

5
2
3
2

#2/2024



Le magazine de l'Institut Paul Scherrer PSI

Voler sans nuire au climat, est-ce possible?

Dossier: Voler sans nuire au climat, est-ce possible?



Toile de fond

Une promesse complexe

Une aviation climatiquement neutre n'implique pas seulement de réduire les émissions des vols. Une étude du PSI analyse ce qui sera nécessaire pour atteindre cet objectif à long terme.

Page 8

Interview

Des investissements massifs

Emanuel Fleuti, responsable Développement durable et environnement de Flughafen Zürich AG, évoque l'aviation durable.

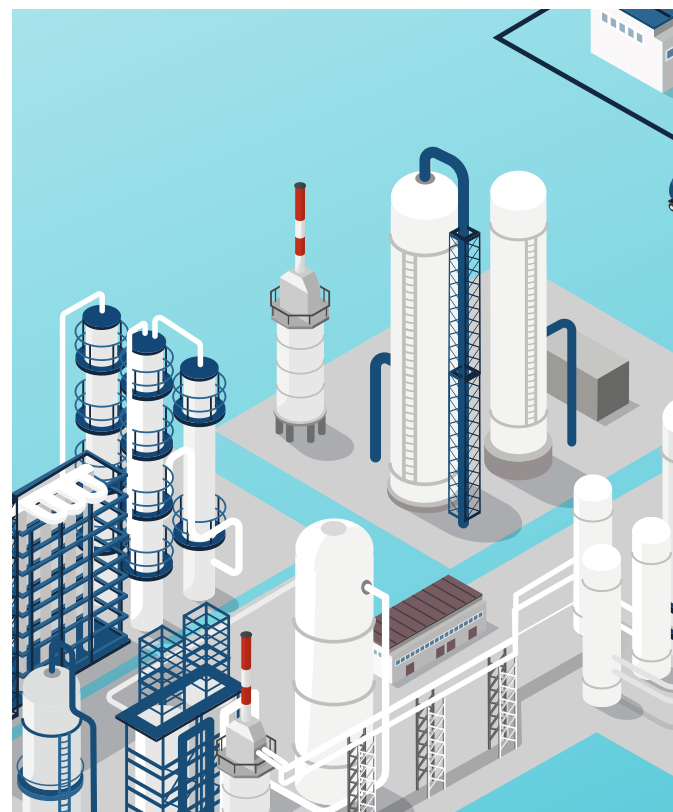
Page 14

Infographie

Produire du carburant d'aviation durable

Une infographie illustre les différentes étapes de production du carburant d'avion durable et comment les assembler en structure fonctionnelle.

Page 14



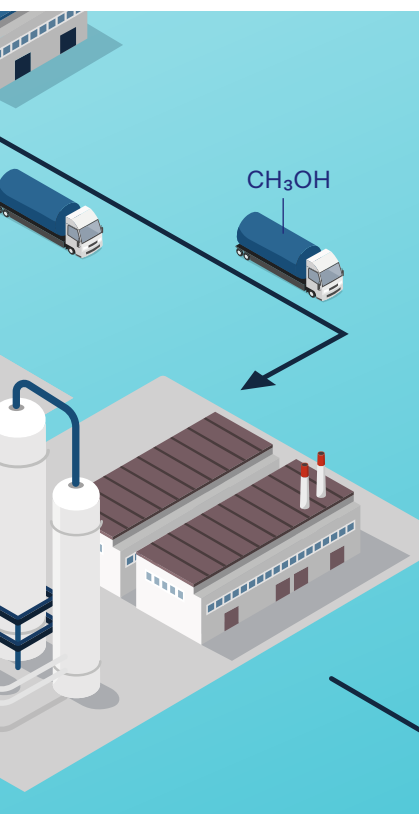


Reportage

Décoller avec du kérosène durable

Au PSI, les scientifiques poursuivent une approche prometteuse, en commun avec l'industrie, pour produire du carburant sans impact sur le climat.

