherche menée au PSI est extrêmement complexe et, par bien des aspects, souvent difficile à expliquer. Nous avons confié aux scientifiques une tâche délicate: esquisser l'idée de base de leur recherche au moyen d'un simple dessin. Il en ressort des résultats qui mettent dans le mille et qui laissent pressentir, mieux que les mots, ce dont il s'agit.

Texte: Christian Heid

Médicaments radiopharmaceutiques

Cristina Müller est chercheuse au Centre des sciences radiopharmaceutiques. Les médicaments radiopharmaceutiques sur lesquels elle travaille sont des substances radioactives que l'on injecte dans le circuit sanguin pour combattre les cellules cancéreuses. Ces molécules sont bâties avec une partie appelée «ligand», qui s'arrime à la surface de la tumeur comme une clé dans une serrure, et une autre partie porteuse du médicament, un atome radioactif qui émet des électrons lors de sa désintégration radioactive. Une fois dans la cellule cancéreuse, ces électrons forment des radicaux agressifs, soit des substances très réactives qui en attaquent le matériel génétique et la détruisent. L'objectif de Cristina Müller serait de développer des médicaments radiopharmaceutiques qui éliminent les cellules cancéreuses de manière encore plus précise et empêchent ainsi la formation de métastases.





Des microrobots intelligents

Laura Heyderman, responsable du groupe de recherche systèmes mésoscopiques et professeure à l'ETH Zurich, développe des micromachines comme cet oiseau robot («*robotic bird*»), esquissé au centre de son dessin. Ces minimachines sont capables d'exécuter différentes actions. On programme d'abord des nanoaimants («*tiny magnets*») placés dans les composants du microrobot, dont on contrôle ensuite les différents mouvements en appliquant des champs magnétiques («*magnetic fields*»). De telles machines mesurent que quelques dizaines de micromètres. A l'avenir, elles pourraient, par exemple, être utilisées en médecine pour exécuter de petites opérations dans le corps humain.



Carculator

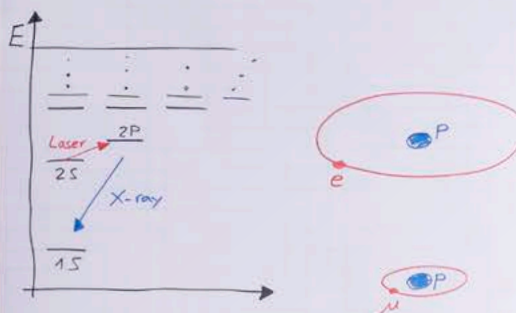
Il y a près de quatre ans, Christian Bauer affirmait que «dès aujourd'hui, la voiture électrique est le bon choix». Ce scientifique travaille au Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du PSI. Spécialisé dans les analyses du cycle de vie et de la durabilité, il a développé, avec une équipe, l'outil Web Carculator. Celui-ci détermine le bilan écologique de véhicules dotés de différents types de propulsions et le présente sous forme de graphiques comparateurs. Ce faisant, il prend en compte l'ensemble du cycle de vie du véhicule, y compris sa production et les émissions polluantes lors de sa conduite.

<https://culator.psi.ch/>



How large is the proton?

Small



$$\Delta E(2S-2P) = \text{QED} + K m^3 R_p^2$$

$$\Rightarrow R_p = 0.84099(36) \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

Le rayon du proton

Quel est le rayon du proton (R_p)? Cette question a déterminé une grande partie de la carrière scientifique d'Aldo Antognini, chercheur au Laboratoire de physique des particules. Ses premières expériences remontent aux années 2000. Elles ne pouvaient être conduites, sous cette forme, qu'au PSI. Son équipe a en effet besoin de muons suffisamment lents, disponibles seulement au PSI en telle quantité. L'idée sous-jacente est la suivante: remplacer l'électron (e) qui gravite autour d'un proton (p) par un muon (μ). Les muons négatifs sont des particules élémentaires comme les électrons, mais ils sont deux cents fois plus lourds. De ce fait, le muon gravite à moindre distance autour du proton et le proton agit plus fortement sur le muon. C'est ainsi que le rayon du proton a pu être mesuré avec une précision inégalée. Résultat: nos modèles de la structure atomique, les interactions fondamentales entre particules élémentaires et la structure du proton se retrouvent au banc d'essai et doivent être spécifiés.



