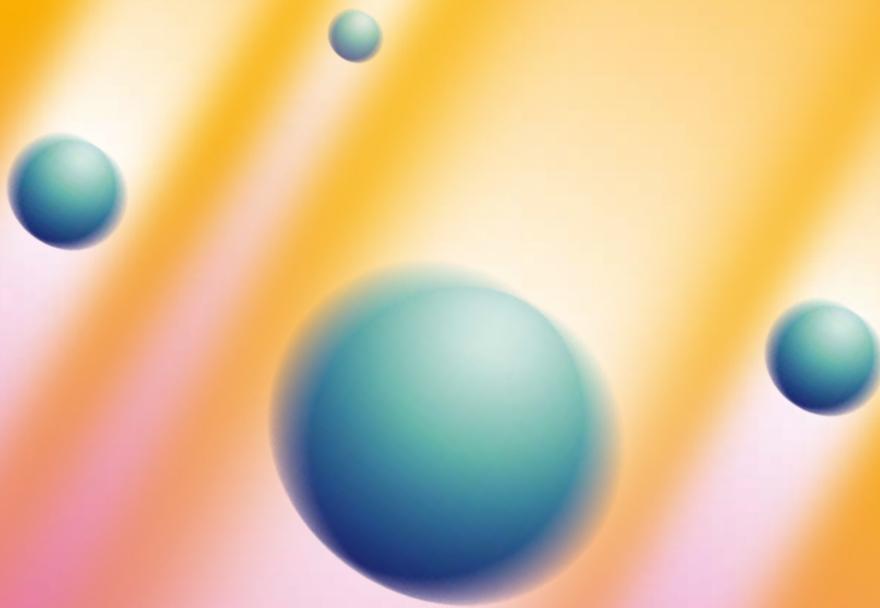


5
2
3
2

#2/2025

Toile de fond
Les artistes quantiques:
des scientifiques
qui font émerger le futur

Interview
«La Suisse doit mettre
les bouchées doubles dans
la recherche quantique»



Le magazine de l'Institut Paul Scherrer PSI

Les quanta: subtils et futuristes

La recherche quantique explore la poésie de l'infiniment petit
et révolutionne notre monde



Dossier

Les quanta: subtils et futuristes

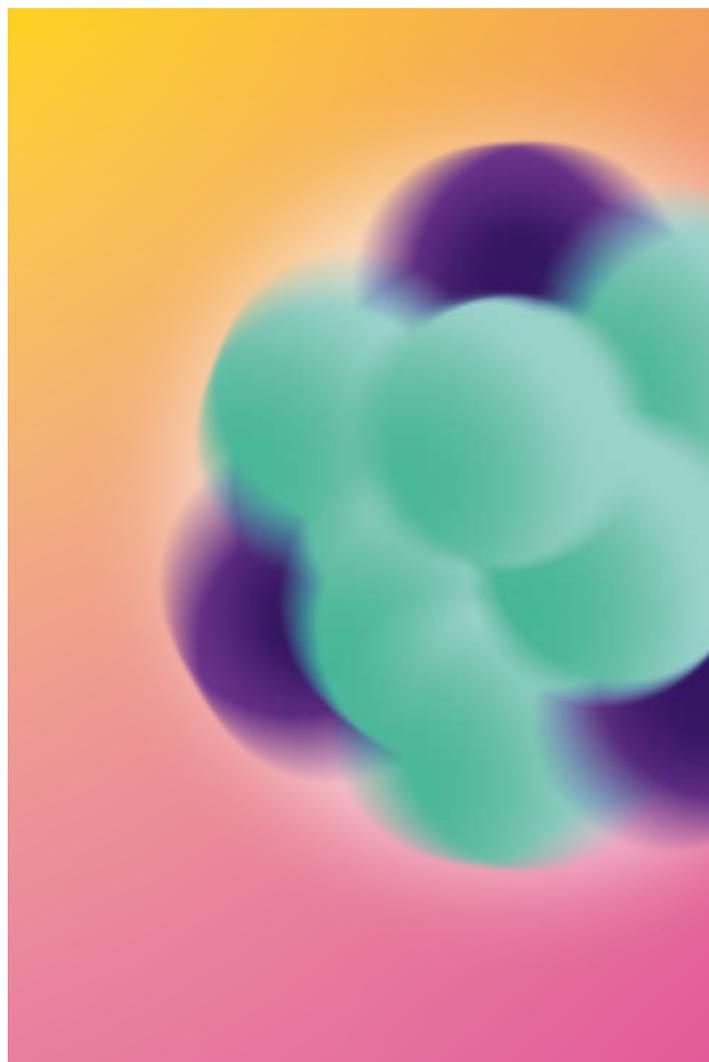
La recherche quantique explore la poésie
de l'infiniment petit et révolutionne notre monde

Toile de fond

Les artistes quantiques

Les scientifiques du PSI maîtrisent de mieux
en mieux l'art de capturer les atomes
avec des faisceaux lumineux ou de produire
simultanément deux oscillations contraires.

Page 8



Interview

«La Suisse doit mettre les bouchées doubles dans la recherche quantique»

Heike Riel dirige la recherche quantique d'IBM
à Rüschlikon. Dans cet entretien, elle parle
de l'importance de cette science et du rôle de
la Suisse.

Page 17



Editorial

L'art des quanta 4



Dossier

**Les quanta:
subtils et futuristes** 6

Toile de fond

Les artistes quantiques 8

Interview

**«La Suisse doit mettre les bouchées
doubles dans la recherche quantique»** 17

En image

Au-delà des technologies lithium 19

Quotidien & recherche

Du fer à la rouille 20

Des gaz aux poussières fines 21

En Suisse

Mille modules pour le CERN 22

Les détecteurs de particules du CERN ont besoin de mises à niveau régulières. Un groupe de recherche du PSI est impliqué dans l'électronique hautement complexe de leurs composants.

En bref

Actualité de la recherche au PSI 26

- 1 Au plus près du noyau atomique
- 2 Détecter les perturbations génétiques
- 3 Rayonnement précis contre le lymphome
- 4 Un livre de recettes par IA pour un ciment respectueux du climat

Galerie

Le PSI comme une ville 28

Dans cette galerie, nous vous présentons une sélection d'équipements et de services «urbains» disponibles au PSI.

Parcours de vie

Où l'analyse rencontre les arômes 34

Un géochimiste devient brasseur. Luc Van Loon crée des bières primées avec la précision d'un scientifique.

Qui sommes-nous? 38

Impressum 39

Dans le prochain numéro 39

L'art des quanta

Si vous avez l'impression de ne rien comprendre aux quanta, ne vous en faites pas, vous êtes en excellente compagnie. Même pour des scientifiques, la mécanique quantique présente des difficultés, alors que sa découverte remonte déjà à cent ans: les publications qui constituent les fondements de ce domaine de recherche datent de 1925. Cet anniversaire est l'occasion, pour nous, de vous présenter les quanta dans ce magazine.

Les chercheurs de l'époque étaient incapables d'interpréter bien des phénomènes, mais ils avaient accepté que, dans l'infiniment petit, la nature se comporte très différemment de l'expérience quotidienne que nous en avons. Et, avec leurs nouvelles formules, ils ont réussi à modéliser le monde des atomes et à établir des prévisions fiables. Peut-être que la physique quantique est comme l'art: l'effet pratique y est aussi important que la compréhension des détails.

Aujourd'hui, les phénomènes quantiques restent mystérieux à bien des égards et, pourtant, les scientifiques peuvent les exploiter. Ils se servent de pinces optiques pour positionner des atomes individuels de manière si précise que les effets calculés se produisent réellement. Ou ils déforment un matériau fait de couches ultrafines, de sorte que sa nature quantique produise des propriétés extrêmement utiles. Dans ce numéro, nous vous expliquons comment ces travaux ont conduit à la création de produits en usage aujourd'hui et nous vous décrivons ce que l'avenir pourrait nous réserver.

Certes, notre institut ne doit pas encore sa réputation à la recherche quantique, mais celle-ci joue un rôle dans de nombreux domaines de la recherche au PSI. Plus les scientifiques scrutent les choses dans le détail – qu'il s'agisse de matériaux pour des technologies d'avenir ou de molécules importantes dans l'organisme humain –, plus les effets quantiques se manifestent clairement.

C'est pourquoi, sur le campus du PSI, nous avons désormais un bâtiment dédié à la recherche fondamentale sur la matière quantique, à côté du Quantum Computing Hub de l'ETH-PSI. Vous me voyez ici dans la halle, presque achevée et encore vide, du laboratoire du nouveau QMMC: le Quantum Matter and Materials Center. Entre ces murs, de nombreux groupes de recherche, aujourd'hui dispersés sur le site du PSI, pourront non seulement améliorer leur collaboration, mais aussi développer et utiliser conjointement de nouveaux instruments.

Et si l'univers de l'infiniment petit ne vous impressionne pas, jetez un coup d'œil à l'une des plus grandes machines du monde: l'accélérateur de particules du CERN. A la page 22, vous découvrirez comment un groupe de recherche du PSI contribue à préparer sa mise à niveau.

Pour finir, nous vous offrons une bière, du moins sur le papier. Luc Van Loon, ancien chercheur au PSI, est à la tête d'une microbrasserie très raffinée. Notre auteur a sauté sur l'occasion pour visiter les lieux – et j'aurais fait de même!

Christian Rüegg, directeur du PSI





Les quanta: subtils et futuristes

Le monde quantique est mystérieux. Mais les chercheurs comprennent de mieux en mieux ses règles étranges et les utilisent pour créer des technologies qui vont changer notre vie.

Texte: Bernd Müller

1

Toile de fond

Les artistes quantiques

Chapitre 1.

Freiner le temps et piéger les ions

Chapitre 2.

Duo de terbium et autres œuvres d'art quantiques

Chapitre 3.

Atomes sous pression

Page 8

2

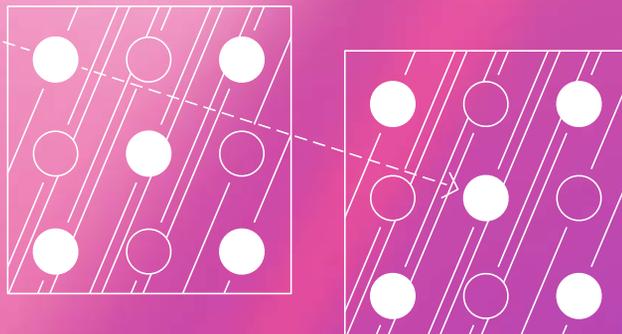
Interview

«La Suisse doit mettre les bouchées doubles dans la recherche quantique»

Page 17



Polaritons



Des ordinateurs sans câbles

Les rayons laser permettent de capturer et de positionner avec précision des atomes individuels (grande image). C'est par ce moyen que Wechao Xu place différents types d'atomes dans une chambre à ultravide et les utilise comme qubits. À mesure que leur nombre augmente, il devient nécessaire de connecter des atomes très éloignés les uns des autres. C'est là que les polaritons entrent en jeu. Ces quasi-particules possèdent les propriétés de la lumière et de la matière, ce qui en fait des émissaires idéaux pour transmettre des messages quantiques sur de longues distances.

Les artistes quantiques

Les scientifiques du PSI remettent en question notre expérience quotidienne: ils créent de nouveaux matériaux, réalisent des mosaïques à partir d'atomes disposés avec précision, font circuler du courant sans résistance et ralentissent le temps dans des simulations. Découvrez les laboratoires où émerge le futur.

Chapitre 1. Freiner le temps et piéger les ions

Cornelius Hempel modélise des phénomènes quantiques avec des quanta. Cela semble logique, mais c'est extrêmement complexe. Son dernier coup d'éclat: un simulateur quantique qui ralentit le temps.

Comme ce serait bien de pouvoir freiner le temps! Pas de nouvelles rides quand on se regarde dans le miroir, le matin, et de belles vacances qui pourraient se prolonger un peu. Le visage de Cornelius Hempel porte relativement peu de rides. Ce qui tient probablement au fait que le physicien du Centre des sciences photoniques a 44 ans, mais non à la machine que son équipe a construite dans un laboratoire sans fenêtre – un enchevêtrement apparemment chaotique de câbles, de lentilles et de lasers. Et pourtant, celle-ci ralentit le temps, tout au moins dans des calculs complexes. Il s'agit d'un ordinateur quantique basé sur un piège à ions et Cornelius Hempel s'en sert pour simuler au ralenti des réactions chimiques ultrarapides. En revanche, il n'empêchera pas l'apparition des rides.

Son ordinateur quantique est en fait une horloge atomique, explique Cornelius Hempel. Il travaille avec des ions, c'est-à-dire des atomes chargés électriquement qui sont retenus dans un piège et dont les électrons sont mis en oscillation à l'aide de lasers, un peu comme le balancier d'une pendule ancienne. Les premières horloges atomiques ont été construites dans les années 1950 et fonctionnaient avec des micro-ondes. Aujourd'hui, elles fondent encore notre mesure du temps et définissent la seconde par leur oscillation: ainsi, une seconde correspond à quelque 9,1 millions d'oscillations. Les horloges atomiques offrent une précision de 16 chiffres après la virgule: autrement dit, elles se trompent d'environ une seconde en 100 millions d'années. Les modèles actuels à base d'ions sont mille fois plus précis. «On ne sait rien mesurer avec plus de précision que le temps», affirme Cornelius Hempel.

Le chercheur utilise donc l'horloge atomique comme simulateur quantique. Un simulateur quantique reproduit un autre système quantique – souvent un solide ou un

liquide – de manière contrôlable. Le meilleur moyen de modéliser le comportement des quanta est d'utiliser des ordinateurs quantiques. C'est ce qu'avait proposé Richard Feynman, Prix Nobel de physique, en 1982. Son concept était longtemps resté dans les tiroirs. Ce n'est que dans les années 1990 que l'idée a été relancée. Et, en 1995, le premier prototype de ordinateur quantique basé sur une horloge atomique à ions a été présenté.