Page 16



Editorial

L'avenir de l'aviation 4



Dossier

Voler sans nuire au climat, est-ce possible? 6

Toile de fond

Une promesse complexe 8

Interview

Des investissements massifs 14

Infographie

Produire du carburant d'aviation durable 14

Reportage

Décoller avec du kérosène durable 16

En image

Modélisation mathématique avec l'IA 19

En Suisse

A bord du laboratoire volant 20

La Centrale nationale d'alarme (CENAL) effectue, chaque année, des vols de mesure avec le soutien du PSI, afin de déterminer la situation radiologique de la Suisse.

En bref

Actualité de la recherche au PSI 24

- 1 Une bionanomachine pour la chimie verte
- 2 Réunir pratique médicale et recherche
- 3 Inauguration du Park Innovaare
- 4 Des rayons X pour sauver la musique

Galerie

Les livres préférés au PSI 26

Dans cette galerie, nous avons mis en scène les livres préférés des collaboratrices et collaborateurs du PSI.

Portrait

Une physicienne des particules en salle de classe 32

Giada Rutar est professeure à Lucerne, où elle transmet sa passion pour la physique.

Quotidien

Limite de vitesse pour les dauphins 36

Recherche

Casser les cellules en douceur 37

Qui sommes-nous

38

Impressum

40

Dans le prochain numéro

41



L'avenir de l'aviation

Dès l'aube de l'humanité, l'homme – qui veut être mobile – a cherché à cheminer d'un endroit à l'autre avec toujours plus de vitesse et d'efficacité. Ce désir a entraîné l'avènement de l'aviation voici plus de cent ans, devenue aujourd'hui la colonne vertébrale de la mobilité et de l'économie mondiales. Mais ce progrès a un prix, car les émissions du trafic aérien contribuent considérablement au changement climatique.

Le carburant d'aviation durable (CAD) représente une solution prometteuse à ce problème. Il est fabriqué à partir de sources renouvelables, comme la biomasse, ou par le moyen de processus chimiques qui fixent le carbone de l'atmosphère. Cela nécessite beaucoup d'énergie. Contrairement au kérosène ordinaire, qui est obtenu à partir de combustibles fossiles et qui dégage beaucoup de dioxyde de carbone (CO₂) lors de sa combustion, le CAD peut réduire nettement l'empreinte carbone de l'aviation. C'est donc une technologie-clé et un jalon sur la voie qui mène à une aviation plus respectueuse du climat.

Actuellement, la fabrication de CAD reste très onéreuse. La conversion de biomasse ou de déchets en carburant liquide nécessite des processus chimiques complexes, qui sont aussi exigeants sur le plan technologique qu'énergivores. Ils doivent être optimisés et mis à l'échelle pour permettre une production de masse.

En tout cas, les défis techniques ne sont pas insolubles et, au PSI, nous travaillons d'arrache-pied à les surmonter. Pour ce faire, nous tirons parti de l'expertise de nos scientifiques comme de nos partenaires de l'industrie. L'objectif de ces coopérations est de rendre les processus de fabrication plus efficaces et la production, plus rentable.

Le grand avantage du CAD est de s'intégrer assez facilement au système existant. Néanmoins, le passage à la neutralité climatique représente, pour les entreprises comme les aéroports, un énorme effort. L'aéroport de Zurich, sur la terrasse duquel je me trouve, en est un bon exemple, car l'aviation ne se limite pas, et de loin, à la propulsion technique des avions. Pour ces autres domaines les scientifiques du PSI ont aussi développé des calculs et des modèles qui montrent des possibilités d'amélioration.

La conclusion de nos recherches est encourageante: l'avenir de l'aviation peut être durable. Dans ce numéro, vous en apprendrez davantage sur la manière d'atteindre cet objectif ambitieux.

Christian Rüegg, directeur du PSI



Voler sans nuire au climat, est-ce possible?

Si la Suisse veut tenir sa promesse de neutralité climatique d'ici 2050, ses efforts doivent aussi porter sur l'aviation. Le carburant d'aviation durable est un élément important de ce projet. Mais il ne fait pas tout, car le transport aérien englobe bien davantage de facteurs que la seule combustion de kérosène au cours d'un vol.