Modification de structure

Valérie Panneels, scientifique au Laboratoire de recherche biomoléculaire du PSI, examine ce qui se passe lorsque la lumière atteint nos yeux. Ces processus figurent parmi les plus rapides de la nature: il s'agit de modifications qui se produisent en une fraction de seconde, un milliardième de millionième de seconde. Seules les grandes installations de recherche, comme le laser à rayons X à électrons libres SwissFEL au PSI, permettent de les étudier. Au centre de ses travaux se trouvent une protéine photoréceptrice, la rhodopsine, et son composant, le rétinale, une molécule qui change de forme lorsqu'elle est exposée à la lumière. Les processus chimiques que déclenche la modification de la structure du rétinale doivent être examinés dans leurs moindres détails et, si possible, enregistrés au SwissFEL dans une sorte de film à très haute résolution. L'objectif des scientifiques est de comprendre parfaitement comment fonctionnent ces protéines photosensibles.

Le réseau, un énorme atout

Torsten Tritscher travaille comme ingénieur pour l'entreprise américaine TSI, qui développe des appareils de mesure de la qualité de l'air et les distribue dans le monde entier.

Il a acquis une bonne partie de ses compétences pendant son doctorat au PSI.

Mais, surtout, il y a noué une multitude de contacts, dont il profite encore aujourd'hui.

Texte: Jan Berndorff

Cette scène, Torsten Tritscher ne l'oubliera jamais. Il sourit encore lorsqu'il repense à la manière dont il a décroché son poste actuel, où il se sent dans son élément depuis douze ans. En marge d'une conférence de recherche à Orlando, sous le soleil de Floride, il avait apostrophé son futur chef, en route pour la plage en short et en tongs. Un entretien d'embauche d'un genre bien particulier. «Il était très ouvert, sans chichis, raconte Torsten Tritscher. Nous sommes convenus que je lui enverrais mon CV et avons fixé un autre rendez-vous en Europe.» Tout s'est alors enchaîné très vite, notamment en raison de l'engagement dont Torsten Tritscher avait fait preuve avant sa visite à la conférence, en ayant obtenu un doctorat au PSI et à l'ETH Zurich – y compris de nombreux contacts qui allaient favoriser sa carrière ultérieure.

Aujourd'hui, à 44 ans, Torsten Tritscher est ingénieur application senior chez TSI, une entreprise américaine qui développe de la technologie de mesure de la qualité de l'air et la distribue, entre autres, par le biais de sa filiale d'Aix-la-Chapelle, en Allemagne, où il travaille. Il est né à Remscheid, en Rhénanie-du-Nord-Westphalie, et est allé à l'école à Wermelskirchen, près de Cologne. Ses parents possédaient une entreprise de jardinage, où il donnait souvent un coup de main. Intéressé par les sciences naturelles, il s'est lancé, après son baccalauréat, dans un cursus d'écologie du paysage à Münster. «Je voulais garder l'option de pouvoir entrer dans l'horticulture après mes études, explique-t-il. Mais mon frère avait déjà choisi cette voie. Je me suis alors spécialisé dans la recherche sur le climat, l'atmosphère et les aérosols.»

La Finlande a fait pencher la balance

C'est lors d'une université d'été de dix jours à Hyytiälä, en Finlande, au sein d'un paysage lacustre et forestier, que ce champ l'a définitivement subjugué. «Dans le milieu des aérosols, ce lieu est connu pour la formation naturelle de nombreuses particules», explique-t-il. Autrement dit, on peut y étudier les multiples corpuscules que la nature produit et qu'elle émet dans l'atmosphère. Ce sont essentiellement des métabolites de plantes, comme les isoprènes et les terpènes, autant que des composés oxygénés, mais aussi du sulfure de diméthyle qui

remonte depuis la mer. Sous l'influence du Soleil, ces particules réagissent et se combinent pour en donner de plus grandes, qui peuvent alors servir de germes de condensation pour la formation des gouttelettes composant les nuages. Ce faisant, les aérosols ont une influence décisive sur la météo ainsi que sur le climat de demain. Toutefois, il s'agit de processus si complexes que l'on ignore comment et où, précisément, ils auront un effet de réchauffement ou de refroidissement. C'est pourquoi les aérosols sont actuellement un sujet brûlant dans la recherche sur le climat.