Des noyaux atomiques avec vibration naturelle

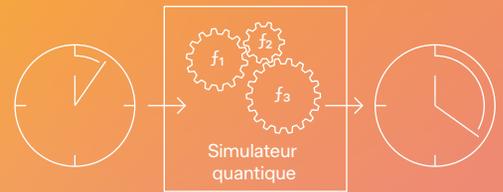
Au cours des dix dernières années, les ordinateurs quantiques ont fait de tels progrès qu'ils peuvent parfaitement être utilisés aujourd'hui comme simulateurs quantiques. Les physiciens disposent ainsi d'un nouvel instrument puissant pour modéliser le comportement des molécules, autrement dit de groupes d'atomes, jusque dans les détails de la physique quantique. A ce stade, même les superordinateurs les plus rapides sont souvent contraints de passer leur tour. Pour obtenir un résultat à peu près valable, les scientifiques font comme si les noyaux atomiques étaient gelés: le superordinateur calcule uniquement la manière dont les électrons gravitent autour des noyaux, mais il reste ainsi très loin de la réalité. «Les noyaux atomiques vibrent et ils devraient également le faire dans la simulation, relève Cornelius Hempel. Un simulateur quantique à ions est très prometteur à cet égard, car ceux-ci vibrent naturellement dans leur piège.»

L'inconvénient d'un simulateur quantique est le suivant: il ne parvient pas à reproduire la vitesse ultrarapide des phénomènes moléculaires et atomiques. Sa vitesse équivaut uniquement à celle du système quantique sous-jacent. C'est là qu'intervient le «frein temporel». Celui-ci utilise un modèle mathématique qui correspond au système simulé pour décrire le comportement des ions dans l'expérience, mais avec un facteur d'étirement temporel de 100 milliards. En réalité, Cornelius Hempel ne ralentit pas le système quantique proprement dit mais sa représentation dans le modèle mathématique.

Une information instantanée dans l'œil

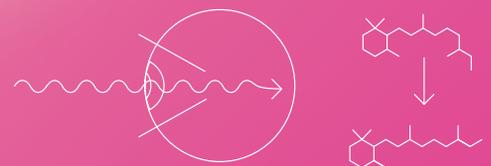
Dans la nature, les réactions chimiques ultrarapides se produisent aux niveaux les plus divers. Par exemple, elles nous empêchent d'attraper constamment des





Freiner le temps

Extrêmement petits et rapides, les noyaux atomiques vibrent à une échelle de 10 milliardièmes de milliardième de seconde, comme le montre la grande image. D'autres processus, fort nombreux dans le monde des atomes et des molécules, se déroulent également à une vitesse folle, ce qui rend difficile leur observation en laboratoire. Comme solution à ce problème, Cornelius Hempel a construit un simulateur qui imite d'autres systèmes quantiques et qui contient un «mécanisme» mathématique pour étirer le temps. Il peut ainsi étudier au ralenti des processus ultrarapides.



Fulgurant rétinale

Le rétinale est une molécule située dans la rétine. Exposé à la lumière, il change de forme et un signal est envoyé au cerveau. Cela ne dure qu'un demi-milliardième de seconde. Cornelius Hempel reproduit ce processus à l'aide de son simulateur quantique. La résolution temporelle extrêmement précise qu'il obtient complète les recherches expérimentales d'autres scientifiques du PSI.

coups de soleil en transformant les rayons UV incidents en chaleur dans le génome des cellules, avant que des dommages ne surviennent. Des réactions chimiques très rapides se produisent également dans la rétine de nos yeux. Le rétinale traduit la lumière incidente en information et le nerf optique la transmet au cerveau. Si une particule lumineuse – appelée «photon» – atteint cette molécule recourbée, elle se redresse instantanément dans sa longueur et stimule par là même le nerf optique. Au laser à rayons X à électrons libres SwissFEL, d'autres groupes de recherche du PSI étudient ce processus de manière expérimentale. Le rétinale s'allonge en seulement 400 femtosecondes environ, soit à peine un demi-milliardième de seconde. En revanche, dans le simulateur quantique de Cornelius Hempel, le calcul se fait en quelques confortables millisecondes. L'avantage est que le chercheur peut étudier avec précision ce qui se passe lors de la déformation de la molécule et comment les atomes coopèrent.

Un simulateur quantique fonctionne le plus souvent de manière analogique, alors qu'un ordinateur quantique fonctionne de manière numérique. Les bits quantiques (ou qubits) du calculateur quantique connaissent les états binaires 0 et 1, avec lesquels travaillent les ordinateurs classiques, mais à une différence près: les qubits peuvent adopter simultanément les deux états dans des proportions variables. Ce qui augmente considérablement leur puissance de calcul pour certaines tâches.

Alimenter en données l'ordinateur quantique

Que se passerait-il si l'on pouvait combiner le simulateur quantique et l'ordinateur classique, c'est-à-dire



«Les phénomènes quantiques sont présents dans de nombreux produits actuels et futurs, auxquels notre travail peut contribuer.»

Cornelius Hempel, chercheur au Centre des sciences photoniques du PSI

les modes analogique et numérique? On obtiendrait un simulateur quantique que l'on pourrait alimenter avec des informations numériques. Andreas Elben et Andreas Läuchli, du Centre de calcul scientifique, théorie et données du PSI, ont réuni le meilleur des deux mondes dans une publication pionnière parue dans *Nature*, l'une des revues scientifiques spécialisées les plus renommées. Avec les scientifiques de Google et d'universités de cinq pays, ils ont montré comment calculer, avec un calculateur quantique de seulement 69 qubits, des processus de dynamique quantique tels que la diffusion de la chaleur dans un liquide, lorsqu'on mélange deux substances à différentes températures dans une réaction chimique.

Ce concept, qui ouvre la voie au simulateur quantique universel, devrait être utilisé dans divers domaines de la physique. Les pièges à ions de Cornelius Hempel conviennent également à un simulateur quantique universel.

Des moineaux perchés sur la ligne électrique

Cornelius Hempel a disposé plusieurs dizaines d'ions dans une chambre. Ils sont perchés comme des moineaux sur une ligne électrique. Il doit les inciter à calculer à l'aide d'un rayon laser depuis l'extérieur, ce qui ne pose aucun problème vu leur nombre. Cependant, si l'on souhaite disposer à l'avenir de millions de qubits sur une puce, les lasers devront être intégrés à la puce et activés et désactivés individuellement. On parle ici de «photonique intégrée». Cela existe déjà dans les centres de données, mais ces lasers intégrés, d'une part, sont trop grands et, d'autre part, émettent des longueurs d'onde dans l'infrarouge profond. Or, les calculateurs quantiques ont besoin de lumière visible. «C'est la raison pour laquelle nous développons nous-mêmes ces technologies au PSI», explique Cornelius Hempel. Il en résultera peut-être un jour des processeurs hybrides, sur lesquels les atomes et les lasers d'un ordinateur quantique seront réunis avec de l'électronique au silicium traditionnelle.

Ces technologies sont encore loin d'une application commerciale. D'autres groupes, au PSI, travaillent à combler cette lacune. Dont Kirsten Moselund et son équipe au Laboratoire des technologies nanométriques et quantiques du Centre des sciences photoniques du PSI.

Aujourd'hui, de nombreuses industries – comme l'électronique, les techniques de mesure ou encore la photonique – profitent des développements de l'informatique quantique. «Au PSI, une très grande partie de la recherche se penche sur des phénomènes que nous aimerions comprendre jusqu'au niveau de la physique quantique, souligne Cornelius Hempel. Et des phénomènes quantiques, il y en a dans de nombreux produits, actuels et futurs, auxquels notre travail peut apporter une contribution décisive.»

Chapitre 2. Duo de terbium et autres œuvres d'art quantiques

Pour créer des bits quantiques plus stables, les scientifiques du PSI associent des ions terbium par paires. Ailleurs, ils positionnent des atomes avec précision à l'aide de pinces optiques.

«Mettez les bonnes dans le petit pot et les mauvaises dans votre jabot», dit Cendrillon aux pigeons venus l'aider à trier ses lentilles. Lorsqu'on quitte le monde des contes de fées pour entrer dans le domaine des calculateurs quantiques, il faut aussi séparer ce qui est bon de ce qui ne l'est pas. Mais, cette fois, au niveau des atomes et de leurs frères, porteurs d'une charge électrique, les ions. Ce qui est «bon» aux yeux des chercheurs, ce sont les qubits, par exemple des atomes ou des ions, qui peuvent opérer des calculs dans un ordinateur quantique. Les qubits sont généralement très sensibles: la plus infime perturbation mécanique ou magnétique extérieure suffit à rompre leur cohérence en une fraction de seconde. Les qubits sont alors désynchronisés et les informations quantiques perdues. Ils deviennent de «mauvais» qubits et font obstacle aux calculs de l'ordinateur quantique.

Dans les calculateurs quantiques actuels, les qubits sont relativement bien espacés: ils ne se perturbent donc pas mutuellement. Mais ce qui fonctionne plutôt bien avec 50 ou 100 qubits devient problématique lorsqu'on envisage les ordinateurs du futur. Ils auront plusieurs millions de qubits, que l'on souhaite empaqueter de façon serrée comme les bits sur les puces informatiques actuelles. Résultat: ils se perturberont et les «bons» deviendront «mauvais».

Simon Gerber et Gabriel Aepli travaillent au Centre des sciences photoniques du PSI. Ils connaissent le moyen de garder plus longtemps les qubits dans le pot des «bons», et ce même s'ils sont empoussiérés de façon serrée. Leurs qubits à ions terbium sont intégrés dans le réseau cristallin atomique de cristaux de fluorure d'yttrium-lithium. Le résultat est étonnant: les ions terbium produisent des qubits plus stables que prévu, possédant une cohérence beaucoup plus élevée.

«L'astuce consiste à stocker les états des qubits dans l'interaction entre deux ions et non, comme à l'accoutumée, dans des ions individuels, explique Simon Gerber. Ces paires d'ions se forment naturellement lorsqu'on ajoute beaucoup de terbium dans le cristal.» L'avantage: les qubits à paires d'ions communiquent à une fréquence bien précise, qui ne peut pas être perturbée par les ions terbium individuels ou d'autres atomes présents dans le cristal. A la radio, ce serait comme si l'on se servait d'une nouvelle fréquence très éloignée des stations existantes: les anciennes fréquences n'interféreraient pas. En appliquant cette image aux



Wenchao Xu, chercheuse au Centre des sciences photoniques du PSI, positionne des atomes avec des rayons laser. Son objectif est d'utiliser la méthode de la pince optique pour placer jusqu'à 5000 atomes avec la plus grande précision.

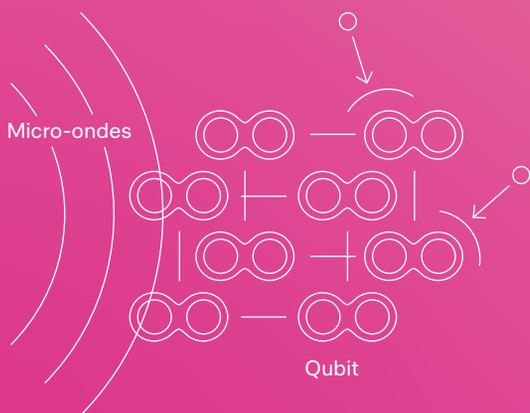
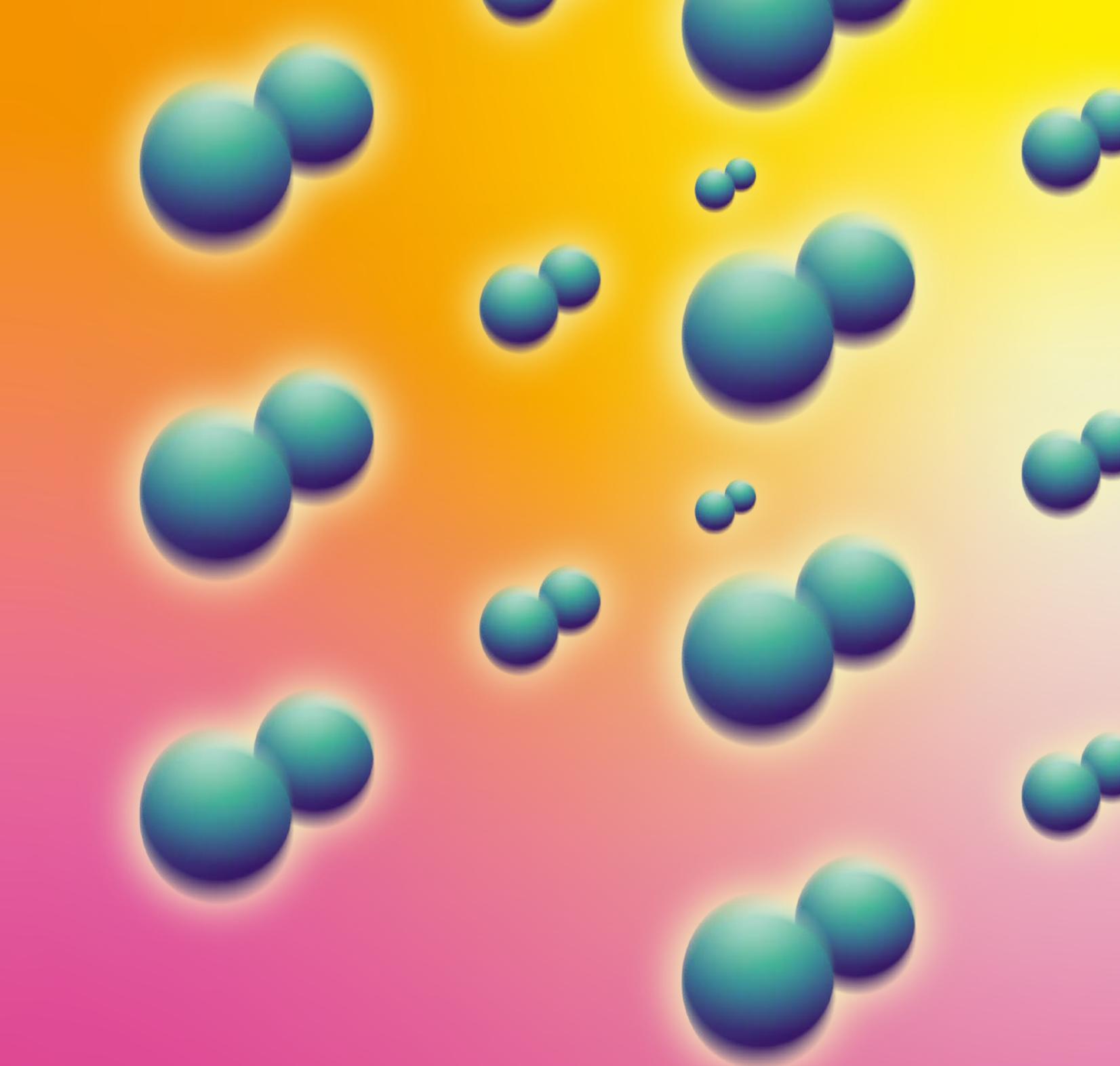
qubits, cela signifie que l'on peut communiquer sans encombre avec eux et que leur cohérence se maintient beaucoup plus longtemps. Cette particularité rend l'approche du PSI extrêmement intéressante pour la construction de futurs calculateurs quantiques.