1

Toile de fond

Une promesse complexe

Page 8



4

Reportage

Décoller avec du kérosène durable

Page 16

2

Interview

Des investissements massifs

Page 14

3

Infographie

Produire du carburant
d'aviation durable

Page 14



Une promesse complexe

Une aviation climatiquement neutre n'implique pas seulement de réduire les émissions des vols. Une étude du PSI analyse ce qui sera nécessaire pour atteindre cet objectif à long terme.

Texte: Jan Berndorff

En 1903, les frères Wright faisaient leurs premiers essais avec le *Flyer*, un aéronef à moteur pilotable, sur une plage, non loin de la petite ville de Kitty Hawk, dans l'Etat de Caroline du Nord. Personne n'aurait alors pu prédire comment l'aviation évoluerait en cent vingt ans. Aujourd'hui, voyager en avion est banal. La Terre est parcourue d'un réseau dense de routes aériennes et toute région, qu'elle soit proche ou lointaine, est accessible en avion en un ou deux jours au maximum. Cette offre répond aux besoins d'une multitude de personnes: en 2023, l'Association du transport aérien international (IATA) chiffrait le nombre de passagers à 4,35 milliards, ce qui devrait plus que doubler d'ici 2050, pour atteindre 10 milliards par an.

Évidemment, cela n'est pas sans conséquences. Les répercussions sur le climat, surtout, sont inquiétantes: rapporté au nombre de voyageurs-kilomètres, le transport aérien a un impact climatique nettement plus important que les autres moyens de locomotion. À première vue, on pense surtout au dioxyde de carbone (CO₂) émis par les réacteurs des avions. Mais, comme souvent, les choses sont en réalité plus complexes.

Un voyage en avion commence par une réservation. Déjà là, les considérations climatiques peuvent jouer leur rôle: selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le trafic aérien contribue à plus de 3 % des émissions globales de CO₂ et sa part dans l'effet de serre est plus importante encore, notamment parce que l'atmosphère est beaucoup plus sensible dans ses couches supérieures, là où les avions naviguent, qu'au sol. La personne qui effectue un vol aller-retour pour New York en classe économique émet trois tonnes de dioxyde de carbone, environ le double en classe affaires, étant donné qu'elle dispose de plus de place, et le triple en première classe. Trois tonnes, c'est un quart des émissions moyennes que produit un ou une Suisse sur une année. Les citoyens de notre pays prennent d'ailleurs souvent l'avion: en moyenne, 1,6 fois par tête et par an. C'est deux à trois fois plus que nos voisins d'Allemagne, d'Autriche, de France et d'Italie.

De nombreuses compagnies aériennes proposent donc des options de réservation «vertes»: par exemple, pour un vol à destination de New York, un supplément de 90 francs sur le billet de 800 francs permet de compenser les émissions de CO₂. Certaines compagnies aériennes promettent d'investir 80 % de ces paiements supplémentaires dans des projets de protection du climat et 20 % dans l'achat de carburant d'aviation durable (CAD) (en anglais «*sustainable aviation fuel*» ou SAF), autrement dit de kérosène durable produit sans pétrole.

Cela règle-t-il le problème? Suffirait-il de s'acquitter de compensations de cet ordre pour rendre l'aviation neutre en termes d'impact climatique?

«Malheureusement non», répond Thomas J. Schmidt, responsable du Center for Energy and Environmental Sciences au PSI. L'an dernier, une étude de celui-ci et de l'ETH Zurich a montré qu'une aviation climatiquement neutre était certes possible, mais qu'elle exigerait beaucoup plus que de telles hausses raisonnables de tarifs pour financer la protection du climat et le CAD. «Et il ne s'agirait pas uniquement de prix plus élevés», relève le chercheur.

De hautes ambitions

Le secteur de l'aviation s'est fixé pour objectif de réduire ses émissions de CO₂ à zéro net d'ici 2050 et d'atteindre ainsi la neutralité climatique. Ce faisant, il poursuit le même but que l'UE en 2021, but également adopté par la Suisse lors d'une votation populaire en 2023: celui d'atteindre la neutralité climatique d'ici 2050 pour lutter efficacement contre le réchauffement. La grande question est de savoir si et comment cela pourra fonctionner. Notamment dans l'aviation, car les avions ont besoin d'énormément d'énergie pour voler, mais aussi d'une infrastructure et d'une logistique complexes à l'arrière-plan.