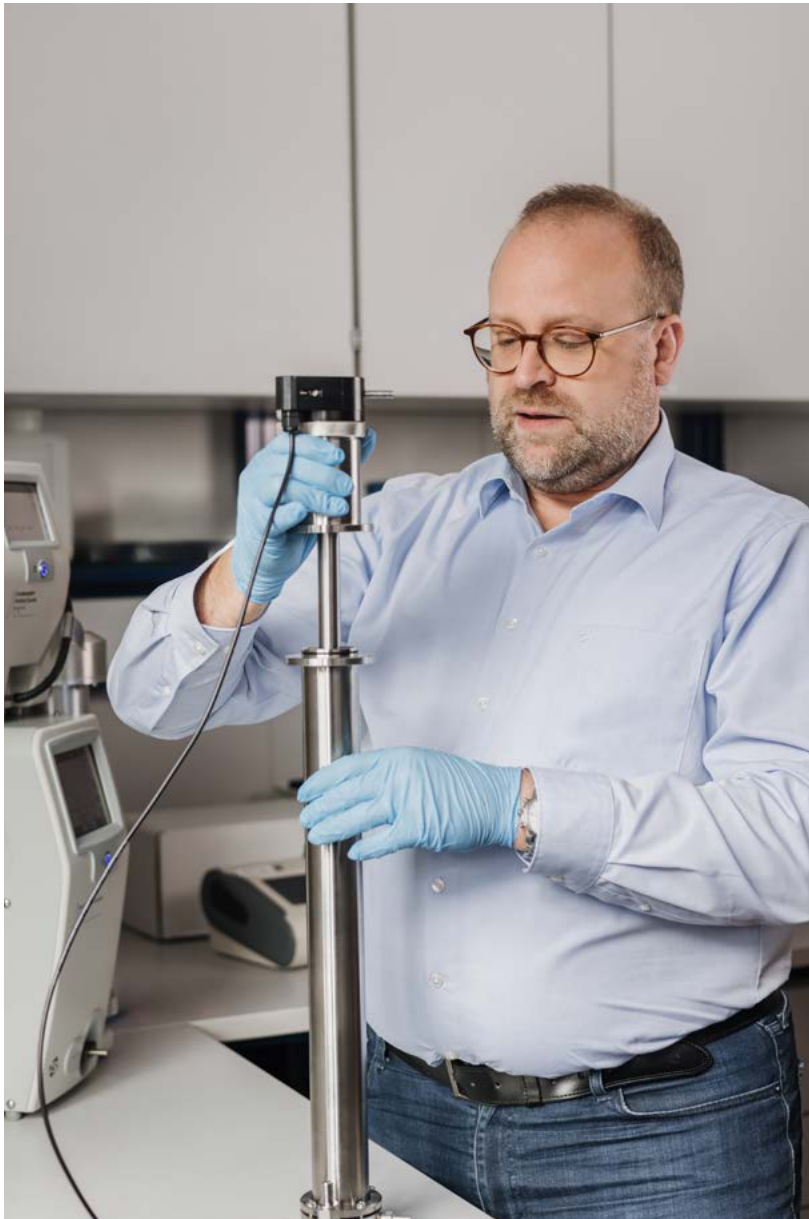
Après l'université d'été, les choses étaient claires pour Torsten Tritscher: c'était ce qu'il voulait faire. Il s'est donc mis en quête d'un poste de doctorat et l'a trouvé au PSI. «Bien entendu, j'ai aussi sondé les possibilités en Allemagne, mais, pour des emplois comparables, on y cherchait soit des physiciens, soit des ingénieurs, explique-t-il. Alors qu'en Suisse, au Laboratoire de chimie de l'atmosphère, on trouvait justement intéressant d'avoir un profil venant d'un domaine scientifique interdisciplinaire comme l'écologie du paysage.»