Un bouclier à partir de micro-ondes

Mais il y a mieux. Les perturbations magnétiques extérieures menacent également les qubits à ions terbium. Cependant, en les irradiant avec des micro-ondes, on obtient l'effet protecteur d'un bouclier. Les qubits par paires ont une durée de vie jusqu'à cent fois plus longue que les qubits faits d'ions seuls non irradiés. «Avec le bon matériau, on pourrait même prolonger la cohérence», avance Gabriel Aepli, directeur du Centre des sciences photoniques. Forte de ces connaissances, son équipe veut maintenant poursuivre l'optimisation de la structure.

Les expériences publiées l'an dernier dans la revue spécialisée *Nature Physics* ouvrent une nouvelle voie pour la construction de calculateurs quantiques. Mais pour y arriver, il ne suffira pas de simplement disperser des ions terbium dans un réseau cristallin. «La tendance est de placer les atomes ou les ions de manière quasi chirurgicale», explique Gabriel Aepli.

Wenchao Xu connaît bien l'agencement des atomes individuels. Elle aussi travaille au Centre des sciences photoniques. Ses atomes ne se trouvent pas dans un solide mais dans le vide, flottant à l'intérieur d'une chambre compacte. Wenchao Xu souhaite y positionner jusqu'à 5000 atomes avec une extrême précision, grâce à un réseau optique de faisceaux laser focalisés. «Nous appelons cette technique "pince optique", explique Wenchao Xu. Elle nous permet de piéger et de placer



Bouclier pour qubits

Principal obstacle sur la voie qui mène au calculateur quantique: les qubits, constitués d'atomes ou d'ions, sont très sensibles et perdent leur cohérence quantique à la moindre perturbation. Certains ions peuvent toutefois exister par paires, ce qui les rend plus résistants. Par ailleurs, si on les irradie avec des micro-ondes, ils deviennent encore plus robustes. L'équipe de Simon Gerber étudie ces qubits prometteurs.

chaque atome avec un rayon laser.» Son équipe utilise les atomes individuels comme qubits et construit des processeurs quantiques à partir d'une grande quantité d'atomes placés de la sorte.

Hybrides de lumière et de matière

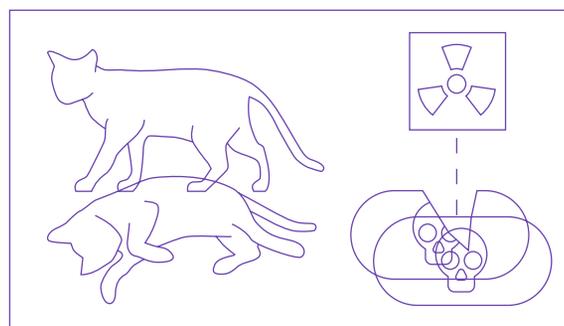
Wenchao Xu explore par ailleurs les possibilités de réunion entre systèmes quantiques. Pour ce faire, elle a recours à ce qu'on appelle des «polaritons». Ce sont des quasi-particules possédant des propriétés de lumière et de matière. Elles pourraient servir d'interfaces entre les qubits atomiques et la lumière pour porter des informations quantiques sur de longues distances. Plusieurs processeurs quantiques pourraient être reliés entre eux par des polaritons et permettre ainsi la création de calculateurs plus puissants.

Dominik Sidler s'intéresse lui aussi aux polaritons. Ce physicien théorique du Centre de calcul scientifique, théorie et données n'étudie pas les quasi-particules en laboratoire mais dans le cadre de simulations informatiques. Il y analyse le lien étroit qui existe entre lumière et matière. Si l'on enferme des molécules dans un minuscule palais des glaces et que l'on y fait aller et venir la lumière, celle-ci peut modifier la structure des molécules et, dans la foulée, leurs propriétés chimiques. Ce qui est particulier, c'est que cela ne nécessite pas de lumière extérieure. L'effet quantique apparaît aussi dans l'obscurité totale. Pourquoi les propriétés chimiques se modifient-elles? On l'ignore encore, car les modèles physiques actuels ne prévoient pas ce phénomène. Là aussi, il se pourrait que les polaritons soient impliqués.

Dominik Sidler s'efforce de percer les secrets de la chimie polaritonique. S'il devait réussir, cela déboucherait notamment sur des médicaments dont le principe actif serait produit de manière plus efficace sur le plan énergétique. Car les pièges à lumière permettraient d'en modifier la structure chimique de manière ciblée.

Des qubits de chat

Tandis que des scientifiques comme Simon Gerber et Wenchao Xu prennent, pour leurs qubits, ce qu'offre la nature comme très petits composants – des atomes ou des ions –, Alexander Grimm emprunte une autre voie: il fabrique des qubits de manière artificielle. Il utilise des cavités micro-ondes (un type particulier de résonateur) dans lesquelles le signal électrique peut osciller comme un pendule. Le groupe de recherche d'Alexander Grimm est capable de contrôler précisément l'état d'oscillation dans ces résonateurs. Et à moins 273 degrés Celsius, Alexander Grimm peut créer une superposition quantique, c'est-à-dire deux oscillations contraires au même instant. Comme si un pendule classique oscillait simultanément dans deux directions opposées. «Autrement



Le chat de Schrödinger

est une expérience de pensée imaginée en 1935. Un chat fictif est enfermé dans une caisse avec une capsule de poison. La probabilité que ce poison soit vaporisé dans l'air par un processus atomique est précisément de 50%. D'après la mécanique quantique, les deux états atomiques sont présents simultanément, tant que le résultat n'est pas mesuré. Le physicien Erwin Schrödinger pose la question de savoir si, par conséquent, le chat est mort et vivant en même temps. Cette simultanéité contredit l'expérience quotidienne, dans laquelle nous observons avant tout de la physique classique. Mais elle ne contredit pas la physique quantique.

dit, nous créons en laboratoire une sorte de chat de Schrödinger», explique Alexander Grimm en faisant allusion à la célèbre expérience de pensée imaginée par Erwin Schrödinger. L'avantage de ces qubits de chat est le suivant: les deux états contraires sont résistants aux perturbations, si bien que les qubits d'Alexander Grimm restent, par nature, plus longtemps dans les petits pots de Cendrillon contenant les «bons».

Le lieu idéal pour la recherche quantique

Les nombreuses approches de la recherche quantique ont de meilleures chances d'aboutir lorsque des chercheurs issus de différents domaines collaborent. «Chaque discipline a son langage et son formalisme, rappelle Dominik Sidler. Il est donc important que nous allions au-delà de nos spécialités et que nous nous ouvrons à de nouvelles possibilités. A cet égard, le PSI est l'endroit idéal. Notamment, grâce à son étroite coopération avec les hautes écoles du Domaine des EPF et à ses nombreux contacts avec des institutions internationales.»

«Nous nous enrichissons mutuellement», confirme Simon Gerber. L'expérience avec les paires d'ions terbium, par exemple, pourrait déboucher sur de nouveaux capteurs. En principe, si l'on veut comprendre ce qui se passe aux niveaux atomique et électronique, il faut disposer de grands microscopes. «Les grandes installations de recherche du PSI, qui sont uniques au monde, nous aident dans notre compréhension des sciences des matériaux, ce qui ouvre beaucoup de nouvelles possibilités d'application», dit Simon Gerber.

Chapitre 3. Atomes sous pression

En mettant la matière sous pression, Zurab Guguchia génère des phénomènes quantiques passionnants, notamment la supraconductivité à des températures facilement atteignables.

Les spécialistes en sciences des matériaux ne font pas dans la dentelle. Ils tendent les matériaux, les pressent ou les étirent avec force jusqu'à ce que les échantillons se rompent ou éclatent. Zurab Guguchia, physicien au Centre de recherche avec neutrons et muons du PSI, ne procède pas de manière si brutale. Il ne tente pas de détruire, mais de créer de la nouveauté. Par exemple, des matériaux exotiques qui conduisent le courant sans perte, même à hautes températures, ou qui présentent des propriétés magnétiques et électroniques novatrices. Ses expériences pourraient non seulement déboucher sur de nouvelles connaissances en physique quantique, mais aussi ouvrir des portes vers des applications pratiques comme des réseaux électriques plus efficaces sur le plan énergétique ou des moteurs électriques n'ayant pas besoin d'aimants aux terres rares. Dans les faits, ces métaux ne sont pas vraiment rares, mais leur extraction reste complexe et coûteuse.

L'échantillon que Zurab Guguchia examine au Laboratoire de spectroscopie de spin des muons n'est pas visible des visiteurs. Ce petit fragment de métal est



«Je m'intéresse principalement à la compréhension des mécanismes fondamentaux à l'origine des phénomènes quantiques inhabituels.»

Zurab Guguchia, chercheur au Centre de recherche avec neutrons et muons du PSI

dissimulé dans un tube à essai, où il est immergé dans un liquide huileux qui exerce sur lui une légère pression. A mesure que cette pression hydrostatique augmente, l'appareil de mesure affiche des valeurs surprenantes. Et, tout à coup, la supraconductivité apparaît et le courant électrique passe sans résistance. Or, ce phénomène est déclenché uniquement par la pression, sans refroidir l'échantillon à l'extrême, condition normalement nécessaire à la supraconductivité.

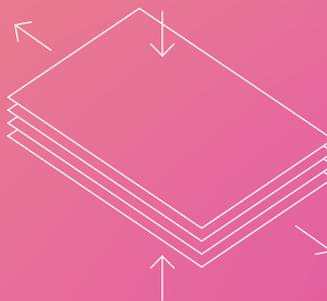
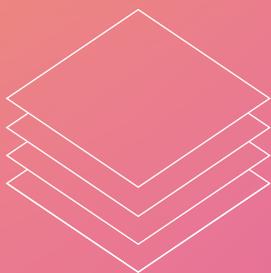
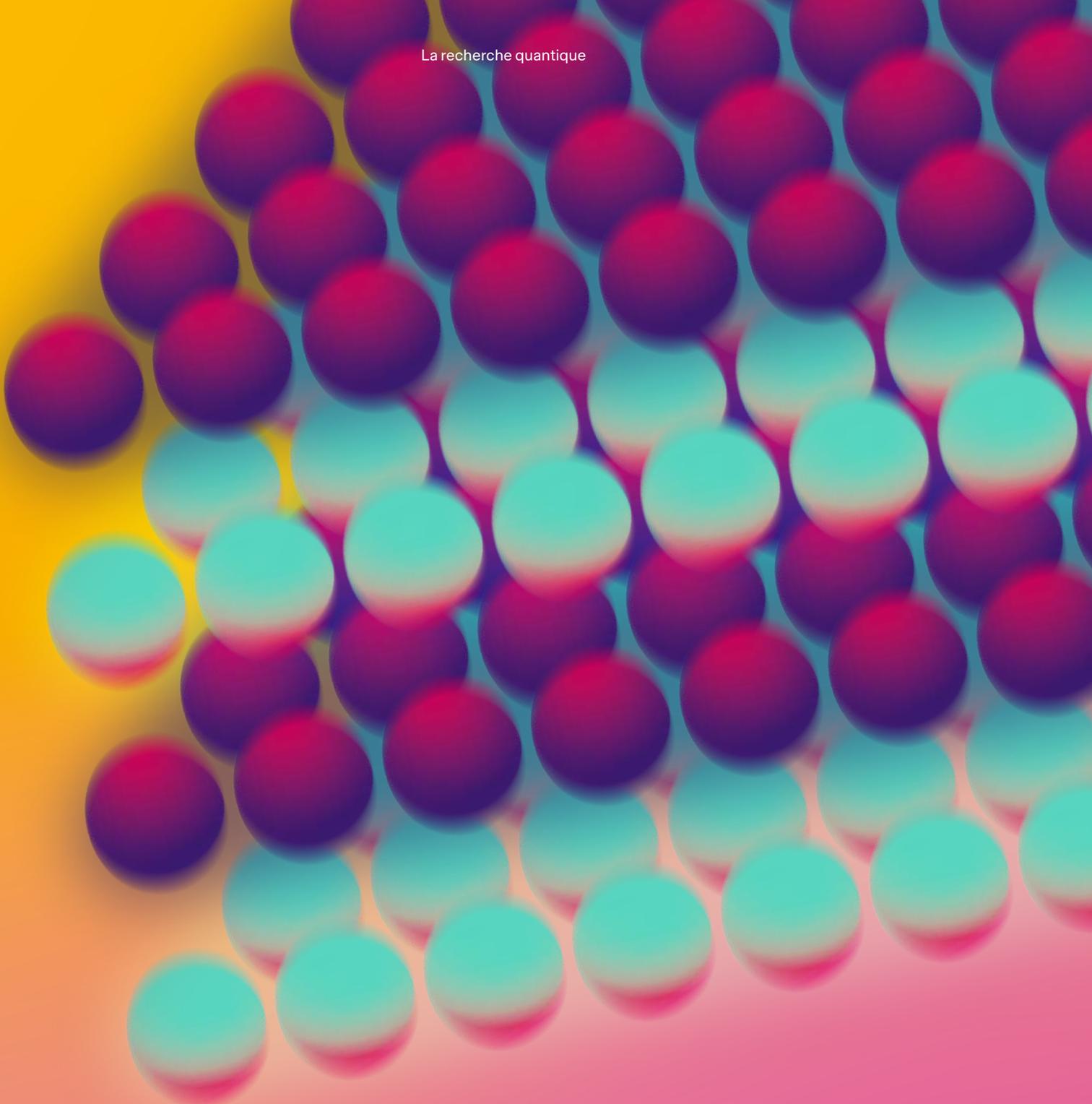
Zurab Guguchia découvre, presque chaque semaine, des effets fascinants dans ses données. Il publie régulièrement dans des revues scientifiques prestigieuses. En 2022, il a notamment fait paraître un article dans *Nature*, ce qui représente une distinction pour n'importe quel scientifique. Et comme il le laisse entendre, d'autres publications sont en cours.