C'est sur cette question précise que se sont penchés Romain Sacchi et Christian Bauer du Energy Systems Analysis Lab au PSI, avec Viola Becattini et Marco Mazzotti de l'Institut de l'énergie et de génie des procédés à l'ETH Zurich.



L'aviation impose au climat une charge écologique considérable. Les émissions de dioxyde de carbone dues à la combustion du kérosène ne sont pas les seules à peser dans la balance. De nombreux autres effets se font sentir. Hormis les processus atmosphériques, le comportement humain joue également un rôle, car le trafic aérien ne cesse d'augmenter.

Sources:

- 1 Agence internationale de l'énergie (AIE), données pour 2019
- 2 Statista
- 3 Flight Aware

Ils ont rassemblé des données et des prévisions sur tous ces aspects et ont calculé différents scénarios d'évolution d'ici 2050.

«Une question importante à clarifier concernait la définition précise de ce qu'on entend par "zéro émission nette de CO₂", c'est-à-dire par "neutralité climatique"», explique Romain Sacchi, premier auteur de l'étude avec Viola Becattini. En effet, de nombreux bilans ne prennent en compte que les émissions de CO₂ des vols. «Mais cela ne va vraiment pas assez loin», estime Viola Becattini. Si le trafic aérien poursuit sa croissance, comme il l'a fait jusqu'à présent, les émissions de CO₂ des vols ne représenteront qu'environ 20 % de la totalité de l'effet climatique, selon les calculs jusqu'en 2050. Si l'on veut rendre l'ensemble du trafic aérien climatiquement neutre, il faut, en plus des vols, considérer la production de carburant et toute l'infrastructure nécessaire à l'aviation. Et surtout inclure les autres émissions des avions, qui ont aussi un impact sur le climat.

L'autre moitié de la vérité

Un voyage en avion ne se résume pas au seul vol. De la même manière que l'on a besoin de routes, de stations-service et de places de stationnement en voiture, l'avion nécessite une infrastructure à laquelle

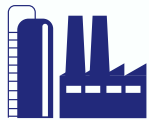
s'ajoute une logistique complexe pour approvisionner les aéronefs, les équipes et les passagers, mais aussi pour les faire décoller à l'heure. Le kérosène, les bagages, les repas: tout doit être transporté. Les avions doivent être entretenus, les terminaux, les hangars et autres bâtiments d'exploitation nettoyés, chauffés et éclairés. Et tout cela occasionne des émissions de gaz à effet de serre.

Zurich, le plus grand aéroport de Suisse, a annoncé avoir géré 250 000 vols en 2023, dont 380 000 tonnes de fret et 29 millions de passagers. 27 000 personnes travaillent dans cet aéroport. Sa consommation globale d'énergie est comparable à celle d'une ville moyenne. En Suisse, où l'électricité est produite principalement à partir de l'énergie hydraulique et nucléaire et pour moins de 2 % à partir d'énergies fossiles, le bilan CO₂ est moins mitigé que dans d'autres pays. Néanmoins, la production d'électricité dégage également du CO₂. En outre, le bilan climatique doit tenir compte des émissions dégagées par la construction de l'ensemble, avions y compris.

Cependant, l'étude du PSI et de l'ETH montre que l'effet climatique induit par l'infrastructure aéronautique doit être certes calculé, mais que, dans l'ensemble – surtout jusqu'en 2050 et au-delà –, il est relativement faible. Ceux de l'avion et des émissions dues à la fabrication du carburant sont beaucoup

La multiplicité des effets sur le climat

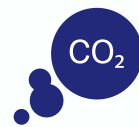
Les émissions de CO₂ des avions ne sont pas la seule cause de réchauffement climatique. L'oxyde d'azote, un autre gaz émis par les avions, a également un impact sur le climat. Il favorise la formation d'ozone, qui est un gaz à effet de serre très actif à cette altitude. Mais ce sont la suie et d'autres particules qui ont le plus d'effet, puisqu'elles entraînent la formation de cirrus qui réchauffent fortement le climat. La construction et l'exploitation de l'aéroport, la production et le transport du carburant ainsi que le flux de passagers génèrent aussi des gaz à effet de serre.