Des conditions idéales en Suisse

Au PSI, il était question de deux postes: l'un mettait davantage l'accent sur la chimie, l'autre sur la physique. «Ma collègue Claudia Mohr a décroché le poste orienté "chimie" après son séjour aux Etats-Unis, raconte Torsten Tritscher. Aujourd'hui, elle est responsable du Laboratoire de chimie de l'atmosphère.» L'autre lui a été attribué.

Torsten Tritscher a passé quatre ans au PSI. «C'était une époque géniale», se rappelle-t-il. Parallèlement à sa thèse de doctorat, pour laquelle il analysait les propriétés physiques des aérosols les plus divers, notamment leur absorption de l'eau, il a participé à de nombreux projets de recherche passionnants. Il a beaucoup travaillé dans la chambre à smog du PSI, un laboratoire high-tech de vingt-sept mètres cubes, où des spécialistes de l'atmosphère issus du monde entier peuvent simuler et étudier les réactions de particules de gaz dans des conditions atmosphériques contrôlées. «Nous faisons des mesures pendant la journée et des analyses pendant la nuit, raconte-t-il. Le week-end, nous sortions souvent tous ensemble ou nous





«Au PSI, on trouvait justement intéressant d’avoir un profil venant d’un domaine scientifique interdisciplinaire.»

Torsten Tritscher, ingénieur application senior chez TSI, entreprise américaine



faisons des excursions: du ski en hiver, de la marche en été. C'était vraiment très chouette!»

Mais, surtout, durant cette période, Torsten Tritscher a fait la connaissance de nombreux collègues issus du milieu des aérosols à l'échelle mondiale et s'est familiarisé avec toute une série de technologies que ces derniers utilisaient pour leurs expériences. «Ce réseau, mon chef me le répète régulièrement, est un énorme atout que j'ai apporté ici, relève Torsten Tritscher. Lorsque je veux rendre visite à un nouveau client international, je connais toujours au moins une personne qui peut me donner quelques conseils à l'avance.»

Au-delà du réseau, Torsten Tritscher a tiré une foule d'enseignements de la période passée au PSI: «Je peux appliquer pratiquement chaque jour ce que j'ai appris là-bas et je m'en étonne régulièrement», souligne-t-il. L'ingénieur en fait la démonstration dans le laboratoire de TSI, à Aix-la-Chapelle, sur ce qu'on appelle un analyseur de mobilité différentielle (DMA). Cet élément d'appareil cylindrique en acier inoxydable permet de mesurer la répartition de la taille des particules dans l'air ambiant. Torsten Tritscher enfle des gants jetables et dévisse avec précaution la tête, qui contient l'électronique de mesure. Il retire du boîtier une tige en acier inoxydable poli. Celle-ci est l'électrode et le boîtier la masse. L'air, dont les particules ont été préalablement chargées de manière définie, s'engouffre dans la cavité située entre les deux. Sous l'effet d'une tension appliquée, les particules dérivent alors vers l'intérieur ou vers l'extérieur en fonction de la polarité électrique. Leur mobilité électrique dépend directement de leur diamètre. Elles sont ainsi séparées les unes des autres et, pour finir, seules celles d'une certaine taille, de l'ordre du nanomètre, ressortent par une fente et peuvent être comptées. Or, dans le cadre de sa thèse de doctorat, Torsten Tritscher avait lui-même construit un appareil composé de trois DMA, avec une technique de mesure tout à fait similaire: un *hygroscopicity-volatility tandem differential mobility analyzer* (HV-TDMA). Evidemment, il s'était étroitement familiarisé avec tous les composants de celui-ci.