Sa toute dernière étude porte sur un matériau doté d'une structure stratifiée semblable à de la pâte feuilletée, où chaque couche a l'épaisseur d'un atome seulement. Lorsqu'on pose l'échantillon sur la table du laboratoire, il ne se passe rien. Mais dès qu'on le tend dans un cadre mobile et qu'on l'étire doucement, les couches s'allongent et se rapprochent, comme de la pâte qu'on abaisse. On peut également placer l'échantillon dans le tube à essai rempli du liquide huileux et la pression hydrostatique homogène fait son effet. Si tous les paramètres sont réunis, il se produit quelque chose de magique: les électrons – ces particules chargées négativement qui gravitent autour du noyau atomique – commencent à sentir ceux des couches voisines. Des phases quantiques apparaissent: le matériau perd sa résistance électrique et devient supraconducteur, magnétique, ou bien développe ce qu'on appelle un «ordre de charge», où les porteurs de charge s'organisent en motifs réguliers. Ces trois ordres coexistent souvent dans les matériaux quantiques et interagissent de manière complexe.

Opposition des phases quantiques

Les physiciens connaissent de nombreuses phases quantiques de ce genre, qui produisent différents types d'interactions électroniques. Si l'échantillon est étiré ou comprimé, il peut aussi présenter des propriétés qui contredisent les résultats attendus. C'est pourquoi Zurab Guguchia adapte avec précision les forces dans le dispositif de pression ou de traction pour supprimer les phases non désirées et renforcer celles que l'on souhaite obtenir, comme la supraconductivité. C'est seulement lorsque les couches atomiques sont déformées dans une direction définie que se produit l'effet souhaité. Zurab Guguchia a découvert par exemple qu'une force de traction multipliait par cinq la température de supraconductivité dans les cuprates, des supraconducteurs à haute température récompensés par le prix Nobel.





Forces extérieures

Certains matériaux ont une structure semblable à de la pâte feuilletée: leurs couches extrêmement fines présentent une épaisseur d'un atome seulement. Si l'on comprime ou étire ces couches, les matériaux développent des propriétés étonnantes: le courant circule sans résistance et le matériau devient magnétique. Dans ses expériences, Zurab Guguchia étudie des matériaux dont les propriétés peuvent être modifiées de manière ciblée par des forces extérieures.

Les résultats soulignent le potentiel qui réside dans ces déformations mécaniques. Ces travaux ont été publiés dans deux revues spécialisées renommées.

Zurab Guguchia a la vision d'un matériau qui puisse être commuté par des forces externes dans différentes phases souhaitées, voire être modulé en continu. Une espèce d'interrupteur qui passerait d'une résistance nulle (supraconductrice) à la résistance normale d'un métal. Combinés à d'autres matériaux, des produits dotés de propriétés techniques novatrices sont imaginables: par exemple, des moteurs électriques qui n'auraient pas besoin d'aimants aux terres rares.

Des paniers de bambou à l'échelle atomique

Zurab Guguchia continue à mener ses expériences avec pression hydrostatique et traction dirigée. Toutefois, dans la communauté scientifique, il est connu pour une autre grande découverte, les réseaux de Kagomé, qui lui a valu des invitations à des conférences internationales. Si l'on effectue une recherche d'images avec ce terme sur Internet, on obtient des photos de paniers japonais en bambou tressés de manière traditionnelle. Or, dans l'univers quantique, il existe des réseaux atomiques qui reproduisent ce motif: des hexagones avec des triangles collés sur chaque côté et qui sont eux-mêmes reliés à d'autres hexagones, formant une structure qui se reproduit indéfiniment.

Les scientifiques supposent depuis longtemps que ces réseaux atomiques bidimensionnels pourraient présenter un ordre de charge. Ils résultent du comportement collectif des électrons avec des courants spontanés et sans stimulation externe. Zurab Guguchia a été le premier à mettre en évidence le phénomène de manière expérimentale, dans un réseau de Kagomé fait d'atomes

de potassium, de vanadium et d'antimoine. Cette percée a été rendue possible grâce à la puissante source de muons $S\mu S$ du PSI. Un muon est une particule élémentaire chargée électriquement et deux cents fois plus lourde qu'un électron. Dans les expériences, il fait office d'instrument de mesure microscopique extrêmement sensible. On l'implante dans le réseau de Kagomé et on l'observe pendant sa désintégration. Cela fournit des informations sur le champ magnétique local et donc sur les courants spontanés qui circulent dans l'anneau composé de six atomes.

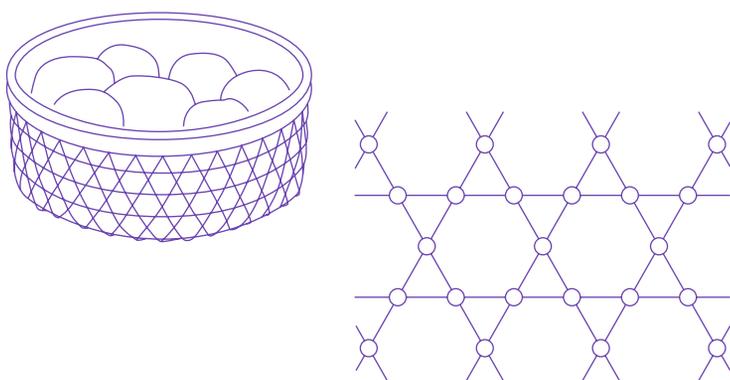
Alors qu'il faut refroidir un matériau approprié à moins 240 degrés Celsius environ pour qu'il devienne supraconducteur, cet effet se produit dans le réseau de Kagomé dès moins 190 degrés Celsius environ, c'est-à-dire à la température de l'azote liquide bon marché. Les scientifiques supposent que ces courants spontanés pourraient également exister dans les cuprates, des supraconducteurs à haute température dont il a déjà été question. L'application de l'architecture de Kagomé à ces matériaux pourrait encore augmenter leur température critique, comme l'espèrent certains.

Des supraconducteurs à température ambiante très recherchés

Cet espoir s'est renforcé au cours des derniers mois. Zurab Guguchia a découvert l'ordre de charge dans un réseau de Kagomé à des températures pouvant grimper jusqu'à 527 degrés Celsius. Cette découverte a été publiée dans la revue renommée *Advanced Materials*. Alors que la supraconductivité apparaît généralement à basse température dans le même matériau, les expériences de pression menées par Zurab Guguchia ont montré qu'elle ne suit pas les règles conventionnelles. Cela soulève une question centrale: pourrait-on supprimer l'ordre de charge à haute température? Et cela révélerait-il un état proche de la température ambiante, où le courant circule sans résistance ni refroidissement?

En tant que chercheur fondamental, Zurab Guguchia reste modeste: «Ce système quantique est très prometteur», relève-t-il. Ses implications sont audacieuses: un supraconducteur à température ambiante révolutionnerait le paysage énergétique, puisqu'il permettrait de diminuer de 40 pour cent la consommation mondiale d'énergie avec des lignes sans résistance électrique.

«Je m'intéresse principalement à la compréhension des mécanismes fondamentaux à l'origine des phénomènes quantiques inhabituels et à la manière de les optimiser, explique Zurab Guguchia. Le PSI combine de façon unique de grandes installations de recherche et des groupes de travail solides, que cela soit théoriquement ou informatiquement. C'est l'environnement idéal pour réunir recherche théorique et recherche appliquée.» ●



Des atomes dans un motif

Les réseaux de Kagomé sont un motif traditionnel de la vannerie japonaise, composé de triangles et d'hexagones. On le retrouve dans la disposition d'atomes qu'étudie Zurab Guguchia. En la mettant sous pression, il a obtenu une supraconductivité à une température record pour ce type de système. Dans le même temps, une forme inhabituelle de magnétisme est apparue. Zurab Guguchia cherche les moyens d'obtenir de tels effets à température ambiante et au-delà.

«La Suisse doit mettre les bouchées doubles dans la recherche quantique»

Heike Riel est IBM Fellow et dirige la recherche quantique du groupe en Europe, depuis Rüschlikon. Avec son équipe, cette physicienne pose les bases de futurs ordinateurs, incroyablement rapides et économes en énergie.

Vous êtes IBM Fellow, un poste prestigieux que peu de personnes atteignent au sein de l'entreprise. Quel est votre rôle?

En tant qu'IBM Fellow, je donne des impulsions pour la stratégie de l'entreprise et je suis conseillère auprès du management. Il est de ma responsabilité notamment d'identifier et de promouvoir des projets techniques innovants afin de réaliser des percées technologiques dans le domaine de l'informatique du futur. La question à laquelle nous travaillons est la suivante: quel est l'avenir de l'informatique et comment pouvons-nous encore améliorer sa puissance et son efficacité énergétique? Nous développons donc des calculateurs et des algorithmes quantiques, mais aussi de nouveaux systèmes de calcul pour l'intelligence artificielle, candidate prometteuse pour la prochaine génération de technologies informatiques.

La physique quantique fait-elle ainsi son entrée dans l'informatique?

La physique quantique est déjà appliquée depuis longtemps. C'est le cas, par exemple, des diodes tunnel, inventées en 1957, qui sont aujourd'hui des composants électroniques courants. Il existe beaucoup d'autres technologies fondées sur la physique quantique. A l'instar du laser, inventé en 1960, qui est devenu un incontournable. Dans le cadre de la deuxième révolution quantique actuelle, on tente d'atteindre le prochain niveau technologique en contrôlant les états quantiques individuels, comme la superposition et l'intrication. Nous nous intéressons tout particulièrement aux calculateurs quantiques potentiellement capables de résoudre des opérations de calcul qui restent insolubles pour des ordinateurs classiques. Dans le domaine de l'informatique quantique, de nombreux progrès ont été réalisés ces dernières années, au point que des calculateurs quantiques évolutifs et tolérants aux erreurs, dotés de 200 qubits logiques, figurent sur notre feuille de route pour 2029.



Chercheuse visionnaire et pionnière, Heike Riel développe, chez IBM, à Rüschlikon, la technologie informatique de demain.

Les ordinateurs classiques vont-ils devenir superflus?

Non. Les calculateurs quantiques n'ont pas vocation à remplacer les ordinateurs classiques, ils viennent en complément. Dans un avenir proche, nous continuerons à utiliser un ordinateur classique pour écrire nos e-mails et surfer sur Internet. Les calculateurs quantiques vont nous permettre de résoudre de nouvelles tâches, ce que je trouve fascinant. Un exemple est notre compréhension de la physique quantique proprement dite: les systèmes quantiques sont beaucoup plus faciles à calculer avec des calculateurs quantiques, car ils sont soumis aux mêmes lois physiques. Or, dans ce domaine, des progrès remarquables ont été accomplis ces dernières années. On espère atteindre un avantage quantique au cours des deux prochaines années, grâce aux synergies entre calculateurs quantiques et supercalculateurs, notamment, mais aussi grâce à la réduction des erreurs.

Une autre force des ordinateurs quantiques constitue une menace pour les méthodes de chiffrement actuelles: les ordinateurs quantiques peuvent décomposer de très grands nombres en facteurs premiers et casser les codes de chiffrement. Comment comptez-vous empêcher que cette force ne soit utilisée à des fins criminelles?

Un ordinateur classique est effectivement incapable de décomposer de très grands nombres en facteurs



Au-delà de leur proximité géographique, le PSI et le laboratoire de recherche d'IBM, sis à Rüschlikon, sont liés par une longue série de projets communs et un échange intense entre scientifiques dans les deux sens.

premiers. C'est la raison pour laquelle cela constitue la base de la technologie de chiffrement actuelle. Un ordinateur quantique tolérant aux erreurs et suffisamment grand pourrait le faire, en revanche. C'est ce qu'a démontré le mathématicien Peter Shor de manière théorique en 1994. Nous nous y préparons. Le NIST, l'agence américaine des normes, recommande trois nouveaux algorithmes de chiffrement qui, selon les connaissances actuelles, ne peuvent pas être piratés, même par les ordinateurs quantiques les plus puissants. Notre équipe, à Rüschlikon, a apporté une contribution significative à ces algorithmes.

En 2022, vous avez cosigné, avec des chercheurs renommés, une lettre ouverte soulignant la nécessité d'allouer davantage de subventions aux technologies quantiques en Suisse. Comment voyez-vous la situation actuelle de notre pays dans ce domaine?

Les technologies quantiques n'en sont qu'à leurs balbutiements, et ce dans le monde entier. Le potentiel d'innovation est énorme, tout comme la dynamique de développement. La Suisse fait face à une concurrence internationale rude. Récemment, nous avons connu une période de faiblesse, après que l'Union européenne a exclu la Suisse du financement des projets de recherche sur les technologies quantiques. Nous sommes alors devenus moins attrayants pour les jeunes chercheurs qui souhaitaient postuler à une bourse du Conseil européen de la recherche et les start-up ont émigré, principalement vers l'Allemagne, pays qui a beaucoup investi dans ce domaine. Le nombre de brevets suisses dans les technologies quantiques a diminué durant la même période. Mais la Suisse a rattrapé son retard, notamment grâce aux fonds mis en place par le PSI et l'ETH Zurich. De plus, les chercheurs suisses peuvent désormais participer de nouveau aux appels d'offres de l'UE. La position de base de la Suisse reste très bonne grâce à une forte culture d'innovation et à des entreprises bien établies dans la chaîne d'approvisionnement des technologies quantiques. Mais nous ne devons pas relâcher nos efforts!