production de carburant



construction d'avions



émissions directes de CO₂



départs et arrivées



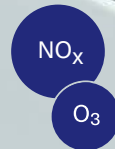
traînées de condensation/cirrus



exploitation de l'aéroport/ de l'infrastructure



construction de l'aéroport/ de l'infrastructure



oxyde d'azote/ ozone

plus importants. C'est ce qu'illustre le bilan CO₂ de l'aéroport de Zurich pour 2021: les émissions liées à son exploitation se montaient à un peu plus de 30 000 tonnes contre 1,6 million de tonnes pour les vols et les accès de livraison.

L'étude a également montré avec une netteté sans précédent que ce qu'on appelle les «effets non-CO₂ de l'avion» joue un rôle encore plus important pour le climat. Ce terme désigne les particules qui apparaissent lors de la combustion du kérosène. Il s'agit de particules de suie et d'autres qui servent de germes de condensation dans la formation des nuages, mais aussi d'oxydes d'azote qui stimulent la formation d'ozone dans l'atmosphère – lequel agit dans la troposphère comme un gaz à effet de serre – ainsi que de vapeur d'eau et des traînées de condensation qui en résultent et qui, à leur tour, peuvent influencer la formation de cirrus dans la haute atmosphère, à environ dix kilomètres d'altitude.

Ces nuages voilés, composés de particules de glace, n'ont pas d'effet refroidissant sur la surface de la Terre, contrairement aux nuages stratifiés et amoncelés plus bas, qui réfléchissent la lumière du Soleil. «En fait, ces nuages sont plutôt transparents pour le Soleil, explique Benjamin Tobias Brem, qui étudie les conséquences climatiques des émissions de l'aviation au Laboratoire de chimie de l'atmosphère du PSI. Les rayons infrarouges venus de la surface terrestre, en revanche, sont très efficaces pour faire retomber les particules de glace sur la Terre et exercent ainsi un effet de réchauffement supplémentaire.» Cet effet dépend de la position des nuages, c'est-à-dire de leur latitude et de leur altitude. Dans nos régions, il apparaît à partir de six kilomètres d'altitude environ, autrement dit dans les couches de l'atmosphère où circulent les vols long-courriers à l'origine de la majeure partie des émissions dans le monde.

«Au total, les facteurs non-CO₂ représentent plus de la moitié de l'effet climatique de l'aviation, relève Christian Bauer. Pourtant, ils ont été négligés jusqu'ici dans nombre d'analyses et de promesses "zéro net". Ou alors ils n'ont pas été correctement calculés.»

Des bilans jusque-là imprécis

Habituellement, de telles émissions et de tels effets sont convertis en équivalents CO₂ pour s'intégrer au bilan. «Cependant, les méthodes et les valeurs utilisées jusqu'ici se sont révélées incorrectes, relève Marco Mazzotti. Nous avons donc procédé de manière plus précise.» Les chercheurs ont surtout pris en compte une différence importante entre les divers facteurs: les effets non-CO₂ ont une durée de vie beaucoup plus courte que le CO₂. C'est pourquoi on les appelle aussi «*short-lived climate forcers*» (SLCF),

c'est-à-dire «agents de forçage climatique à courte durée de vie».

Alors que la moitié du dioxyde de carbone émis est absorbé par les forêts et les océans, l'autre moitié reste dans l'atmosphère pour des milliers d'années. Elle s'y distribue et y déploie un effet de serre. L'ozone, en revanche, est un gaz qui a beaucoup plus d'impact sur le climat que le CO₂, mais il se dégrade en quelques mois. Les traînées de condensation et les nuages qui en résultent s'évaporent même en quelques heures. «Le problème, c'est qu'avec l'augmentation du trafic aérien nous produisons toujours plus de SLCF et qu'ils s'accumulent au lieu de disparaître rapidement, explique Viola Becattini. Ils déploient ainsi leur énorme potentiel de gaz à effet de serre.» L'effet est le même que dans une baignoire où le robinet et l'écoulement sont ouverts: si le robinet déverse plus d'eau que l'écoulement n'en évacue, la baignoire se remplit toujours davantage et finit par déborder.