Des stations de mesure ultraspécialisées

Avec l'ordinateur connecté et les programmes d'analyse, il s'agit d'une précieuse technologie de pointe, produite pour des applications extrêmement spécialisées dans la recherche et l'industrie. Il vaut donc la peine, lorsque les produits sont livrés aux clients du monde entier, de dépêcher sur place un ingénieur qui leur apprendra à les installer correctement et à les utiliser de manière optimale. Ou qui conseillera les nouveaux clients sur l'appareil le mieux adapté à leur projet.

Telles sont exactement les tâches majeures de Torsten Tritscher chez TSI. «En tout, nous distribuons plus de deux cents appareils, dont une quarantaine sont de mon ressort, précise-t-il. Leur

fonction principale est de compter des particules en suspension ou de les caractériser.» Les domaines d'application sont par exemple la création de stations de surveillance environnementale; la mesure des gaz d'échappement au banc d'essai des moteurs d'une usine de construction automobile; le contrôle des émissions de nouvelles imprimantes ou encore la mesure de la qualité de l'air à un aéroport.

«Notre site d'Aix-la-Chapelle est responsable des clients en Europe, en Afrique et au Moyen-Orient», note-t-il. Cela ne suppose pas uniquement de dominer la matière en théorie et en pratique pour pouvoir discuter d'égal à égal avec des utilisateurs de la recherche et de la technique. Il faut aussi du tact et de l'entregent: «Quand je parle à des étudiants inexpérimentés, je dois leur expliquer les choses autrement qu'à un fonctionnaire de sous-préfecture ou encore à un professeur méticuleux, qui veut tout savoir précisément jusqu'à la troisième décimale», souligne Torsten Tritscher. Or, à ses yeux, c'est là que réside l'attrait de sa fonction: la diversité des interlocuteurs et les nouveaux défis. Des défis qui ne sont pas forcément de nature humaine ou technique. Par exemple, lorsqu'il se rend chez un client éloigné, dans un pays où la communication linguistique est difficile, et que sa valise n'arrive pas. «Il faut alors être flexible et savoir improviser.»

Par ailleurs, ce qui compte pour Torsten Tritscher, c'est d'avoir trouvé un port d'attache à Aix-la-Chapelle, où il aime revenir après ses nombreux voyages à l'étranger. Il y a fondé une famille, a deux enfants et sa propre maison. Sa femme est, elle aussi, chercheuse en sciences de l'atmosphère. Ils se sont rencontrés à Münster à la fin de leurs études. Elle l'a accompagné en Suisse pour y faire sa thèse de doctorat à l'ETH Zurich, en même temps que lui, avant de décrocher une participation à un projet de trois mois en Virginie, aux Etats-Unis. «Cette fois-là, c'était à mon tour de l'accompagner», se rappelle Torsten Tritscher. Et c'est ainsi que s'est produite la rencontre en Floride décrite au début de cet article: «Alors que nous étions en Virginie, mon directeur de thèse, Urs Baltensperger, m'a invité à assister à la conférence annuelle sur les aérosols en Floride.»

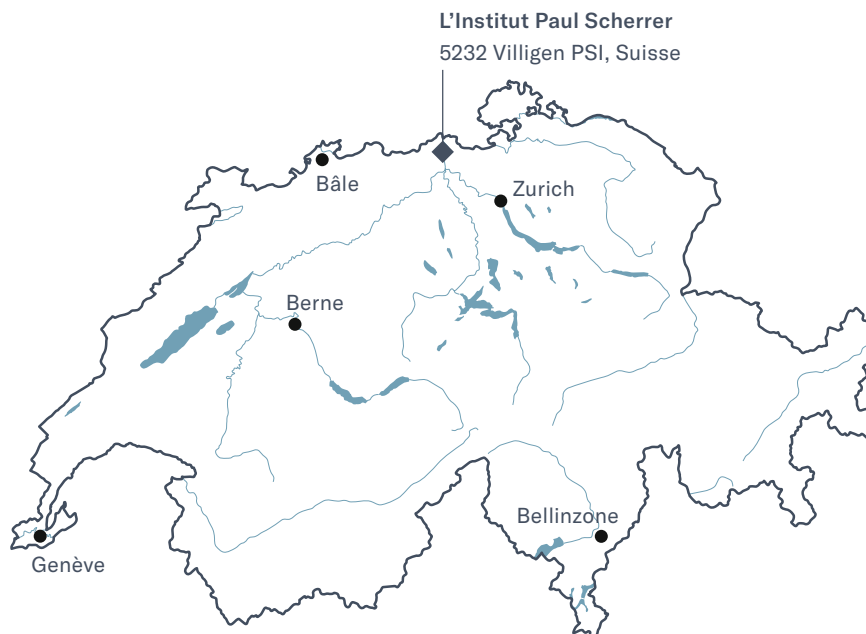
Le jeune couple a répondu positivement à l'invitation et l'a combinée avec un voyage de vacances le long de la côte est. Urs Baltensperger a alors pointé l'occasion qu'il aurait d'aborder Oliver Bischof de l'entreprise TSI. Et c'est ainsi que, par le biais de contacts personnels, la première pierre de la carrière de Torsten Tritscher a pu être posée.