Comment se passe la collaboration entre IBM, à Rüschlikon, et le PSI?

Le PSI plonge ses racines dans l'exploitation de grandes installations de recherche que nous autres, chercheurs chez IBM, utilisons régulièrement. Il existe par ailleurs un échange fructueux de doctorants et de postdocs. Enfin, nous collaborons très étroitement avec Kirsten Moselund, responsable du Laboratoire des technologies nanométriques et quantiques. Auparavant, cette chercheuse a travaillé pendant quatorze ans chez nous, à Rüschlikon, où elle a dirigé un important groupe de recherche dans mon département. Avec son équipe actuelle au PSI, nous collaborons sur des projets innovants qui combinent la technologie classique du silicium et la photonique, et qui exploitent de nouveaux effets physiques.

Parlez-nous, s'il vous plaît, des concepts sur lesquels vous travaillez actuellement pour les ordinateurs du futur.

Nous travaillons par exemple sur de nouvelles architectures pour l'intelligence artificielle, qui calculent avec seulement 16, 8 ou 4 bits au lieu des 64 bits actuels. Ces puces fournissent le même résultat de calcul, la même précision, mais plus rapidement et en consommant moins d'énergie. Une autre approche intéressante est la puce NorthPole d'IBM, dans laquelle les unités de mémoire et de calcul sont étroitement reliées, ce qui réduit l'énergie nécessaire au transport des données. Cette architecture, qui imite le cerveau, économise du temps et de l'énergie, surtout dans les applications de l'IA où beaucoup de données doivent sans cesse être échangées entre mémoire et logique. Mais ce n'est qu'une étape intermédiaire vers un nouveau type de processeurs analogiques, où les opérations de calcul seront directement exécutées dans la cellule de mémoire, ce qui apportera d'énormes avantages en termes d'efficacité énergétique et de vitesse. Les processeurs dotés d'un plus petit nombre de bits sont déjà intégrés dans nos produits. Concernant les processeurs en mémoire, nous disposons des premiers prototypes fonctionnels montrant qu'il est possible d'obtenir un avantage considérable en termes d'efficacité énergétique et de puissance de calcul. ●





Au-delà des technologies lithium

Au PSI, Sarbajit Banerjee dirige le Laboratoire des sciences des batteries, qui fait partie du Centre des sciences de l'énergie et de l'environnement. Il y étudie les processus fondamentaux qui se déroulent dans les différents types de batteries rechargeables. A l'aide des dernières techniques, il analyse les réactions rédox, où des électrons sont échangés entre deux partenaires de réaction pendant le stockage et la libération de l'énergie. Par sa recherche, Sarbajit Banerjee contribue au développement et à l'optimisation de nouveaux matériaux pour batteries. De la sorte, il œuvre pour un futur énergétique durable au-delà des technologies lithium.

Quotidien & recherche

Oxydation

De nombreux phénomènes quotidiens reposent sur des phénomènes qui revêtent également une importance dans la recherche. En voici un exemple: l'oxydation.

Texte: Brigitte Osterath



Quotidien

Du fer à la rouille

Pour nous, humains, l'oxygène est vital: sans ce gaz incolore et inodore, nous suffoquons. Mais l'oxygène est aussi assez agressif, ce qui signifie qu'il réagit rapidement avec d'autres substances. Ses molécules se comportent alors comme des voleuses d'électrons, arrachés à d'autres éléments, et déclenchent de nouvelles réactions chimiques. La science parle alors d'oxydation.

L'oxygène réagit particulièrement bien avec les métaux non précieux, comme le fer, notamment en présence d'eau. Il en résulte de l'hydroxyde de fer, qui se transforme ensuite en oxyde de fer. Ce qui est produit par cette réaction chimique: la rouille. De couleur brun-rouge, ce composé de fer et d'oxygène forme, sur le métal, une couche poreuse et friable qui se détache avec le temps et qui met à nu du nouveau fer, lequel réagit également avec l'oxygène. Ainsi, la destruction du matériau se poursuit continûment. Même un navire en fer, aussi grand soit-il, se décomposera et s'effritera peu à peu en raison de l'oxydation.

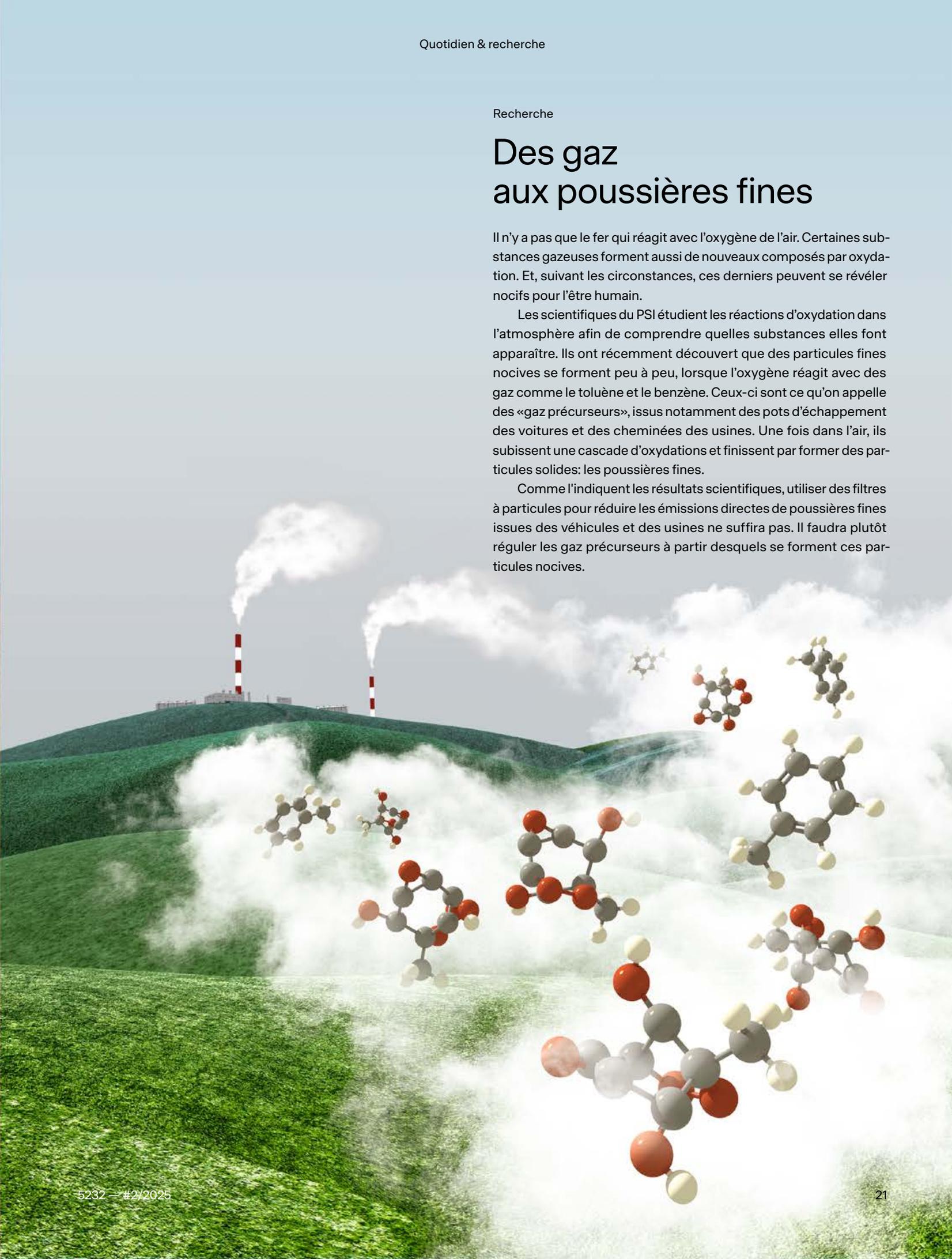
Recherche

Des gaz aux poussières fines

Il n'y a pas que le fer qui réagit avec l'oxygène de l'air. Certaines substances gazeuses forment aussi de nouveaux composés par oxydation. Et, suivant les circonstances, ces derniers peuvent se révéler nocifs pour l'être humain.

Les scientifiques du PSI étudient les réactions d'oxydation dans l'atmosphère afin de comprendre quelles substances elles font apparaître. Ils ont récemment découvert que des particules fines nocives se forment peu à peu, lorsque l'oxygène réagit avec des gaz comme le toluène et le benzène. Ceux-ci sont ce qu'on appelle des «gaz précurseurs», issus notamment des pots d'échappement des voitures et des cheminées des usines. Une fois dans l'air, ils subissent une cascade d'oxydations et finissent par former des particules solides: les poussières fines.

Comme l'indiquent les résultats scientifiques, utiliser des filtres à particules pour réduire les émissions directes de poussières fines issues des véhicules et des usines ne suffira pas. Il faudra plutôt réguler les gaz précurseurs à partir desquels se forment ces particules nocives.



Mille modules pour le CERN



Au CERN, près de Genève, de minuscules particules sont projetées les unes contre les autres aux plus hautes énergies afin d'élucider les grandes questions de l'Univers. Les détecteurs qui enregistrent ces collisions ont besoin de mises à niveau régulières. Lea Caminada et son groupe de recherche Physique des hautes énergies jouent un rôle important dans ce domaine au PSI.



Lea Caminada, cheffe du groupe de recherche Physique des hautes énergies au Centre de recherche avec neutrons et muons du PSI, et Wolfram Erdmann, chef de projet du consortium paneuropéen qui construit une part importante du futur détecteur CMS au CERN, discutent dans la cage d'escalier du Park Innovaare.

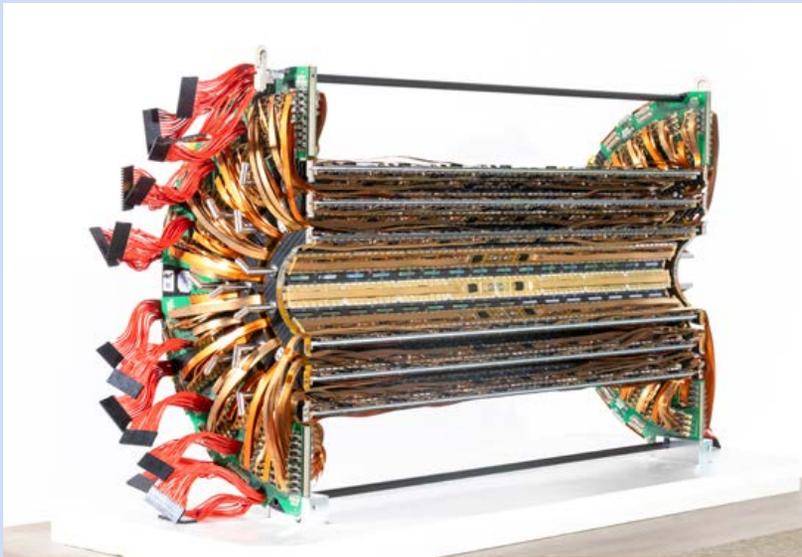
Texte: Laura Hennemann

Dans un laboratoire spacieux, situé au troisième étage d'un bâtiment qui vient d'être construit juste à côté de l'Institut Paul Scherrer, trône une moitié du détecteur qui a permis de mettre en évidence le boson de Higgs. En 2012, l'existence de cette particule élémentaire, recherchée depuis des décennies, a été confirmée expérimentalement au CERN, marquant ainsi l'histoire de la physique des particules.

Cette particule légendaire a été découverte grâce au Grand collisionneur de hadrons du CERN (Large Hadron Collider ou LHC), un accélérateur de particules souterrain d'une longueur de 27 kilomètres. Dans le tunnel du LHC, les protons sont fortement accélérés et projetés les uns contre les autres afin que l'on puisse mesurer les produits de désintégration de ces collisions explosives. Le LHC est encore utilisé pour élucider des questions de physique fondamentale sur notre Univers. Et il doit rester en phase avec son temps: «Une mise à niveau de ces gigantesques détecteurs est régulièrement nécessaire à intervalles de quelques années», explique Lea Caminada, cheffe du groupe Physique des hautes énergies au Centre de recherche avec neutrons et muons du PSI. Entre autres parce qu'au fil des ans les particules à haute énergie enregistrées par les détecteurs finissent inévitablement par endommager leur électronique.»

Pour mesurer précisément les minuscules particules, il faut des colosses: quatre gigantesques détecteurs sont en service au LHC. L'un d'eux porte le nom de Compact Muon Solenoid (CMS). Ce détecteur, constitué de couches superposées, mesure au total 15 mètres de diamètre. Lea Caminada se consacre, depuis ses débuts, à la construction du CMS ainsi qu'aux résultats expérimentaux qu'il fournit.

Le cœur du CMS, que l'on appelle le «détecteur cylindrique à pixels», a la forme d'un gâteau roulé légèrement surdimensionné: il mesure environ 50 centimètres de long et se compose de trois couches d'électronique brillante et dorée, mais aussi de beaucoup de câbles. Il a été autrefois développé et construit au PSI. Lea Caminada était déjà de la partie, à l'époque, en tant que doctorante. En 2017, ce premier détecteur cylindrique à pixels a été remplacé par son successeur à quatre couches, que le groupe de Lea Caminada avait également conçu et en partie construit. Le détecteur cylindrique d'origine, qui a



Le détecteur cylindrique à pixels d'origine de l'expérience CMS au CERN. Après sa mise hors service, la moitié de celui-ci s'est retrouvée dans le laboratoire de Lea Caminada, sis au Switzerland Innovation Park Innovaare, juste à côté de l'Institut Paul Scherrer PSI.

été coupé en deux dans le sens de la longueur, trône désormais comme pièce d'exposition dans le laboratoire de Lea Caminada, au Switzerland Innovation Park Innovaare, qui vient d'être construit à proximité immédiate du PSI.

Le CMS restera en service, dans sa configuration actuelle, jusqu'à la mi-2026. Une mise à niveau plus importante est alors prévue sur l'ensemble du LHC: le nombre de collisions de particules sera encore accru et, à cette occasion, de nombreux éléments des détecteurs seront remplacés par de nouveaux composants, technologiquement plus performants.

Des bouchons contre les angles morts

En 2030, le LHC devrait redémarrer sous l'appellation de Grand collisionneur de hadrons à haute luminosité (High-Luminosity LHC en anglais). De nombreux groupes de recherche dans le monde travaillent actuellement sur les différents nouveaux composants du CMS, qui seront intégrés pendant la phase de transformation comprise entre 2027 et 2030. Cette fois-ci, le groupe de Lea Caminada n'est pas responsable du détecteur cylindrique à pixels mais des composants en forme de disque qui seront apposés verticalement à l'avant et à l'arrière du détecteur cylindrique.

«Nous avons déjà contribué au développement de plusieurs générations de ce détecteur et connaissons toutes les étapes: de la conception des puces à l'évaluation des données, en passant par l'installation.»

Wolfram Erdmann, chercheur au Centre de recherche avec neutrons et muons du PSI

«Ces disques forment ce que nous appelons le "détecteur de bouchons du trajectographe", explique Lea Caminada. Ce sera une toute nouvelle partie du détecteur CMS. Il nous permettra de suivre les traces de particules qui se situent dans les angles morts du détecteur actuel.» Diverses désintégrations de particules, résultant des collisions proton-proton dans le LHC, sont en effet attendues dans différents angles spatiaux. Or, lorsqu'on cherche une nouvelle physique, il faut pouvoir regarder là où personne ne l'a fait auparavant.

Les 16 disques du détecteur de bouchons du trajectographe ont un diamètre de 50 centimètres et chacune de leurs faces sera équipée de modules détecteurs en silicium.

«Pour pouvoir couvrir en détail toutes ces surfaces, nous aurons besoin d'environ 2000 modules détecteurs identiques», poursuit Lea Caminada. Ceux-ci, de forme rectangulaire, sont plus petits que la paume de la main. Ce sont des composants électroniques très complexes, qui doivent être usinés avec une extrême précision pour travailler avec une très grande fiabilité. «Après la mise à niveau, l'ensemble du détecteur restera en service durant plusieurs années et nous n'aurons pas la possibilité de procéder à des aménagements ou à de petites réparations», précise la physicienne. Un peu comme avec une sonde que l'on envoie dans l'espace: pendant la phase d'exploitation, on perd tout accès physique aux composants. Et la moindre probabilité d'erreur que l'on accepterait pour un composant individuel se trouve multipliée par deux mille – en fonction du grand nombre de modules – pour l'ensemble du détecteur.

Deux ans pour produire les modules

Amrutha Samalan insère avec précaution, l'un après l'autre, les modules dans les logements parfaitement adaptés d'une boîte blanche câblée. «Au cours des dernières années, nous avons étudié et testé différents prototypes de modules afin de signaler constamment à leurs concepteurs les problèmes restants, certes improbables, mais pertinents en raison du nombre élevé d'unités», explique cette postdoctorante qui travaille depuis bientôt deux ans dans le groupe de Lea Caminada. Entre-temps, la phase de conception s'est terminée et la préproduction est en cours.

Par *préproduction*, on entend ceci: sur un petit nombre de modules, les scientifiques testent si chaque étape de fabrication fonctionne et si le résultat correspond précisément aux attentes. Durant cette phase, ils évaluent également le temps nécessaire aux étapes de production afin de pouvoir tout mettre à l'échelle ultérieurement. Sur les quelque 2000 modules nécessaires, près de la moitié sera assemblée au PSI, pendant la phase de production proprement dite. Les modules restants seront produits par les autres membres d'un consortium paneuropéen, conformément au concept développé au PSI. Tous ensemble, ils auront deux ans pour fabriquer les 2000 modules.

«Ce matin, j'ai fait le câblage par fils de certains modules sur cette machine», explique Amrutha Samalan en désignant une sorte de caisson de la taille d'un homme qui se dresse au milieu du laboratoire. «Elle enregistre nos connexions électroniques programmées sur le module, un peu de la même manière qu'une machine à coudre travaille avec des fils.»

Vient ensuite l'examen visuel minutieux de chaque module en gros plan à l'écran afin de détecter d'éventuels défauts.

Puis un groupe de huit modules est placé dans ce qu'on appelle une «*cold box*» (boîte froide), la caisse blanche qu'Amrutha Samalan est en train d'équiper. «Nous procédons là à une part importante du contrôle qualité, explique la chercheuse. Nous pouvons contrôler précisément la température et l'humidité à l'intérieur de la caisse et tester pendant ce temps si les capteurs, les puces de lecture et les pixels sont tous exempts de défauts.» Dans cette boîte froide, les scientifiques réalisent également le calibrage de tous les détecteurs à pixels et de leurs canaux. Chacun des modules compte plus d'un demi-million de pixels. Avec une résolution spatiale de seulement 10 × 15 micromètres, ils pourront précisément suivre les trajectoires des particules dans le détecteur CMS.

Planifier la génération suivante

Un étage plus haut, dans le même bâtiment, Wolfram Erdmann vient d'avoir une discussion avec quelques-uns de ses collègues. Il est collaborateur dans le groupe de Lea Caminada et dirige le projet de conception, de planification et de construction du détecteur de bouchons du trajectographe. «Après la mise à niveau, en termes de surface, ce sera la plus grande partie du détecteur à pixels CMS», dit-il non sans fierté.

Wolfram Erdmann est en contact avec les autres groupes de recherche du consortium, rattachés aux universités de Zurich, de Hambourg en Allemagne, de Helsinki en Finlande, de Santander en Espagne, de Vilnius en Lituanie et de Zagreb en Croatie. «Ici, au PSI, nous développons beaucoup de composants et de

nombreux processus qui seront ensuite dupliqués sur d'autres sites», explique Wolfram Erdmann. A l'instar des boîtes froides, par exemple.

Le PSI est membre de l'expérience CMS depuis 1998. «C'est un engagement important, qui nécessite des connaissances spécialisées exceptionnelles», relève Lea Caminada. Pour son domaine, la physique des particules, le LHC est essentiel: il s'agit du plus grand et du plus puissant accélérateur du monde, dont la proximité géographique est bienvenue. «Pour nous, le fait que la Suisse soit le pays hôte du CERN est vraiment pratique», note Wolfram Erdmann.

Le groupe de recherche emmené par Lea Caminada participe également à l'évaluation des données fournies par le détecteur CMS. «Nous avons déjà contribué au développement de plusieurs générations de ce détecteur et nous connaissons toutes les étapes de la chaîne: de la conception des puces électroniques à l'évaluation des données, en passant par l'installation, souligne Wolfram Erdmann. C'est tout à fait exceptionnel parmi les institutions impliquées.»

Les données du détecteur de bouchons du trajectographe, dont la production a commencé, devraient être analysées au début des années 2030. En physique des particules, la planification s'étire sur de longues périodes. De ce fait, certains chercheurs réfléchissent déjà à la prochaine mise à niveau. «J'en parlais justement avec mes collègues tout à l'heure», sourit Wolfram Erdmann. Les scientifiques prévoient d'investir principalement dans la résolution temporelle du détecteur.

Pour ce physicien, il n'est pas inhabituel de recevoir dès maintenant des ressources pour mener à bien ces réflexions. Ses nombreuses années d'expérience lui ont notamment enseigné ceci: «Réfléchir est relativement facile. C'est lorsqu'il s'agit de construire que les choses deviennent complexes.» ●



Amrutha Samalan place une série de modules détecteurs dans la boîte froide, où se déroule une part importante du contrôle qualité.

Actualité de la recherche au PSI

1 Au plus près du noyau atomique

1,97007 femtomètre (milliardième de mètre): c'est la taille du rayon du noyau atomique de l'hélium-3, résultat précis d'une expérience menée au PSI. Pour cela, les scientifiques ont transformé un atome d'hélium-3: ils ont remplacé les deux électrons qui gravitent autour de son noyau par une particule élémentaire appelée «muon». Environ 200 fois plus lourd, ce muon se rapproche nettement plus du noyau et les fonctions d'onde se chevauchent davantage. Cela fait de lui une sonde idéale pour mesurer le noyau et son rayon de charge.

Un système laser, développé directement par les scientifiques, a joué un rôle décisif dans le succès de l'expérience. Si la fréquence du laser correspond exactement à la résonance d'une transition atomique donnée, le muon est brièvement placé dans un état d'énergie plus élevé, avant de revenir à son état fondamental en quelques picosecondes. A ce moment-là, il émet un photon sous la forme d'une lumière de type rayons X. Cette réaction physique mesurable a permis aux scientifiques de déterminer la fréquence de résonance et d'en déduire précisément le rayon de charge.

C'est à la source de muons du PSI, grande installation unique au monde, que cette expérience a été rendue possible. Elle pose de nouveaux jalons en physique nucléaire.

Informations supplémentaires:
<http://bit.ly/45W0U7T>



2 Détecter les perturbations génétiques

Dans la médecine moderne, on s'attache de plus en plus à la détection précoce des gènes impliqués dans les maladies afin de les influencer. Dans le cas de pathologies complexes – comme le cancer, la maladie d'Alzheimer ou les inflammations chroniques –, il ne suffit pas de considérer les gènes isolément: la manière dont ils interagissent dans le réseau cellulaire constitue un aspect décisif. A cet égard, l'organisation tridimensionnelle de l'ADN dans le noyau cellulaire – appelée chromatine – joue un rôle-clé.

Les scientifiques du PSI viennent de développer une intelligence artificielle, baptisée Image2Reg, qui identifie directement les perturbations génétiques dans les images microscopiques de cellules. Cette IA analyse les modifications subtiles intervenues dans la chromatine, telles qu'elles apparaissent après une coloration Hoechst, et les associe avec des données sur l'activité des gènes. Il en résulte un réseau spécifique au type de cellule qui montre comment les gènes interagissent. Dans les tests, Image2Reg a identifié les modifications génétiques avec une précision de 26%, soit un score bien supérieur à celui de l'aléatoire, qui est de 2%. A l'avenir, cette méthode pourrait devenir un complément rapide et peu coûteux aux analyses d'expression génique classiques.

Informations supplémentaires:
<http://bit.ly/4IHuPXf>



3 Rayonnement précis contre le lymphome

Chaque année, en Suisse, près de 2000 personnes développent un lymphome et environ 570 personnes décèdent de cette maladie. Au Centre des sciences radiopharmaceutiques du PSI, les scientifiques viennent de mettre au point un traitement innovant, qui pourrait donner de l'espoir: une radio-immunothérapie avec le terbium-161, un nucléide.

Le principe consiste à coupler le terbium-161 radioactif à un anticorps qui s'arrime de manière ciblée aux cellules tumorales. Une fois injecté dans le corps du patient, il achemine le rayonnement directement aux cellules cancéreuses, tout en ménageant les tissus sains.

Comparé au lutécium-177 utilisé jusque-là, le terbium-161 a un avantage décisif: il n'émet pas seulement des particules bêta qui se diffusent sur plusieurs millimètres dans les tissus, mais aussi des électrons Auger d'une portée de moins d'un micromètre, échelle idéale pour éliminer de manière ciblée des cellules cancéreuses isolées et de petits clusters de cellules. Suivant leur type, le terbium-161 s'est révélé jusqu'à 43 fois plus efficace que le lutécium-177 lors des tests en laboratoire.

Actuellement, les scientifiques préparent des essais cliniques en vue de créer une nouvelle arme de précision contre les lymphomes difficiles à traiter.

Informations supplémentaires:
<http://bit.ly/4g31e9u>



4 Un livre de recettes par IA pour un ciment respectueux du climat

Le ciment est ce qui fait tenir notre monde moderne. Mélangée à du sable, du gravier et de l'eau, cette poudre commune devient du béton: un matériau que l'on peut transporter facilement et qui peut être coulé pour adopter presque toutes les formes imaginables. On s'en sert pour construire des bâtiments, des ponts et des tunnels, pour franchir montagnes et vallées, mais pas seulement: même nos communications passent par des câbles souterrains posés dans des gaines de protection en béton. Multifonction et résistant, ce matériau est indispensable à notre infrastructure.

Néanmoins, la production de ciment laisse une gigantesque empreinte carbone: elle est responsable d'environ 8% des émissions mondiales. C'est plus que l'ensemble du trafic aérien. La transformation chimique du calcaire en clinker – le composant central du ciment – en est le principal responsable. Le CO₂, lié chimiquement dans le calcaire, est libéré au cours de cette réaction.

Les scientifiques du PSI viennent de mettre au point un modèle fondé sur l'intelligence artificielle (IA) qui permet de découvrir plus rapidement de nouvelles formulations de ciment, avec la même qualité de matériau et un bilan carbone nettement plus faible. Ce modèle fournit des propositions ciblées pour les formulations les plus prometteuses, testées ensuite en laboratoire. Comme un livre de recettes numérique pour un ciment respectueux du climat.

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



Environ **1,5** kilogramme de ciment par personne et par jour. Notre consommation de ciment est gigantesque.

1000 fois plus rapide que la modélisation classique: l'IA du PSI calcule les propriétés du ciment en quelques heures et non plus en quelques mois.

Environ **8** pour cent des émissions de CO₂ sont dues à l'industrie du ciment. Soit plus que l'ensemble du trafic aérien mondial.