«Et, aujourd'hui, c'est à mon tour d'entrer en contact avec des doctorants en de telles occasions, de boire une bière, de transmettre mon expérience et, éventuellement, de trouver des recrues pour un emploi chez TSI», conclut Torsten Tritscher. Ainsi se referme la boucle qui a commencé avec son doctorat au PSI. ♦

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
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

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 2200 collaborateurs, autrement dit plus d'employés que certains villages des environs n'ont d'habitants.

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

De grandes installations de recherche complexes

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

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

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

Chaque année, quelque 1900 expériences sont conduites aux grandes installations de recherche au PSI. Le temps de mesure au PSI est gratuit pour tous les chercheurs académiques. Les utilisateurs de l'industrie ont la possibilité d'acheter du

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

Au total, le PSI entretient cinq grandes installations de recherche qui permettent de se plonger dans des matériaux, des biomolécules et des appareils techniques afin de sonder les processus qui se jouent à l'intérieur de ceux-ci. 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 quatre 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 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 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.

5232 – Le magazine de l'Institut Paul Scherrer

Paraît deux fois par an.
Numéro 1/2024 (mars 2024)
ISSN 2571-6891

Editeur

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

Rédaction

Monika Gimmel, Martina Gröschl,
Christian Heid, Sebastian Jutzi (resp.),
Benjamin A. Senn, Dr Mirjam van Daalen

Traduction

Catherine Riva

Correction

Étienne Diemert

Design et direction artistique

Studio HübnerBraun

Génération d'images par IA avec

Midjourney:

Couverture, pages 2–5, 8–20:
Studio HübnerBraun.

Photos

Institut Paul Scherrer/Markus Fischer, sauf: pages 22/23: Institut Paul Scherrer / Manuela Reisinger (perles du courage); page 25 en haut à gauche: Kinderkrebs Schweiz; page 25 à droite: Scanderbeg Sauer Photography; pages 26–27: Adobe Stock; pages 35–37: Steffi Ratzke; page 41: Adobe Stock.

Infographies

Studio HübnerBraun, sauf:
pages 6/7: Daniela Leitner.

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

PAUL SCHERRER INSTITUT





Ce qui vous attend dans le prochain numéro

D'ici 2050, le trafic aérien doit devenir neutre pour le climat. Pour y parvenir, il est essentiel d'utiliser des carburants durables pour l'aviation, appelés «*sustainable aviation fuels*» (SAF). Les scientifiques du PSI cherchent donc de nouveaux matériaux et procédés pour leur production. Mais cet enjeu a d'autres implications, car les aéroports et toute leur logistique, la fabrication des avions et leur élimination font aussi partie du bilan climatique du transport aérien, comme le prix des billets et son action régulatrice. Les scientifiques analysent cette structure complexe grâce aux moyens uniques qu'offre le PSI. Les résultats le montrent déjà: voyager en avion sans impact sur le climat est possible.

The background of the page is a server rack with several blue glowing screens. To the right, there is a glowing orange and red molecular structure graphic. A vertical white line is positioned to the right of the contact information.

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