Le PSI comme une ville

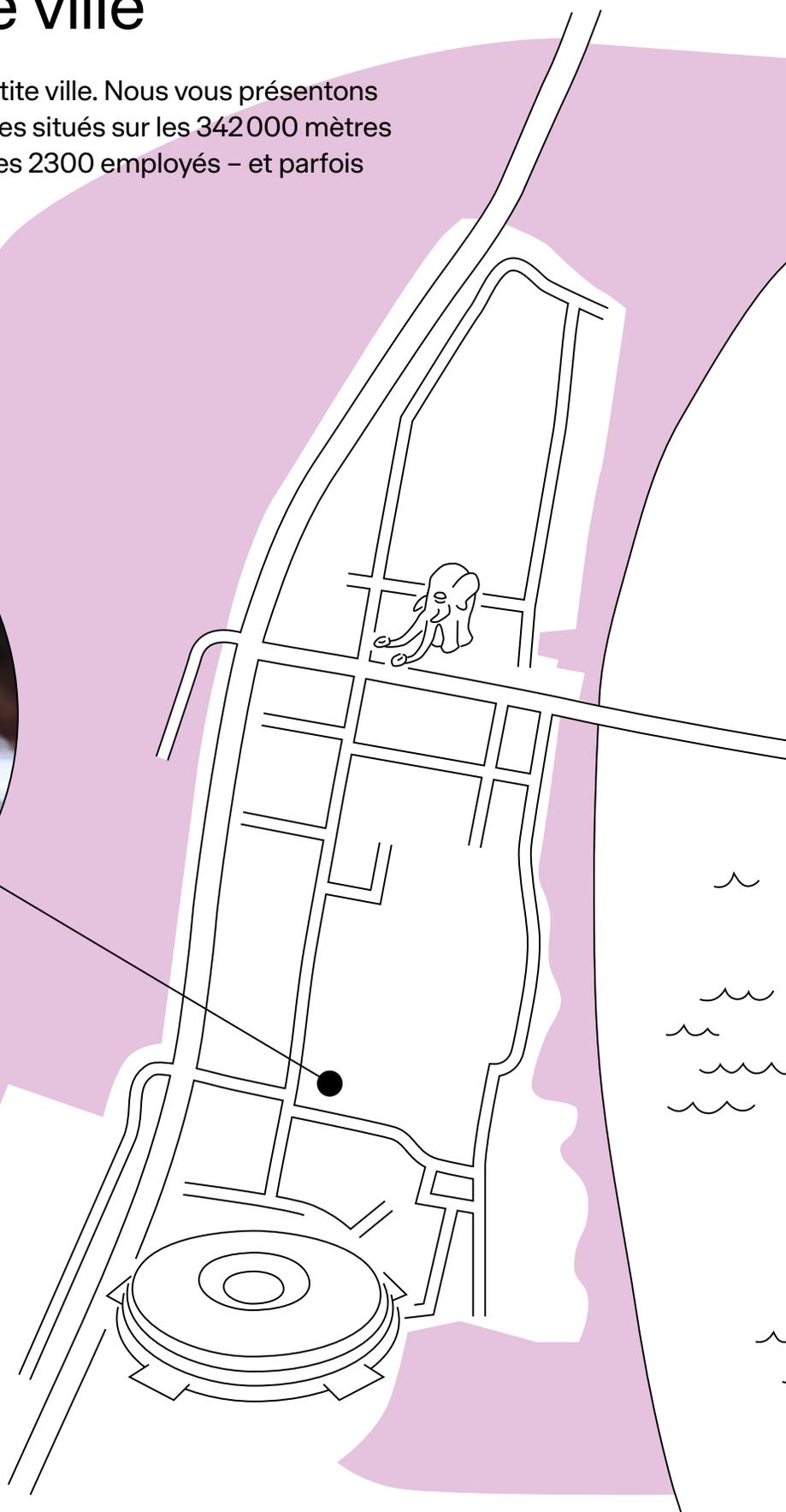
A bien y regarder, le PSI ressemble à une petite ville. Nous vous présentons une sélection de onze installations et services situés sur les 342000 mètres carrés de l'institut. Ils sont à la disposition des 2300 employés – et parfois même bien au-delà.

Texte: Christian Heid



L'hôpital

Barbara Bachtiary est médecin au Centre de protonthérapie (CPT). La protonthérapie est une forme précise et très complexe de radiothérapie, utilisée dans le cadre du traitement ambulatoire du cancer. Des patients de toute la Suisse sont adressés au CPT. Chez l'enfant, ce traitement constitue la référence en radiothérapie. Chez l'adulte, il est appliqué lorsque le patient est atteint de tumeurs situées dans les zones sensibles de l'organisme: par exemple, au cerveau, dans la région de la tête et du cou ou encore à proximité des nerfs.





Les pompiers

Sasha Alexandra Diaz est laborantine en chimie au PSI et, parallèlement, elle est volontaire dans le corps des pompiers du PSI, avec 90 autres collaboratrices et collaborateurs issus de toutes les divisions de l'institut. Ce corps est principalement chargé du sauvetage des personnes et de la lutte contre les incendies. Il travaille en étroite collaboration avec les pompiers de Würenlingen et du Geissberg, qui combattent les incendies dans les environs. Poste cantonal de défense contre les radiations, il vient en aide aux pompiers locaux de tout le canton lors d'urgences impliquant des substances radioactives.



Le maire

Tel celui d'un maire, l'agenda de Christian Rüegg, directeur du PSI, ne désemplit pas. Réunions, interviews, allocutions, réceptions, se succèdent parfois jusque dans la soirée et le week-end. Soutenu par son secrétariat, l'équipe de direction, les responsables des centres de recherche et la commission de recherche, il s'acquitte parfaitement de la mission, cruciale pour l'avènement d'une recherche de pointe dans les sciences naturelles et de l'ingénieur. Il s'engage pour que la Suisse tienne une place importante dans le paysage international de la recherche et pour que le PSI, en collaboration avec l'ensemble du domaine des EPF, tire le meilleur parti de la Suisse.

L'hôtel

Le PSI a sa propre maison d'hôtes. Rolf Pederiva y travaille à la réception. Soixante-quatre chambres réparties sur trois étages sont disponibles, notamment pour les scientifiques invités, issus du monde entier, qui viennent mener des expériences aux cinq grandes installations de recherche du PSI. Chaque année, l'équipe de service accueille plus de 2200 hôtes. La maison d'hôtes est située à côté du petit biotope, au bord de l'Aar, et offre, en plus des chambres, une cuisine commune, une buanderie, une salle de séjour et une terrasse extérieure.



L'atelier

Karin Zehnder a fait son apprentissage de polymécanicienne au PSI. Aujourd'hui, elle travaille comme ingénieure civile et cheffe de projet pour la section Refroidissement des procédés au sein de l'atelier de construction de tuyauteries. En plus d'un atelier électrique, d'un atelier de plomberie, d'un atelier de construction métallique et d'un atelier de formation, le PSI exploite un atelier dans le Park Innovaare voisin. Diverses technologies y sont utilisées, qui vont des procédés d'assemblage spécialisés à l'usinage traditionnel par enlèvement de copeaux.



La blanchisserie

Senta Schneider et ses trois collègues traitent, chaque année, 73 tonnes de linge à la blanchisserie du PSI. L'équipe gère également la réserve de vêtements et de chaussures, où les collaborateurs du PSI peuvent aller chercher les tenues de protection dont ils ont besoin. À la blanchisserie, les vêtements sont ajustés, entretenus et réparés de manière professionnelle. De telle sorte que les employés ont accès à tout moment à des vêtements de travail propres, fonctionnels et sûrs.



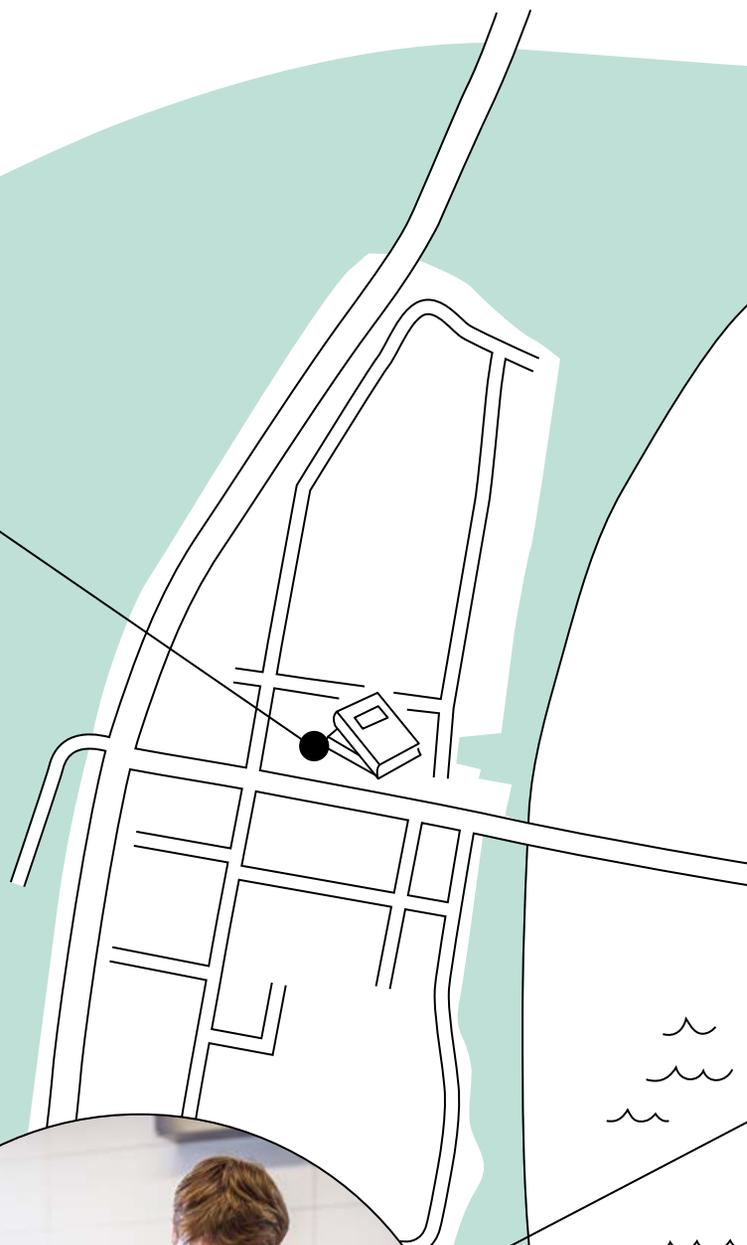
La garderie

Lino Bärtschi tend des cubes en bois aux tout-petits, leur lit des histoires, change leurs couches, les nourrit et les console. Stagiaire à la crèche Nanolino, il fait partie de l'équipe qui s'occupe de quelque 120 enfants, répartis en six groupes. La crèche du PSI accueille les nourrissons dès l'âge de 3 mois. Ce service est principalement utilisé par les parents qui travaillent au PSI, mais aussi par les familles des environs. Le nouveau bâtiment moderne a ouvert ses portes à l'été 2025. Dans son jardin ludique, les petits peuvent se défouler grâce à un circuit de Bobby Car, un circuit à billes, un bac à sable et une pompe à eau. Les promenades dans la forêt voisine de Würenlingen font également partie du quotidien des enfants.



La bibliothèque

Les livres jouent un rôle important pour Stephanie Hofmann et l'équipe de la bibliothèque Lib4RI. Mais aujourd'hui, sa collection de référence ne représente plus qu'une partie de l'offre, l'accès aux médias numériques étant plus important. Une petite salle de lecture est à disposition pour travailler en toute tranquillité. La bibliothèque accompagne les chercheurs du PSI dans leurs recherches bibliographiques et les soutient lors de la publication de leurs résultats. Le large éventail de formations couvre des thématiques telles que la gestion professionnelle des données de recherche, le droit d'auteur et le libre accès (*open access*).



Le restaurant

Préparer des mets chauds et froids et les présenter fait partie du quotidien de Remy Bonetta. Cet apprenti est l'un des 40 employés de l'Oase, le restaurant du personnel du PSI, et de la cafétéria attenante. A l'heure du déjeuner, entre 11 h 30 et 13 h 30, les employés et les visiteurs du PSI se voient proposer le menu du jour et un buffet. Les services de restauration du PSI comprennent une autre cafétéria dans la zone est du site ainsi que le restaurant Culinaare et son coffee shop, sur la rive ouest de l'Aar, dans le Park Innovaare.





Le musée

Le PSI présente également au public son propre musée, dont l'entrée est gratuite: le PSI Visitor Center. C'est ici que Grégoire Saerens et ses collègues accueillent les visiteurs du lundi au vendredi et le dimanche, de 13 à 17 heures. Les 13 pièces d'exposition interactives permettent d'approfondir les différentes thématiques de recherche du PSI. En s'inscrivant à l'avance, il est également possible de réserver une visite guidée gratuite du site et de découvrir l'une ou l'autre des installations de recherche. Une expérience particulière est proposée aux classes d'école: sur inscription de leur enseignant, elles peuvent passer une journée au PSI iLab, le labo des élèves, et y conduire leurs propres expériences sous supervision. Environ 200 classes en profitent chaque année.

Le studio de fitness

Etirements latéraux, posture du pont, abdominaux... Reto Fortunati est ingénieur au Centre de technologie des accélérateurs du PSI, mais donne des cours de Pilates dans la salle de sport du campus, pendant la pause de midi. Ceux-ci sont accessibles aux 750 membres du club sportif du PSI, qui propose également du badminton, du football, de l'escalade, de la danse, du yoga et bien d'autres activités. Le groupe de course à pied profite des vastes forêts des environs. D'autres se retrouvent pour nager dans l'Aar, même en hiver, pour les plus courageux.



Où l'analyse rencontre les arômes

Certains considèrent le brassage de la bière comme un art, d'autres comme une science. Dans sa brasserie, Luc Van Loon allie les deux vertus: il a le nez d'un sommelier et la précision d'un chimiste. Cet ancien chercheur du PSI crée des bières qui rivalisent avec les meilleures du monde.

Texte: Benjamin A. Senn

L'entrée de la brasserie est discrète, sise au cœur du quartier résidentiel de la commune de Neuenhof, dans le canton d'Argovie. De majestueuses maisons à colombages et de chantantes fontaines de village font oublier le grondement tout proche de l'autoroute. C'est ici que se trouve la brasserie Chen Van Loon, dans une ancienne cave à vin. Et c'est ici également qu'est fabriquée la Sauvignon Ale, la troisième meilleure bière du monde en 2024, selon le jury de la Finest Beer Selection, concours international renommé.

Petit mais remarquable, en somme: «Nous sommes une microbrasserie», explique Luc Van Loon, maître-brasseur et ancien chimiste au PSI. Dix bières différentes sont produites ici, avec une capacité maximale de 32 000 litres par an. «Feldschlösschen produit la même quantité en une heure», relève-t-il avec un clin d'œil à la brasserie la plus grande et la plus connue de Suisse. «Nous ne jouons définitivement pas dans la même catégorie, relève-t-il. Nous mettons l'accent sur la diversité artisanale et les styles de brassage créatifs. Et c'est précisément ce qui a convaincu le jury.»

Mais comment ce chimiste est-il devenu maître-brasseur? Evidemment, le brassage peut se mettre en formules, car tout cela, c'est de la chimie. Pourtant, Luc Van Loon n'est pas arrivé à la bière par la science mais par le vin.

Chimiste, vigneron, puis maître-brasseur

En 2005, Luc Van Loon a loué un vignoble de douze ares et s'est mis à vinifier pendant son temps libre, dans la cave du domaine viticole Zum Sternen, à Würenlingen. A l'époque, ce Belge d'origine travaillait depuis près de vingt ans au PSI, tout près de son vignoble. Au départ, il avait sollicité un emploi à la Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs (Nagra). Mais comme aucun poste n'y était vacant, son dossier avait été directement transmis au PSI. La suite, il la résume en ces termes: un appel du PSI et un entretien d'embauche d'une journée sur place, puis un aimable «Vous pouvez commencer».

Et c'est ainsi que, le 2 novembre 1988, les Van Loon et leurs deux fils ont déménagé de Merksplas, en

Belgique, à Kleindöttingen, en Suisse. Luc Van Loon avait précédemment obtenu son doctorat en radioécologie à la faculté d'agronomie de l'Université de Louvain. Le sujet de sa thèse de doctorat portait sur le comportement du technétium-99 dans les produits agricoles. Ce radionucléide à longue durée de vie est un vestige des essais nucléaires des années 1960. De ses études, il rapportait déjà une sensibilité particulière pour les sols, l'agriculture et les influences humaines.

Pendant son temps libre, Luc Van Loon s'occupait de ses vignes, vendangeait à l'automne, pressait ses raisins et faisait fermenter leur jus. De manière concomitante, il travaillait au PSI en tant que géochimiste et officiait comme chef du groupe de recherche sur les processus de diffusion, ce qui l'amena à examiner des substances tout à fait différentes. «Nous cherchions à comprendre comment les matériaux radioactifs se comportent dans différentes substances: par exemple, la manière dont les radionucléides migrent à travers l'argile à Opalinus et les interactions qui s'y produisent», raconte Luc Van Loon.

L'argile à Opalinus est une roche argileuse fine, apparue il y a environ 173 millions d'années, à partir de dépôts de sédiments sur les fonds marins. Aujourd'hui, elle se trouve à plusieurs centaines de mètres sous la surface terrestre et présente un intérêt pour le stockage des déchets radioactifs dans les dépôts en couches profondes, car elle peut y servir de barrière naturelle. «Nos études ont contribué à une meilleure compréhension des propriétés barrière de cette roche», résume Luc Van Loon.

Les expériences étaient conduites au Laboratoire chaud, une installation d'analyse de matériaux et de substances hautement radioactives unique en son genre. Ce laboratoire n'est accessible que par des sas de sécurité. Il est entouré d'épais murs de béton. Le port de la blouse de laboratoire y est obligatoire, l'air frais une denrée rare. «Le travail physique dans les vignes apportait donc un équilibre bienvenu», note Luc Van Loon.

Ce même travail faisait parfois transpirer et donnait soif. «*You have to drink a lot of beer to make a good wine*», plaisantait Christopher Chen, en commentant le dur labeur au vignoble. A l'époque, cet Australien travaillait comme œnologue au vignoble Zum Sternen. En matière de bière, il avait trouvé, en la personne du vigneron amateur Luc Van Loon, un homme qui partageait les mêmes





Beer for beginners ou la recette de base:

- Mélanger le malt et l'eau, et chauffer à 65°C. Cette étape produit du sucre.
- Filtrer le moût ainsi obtenu et le chauffer à environ 98°C (pour le stériliser).
- Ajouter le houblon pour l'arôme et l'amertume.
- Placer en cuve de fermentation avec de la levure, pour dix jours environ. Cette étape produit de l'alcool et du gaz carbonique.
- Refroidir la bière jeune à 10°C et la mettre en bouteille.
- Pour du gaz carbonique naturel, ajouter un peu de levure et de sucre, et attendre la fermentation en bouteille.



«Nous sommes une vraie entreprise familiale. Et c'est bien ainsi.»

Luc Van Loon, maître-brasseur

idées: après tout, en tant que Belge, ce dernier était originaire d'une nation de véritables amateurs de bière. C'est ainsi qu'en 2013 les deux amis, uniquement animés par le goût de l'expérimentation, ont commencé à brasser leur bière dans une vieille marmite de la cave à vin.

Comme ils n'avaient rien pour embouteiller leur bière, ils ont dû recycler d'anciennes bouteilles de champagne de la cave. Et c'est ainsi, un peu par hasard, que la forme de bouteille caractéristique de leur marque de bière s'est imposée. Ils n'ont pas tardé à investir dans une installation de 200 litres. Mais la production de bière entrainait de plus en plus en conflit avec celle du vin, si bien qu'ils ont fini par déménager à Neuenhof, dans une autre vieille cave à vin, en 2015.

La science du brassage

La bière ne contient que quatre ingrédients: de l'eau, du malt, de la levure et du houblon. Et, pourtant, la variété gustative susceptible d'émerger de ce mélange est pratiquement infinie. «Il existe plus de cinquante sortes de malt et quelque deux cents sortes de houblon, relève Luc Van Loon. Sans compter les innombrables souches de levure.» A cela viennent s'ajouter les paramètres extérieurs, comme la température, la durée de fermentation ou encore le stockage, qui marquent le caractère de la bière. «Tout cela, à mes yeux, rend la bière bien plus passionnante que le vin», souligne-t-il.

Dans l'une des grandes cuves de fermentation en acier inoxydable, Luc Van Loon prélève un verre plein d'un liquide ambré et doré et l'emporte dans son laboratoire mobile. Armé d'une pipette et de divers instruments, il s'attelle à l'analyse. Ne manquent plus que la blouse de laboratoire et les gants et l'on se croirait presque de retour au Laboratoire chaud du PSI, loin de la brasserie.

La goutte provenant de la pipette se retrouve dans le réfractomètre. Cet appareil ressemble un peu à un télescope, mais, au lieu de regarder dans le lointain, on s'en sert pour scruter l'intérieur d'un liquide. En fonction de la densité de la bière, la lumière incidente est réfractée selon un angle différent, ce qui permet de déterminer le taux de sucre. Or, ce même taux révèle à son tour où en est la fermentation, autrement dit la part de sucre déjà convertie en alcool. Luc van Loon dispose aussi d'électrodes de pH et d'un appareil à infrarouge pour mesurer le taux effectif d'alcool. «Ce qui me manque encore, c'est un appareil pour déterminer l'amertume et la couleur de la bière, dit-il. Avec ça, j'aurai un laboratoire complet.»

Lorsque Luc Van Loon décrit ses méthodes d'analyse, ce n'est pas uniquement le maître-brasseur passionné qui parle, mais le scientifique expérimenté qui s'y connaît en matière de contrôle qualité. Au PSI, en effet, Luc Van Loon était responsable de la gestion qualité du laboratoire Sûreté des dépôts de déchets radioactifs. «A la brasserie, les choses ne sont pas différentes, explique notre maître-brasseur. Ici aussi, nous consignons nos processus et nous vérifions la qualité de nos produits. Après tout, la bière doit toujours avoir le même bon goût, avec une couleur, une teneur en alcool et un caractère constants.»

De la blague à l'entreprise familiale

Cela fait plus de dix ans que Luc Van Loon brasse de la bière et, depuis sa retraite en 2024, son activité ne se limite plus aux week-ends. Son ancien partenaire, Christopher Chen, a entre-temps quitté l'entreprise et est rentré en Australie. Mais le fils de Luc Van Loon, Jan, a pris sa place à temps complet. «Je suis très fier qu'il ait osé franchir le pas vers le travail en indépendant», souligne Luc Van Loon. Le reste de la famille s'active également à bord. La compagne de Jan gère le graphisme et le marketing, tandis qu'Anita, l'épouse de Luc Van Loon, s'occupe de la comptabilité. «Nous sommes une vraie entreprise familiale, dit-il. Et c'est bien ainsi.»

Avec un étudiant en bachelor de la Haute Ecole des sciences appliquées de Zurich (ZHAW), Luc Van Loon étudie actuellement le potentiel de certaines levures à vin capables de libérer dans la bière des substances aromatiques de manière ciblée. «Nous ajoutons un trait de jus de raisin de notre propre vignoble à notre Sauvignon Ale, la bière distinguée l'an dernier, explique Luc Van Loon. Notre Vigneron – Cuvée du patron, une autre bière primée, a également un goût de raisin, mais elle ne contient aucun fruit. Ce goût est uniquement dû à la levure. La diversité microbiologique de celle-ci recèle un énorme potentiel pour de nouveaux styles de bières.»

À l'arrivée de la retraite, la joie d'expérimenter et le plaisir de mener des travaux scientifiques n'ont pas quitté Luc Van Loon. Et ses créations continuent de rencontrer un vif succès: à la Finest Beer Selection de cette année, deux bières de Chen Van Loon ont obtenu le score impressionnant de 95 points sur 100. Une preuve de plus que l'art et la science s'harmonisent parfaitement dans un verre. ●

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



Comment vivrons-nous dans le futur? Quelles technologies utiliserons-nous? Comment assurerons-nous notre approvisionnement énergétique? Comment allons-nous surmonter la crise climatique? Comment ferons-nous avancer la santé?

Avec ses 2300 collaborateurs et un budget annuel de 450 millions de francs suisses, le PSI est le plus grand institut de recherche de Suisse pour les sciences naturelles et de l'ingénieur. En tant que membre du Domaine des EPF, c'est un pilier essentiel du paysage suisse de la recherche. Le PSI mène de la recherche de pointe dans les domaines suivants: Technologies d'avenir, Energie et climat, Innovation santé et Fondements de la nature. Ce faisant, il œuvre au service de la société, de l'économie et de la politique suisses.

Cinq grandes installations de recherche uniques au monde

Sur le site du PSI sont réunies les grandes installations de recherche suisses. Celles-ci sont à la disposition de

la science comme de l'industrie. Près de 3000 chercheurs invités, venus de Suisse et du monde entier, utilisent chaque année les cinq grandes installations de recherche du PSI. Fondées sur des accélérateurs de particules, elles sont uniques au monde dans une telle combinaison: la Source de Lumière Suisse SLS, le laser à rayons X à électrons libres SwissFEL, la source suisse de muons S μ S, la source suisse de neutrons à spallation SINQ et l'Infrastructure de recherche suisse pour la physique des particules CHRISP.

Un moteur d'innovation

Le PSI est un employeur important de la région. Près d'un quart de ses collaborateurs sont des postdocs, des doctorants ou des apprentis. Ce faisant, le PSI produit des spécialistes hautement qualifiés pour les secteurs scientifique et économique. Il renforce la capacité d'innovation de la place économique suisse. En créant des spin-off, le PSI transfère ses dernières découvertes scientifiques directement dans l'économie.

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

Paraît deux fois par an.
Numéro #2/2025 (septembre 2025)
ISSN 2674-1261

Editeur

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

Rédaction

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

Traduction

Catherine Riva

Correction

Étienne Diemert

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

Studio HübnerBraun

Concept de design

Scholtysik & Partner AG

Photos

Institut Paul Scherrer PSI/Markus
Fischer, sauf: pages 26–27: unsplash/
Jonny James; page 28: Scanderbeg Sauer
Photography; pages 29 dessus/
33 dessous: Institut Paul Scherrer PSI/
Mahir Dzambegovic.

Infographies

Studio HübnerBraun, sauf:
pages 20–21: Daniela Leitner,
page 39: Adobe Stock/Garry Killian.

Pour en savoir plus sur le PSI

www.psi.ch

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

www.psi.ch/de/5232
www.psi.ch/en/5232

**5232 est disponible sur
abonnement gratuit**

www.psi.ch/fr/5232



Dans le prochain numéro: la recherche pour bien vieillir

Notre espérance de vie s'allonge grâce aux progrès scientifiques et médicaux et, avec elle, nos chances de rester longtemps en bonne santé s'accroissent. Dans ce sens, nous sommes plus attentifs à notre alimentation, nous nous motivons pour faire du sport et réduire ainsi le stress. Dans quelle mesure la recherche peut-elle favoriser une meilleure qualité de vie à un âge avancé? Quelles sont les nouvelles approches dans le diagnostic et le traitement du cancer, l'une des maladies les plus couramment liées au vieillissement? A quoi ressemblera la médecine personnalisée du futur? Que savons-nous de la structure précise et du fonctionnement du cerveau? Et où faire porter les efforts de la recherche fondamentale d'aujourd'hui afin de rendre possibles demain de meilleurs diagnostics et traitements des maladies neurodégénératives?

Dans son prochain numéro, 5232 vous entraîne au cœur de la recherche actuelle et esquisse les pistes à venir du vieillissement en bonne santé.

5232 – l'adresse de la recherche

L'Institut Paul Scherrer PSI est le plus grand institut de recherche de Suisse pour les sciences naturelles et de l'ingénieur. 5232 est le numéro postal de l'institut et le titre du magazine du PSI. Dans chaque livraison, nous racontons des histoires tirées de l'activité scientifique du PSI, nous évoquons ceux qui y travaillent et nous montrons comment la recherche façonne le progrès.



5232 Villigen PSI



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