Dans leurs scénarios, les scientifiques viennent de prendre en compte les possibilités de fermer le robinet d'ici 2050, de sorte à ne déverser que ce qui sera évacué par l'écoulement. Dans l'ensemble, il ne faudrait pas que l'aviation émette plus d'équivalents CO₂ que l'on n'en retire de l'atmosphère. A ce moment-là seulement, voler serait bel et bien climatiquement neutre. Le captage du CO₂ dans l'air fait expressément partie de l'équation. Une fois capté, ce dernier est injecté dans le sol, où il est stocké sans nuire au climat, comme l'était le pétrole avant que nous ne commencions à l'extraire. De tels procédés



«Les capacités mondiales de captage et de stockage du dioxyde de carbone ne suffisent pas pour compenser les émissions restantes.»

Christian Bauer, PSI Energy Systems Analysis Lab



«Il est probable que le nombre de vols ne baissera sensiblement que si les prix augmentent vraiment.»

Thomas J. Schmidt, PSI Center for Energy and Environmental Sciences

de captage et de stockage du carbone (CSC) sont déjà en usage et considérés comme une possibilité, en particulier là où certaines émissions de CO₂ ne peuvent être évitées. Mais cette technique doit encore prouver son efficacité et son absence de risque à long terme.

La propulsion des avions constitue le levier le plus évident pour améliorer leur bilan climatique. Partout dans le monde, les scientifiques travaillent au développement d'avions électriques ou propulsés à l'hydrogène. Si le courant électrique – utilisé pour recharger les batteries ou pour produire de l'hydrogène à partir de l'eau – est issu de l'éolien ou du solaire, ces propulsions seraient climatiquement neutres. Mais cela suppose que tous les processus de production en amont – comme la fabrication des batteries – soient réalisés au moyen de l'énergie renouvelable.

Or, même s'il en était ainsi, certains obstacles demeureraient insurmontables: aujourd'hui, les batteries atteignent une densité énergétique de 250 wattheures par kilogramme, alors que le kérosène en fournit 12 000, soit presque cinquante fois plus. Pour entreprendre un voyage à New York à bord d'un vol long-courrier, il faudrait embarquer une telle quantité de batteries chargées que l'avion serait trop lourd pour décoller. Et même avec les progrès de la technologie des batteries, la situation ne s'améliorera pas suffisamment dans un avenir prévisible. Pour l'instant, seuls les petits avions peuvent voler à l'électricité sur de courtes distances. Mais ils représentent moins de 2 % des émissions de gaz à effet de serre dus à l'aviation.

Les choses se présentent de manière similaire pour l'hydrogène: même sous sa forme liquide compacte à très basse température, l'hydrogène occupe quatre fois le volume du kérosène par wattheure qu'il fournit. Les avions ne seraient pas plus lourds, mais devraient mettre plus de volume à disposition pour le carburant. Or, le volume est l'une des valeurs critiques dans la conception des avions. D'intenses recherches sont menées pour créer une chaîne d'approvisionnement en hydrogène. Mais c'est là que le bât blesse: le travail de transformation des avions et des infrastructures est immense et prend du temps. Certains constructeurs, comme Airbus, ont annoncé que les premiers avions à hydrogène ne seraient pas mis en service avant 2035, au plus tôt.

Par ailleurs, ces avions ne seront pas très grands (environ 90 places au maximum) et ne se prêteront pas aux vols long-courriers. Ils conviendront plutôt aux vols continentaux. La distance visée est d'environ 2 000 kilomètres. On ne volera donc pas jusqu'à New York à leur bord, alors que ce sont les gros avions, sur les vols long-courriers de plus de 4 000 kilomètres, qui émettent la majeure partie des gaz à effet de serre.

L'espoir réside donc dans le CAD mentionné au préalable (voir infographie page 14).

Des billets d'avion trois fois plus chers



L'utilisation généralisée du CAD peut considérablement nous rapprocher d'une aviation climatiquement neutre d'ici 2050, mais elle coûtera davantage de ressources et d'argent, notamment parce que la production d'hydrogène par électrolyse est très gourmande en énergie.

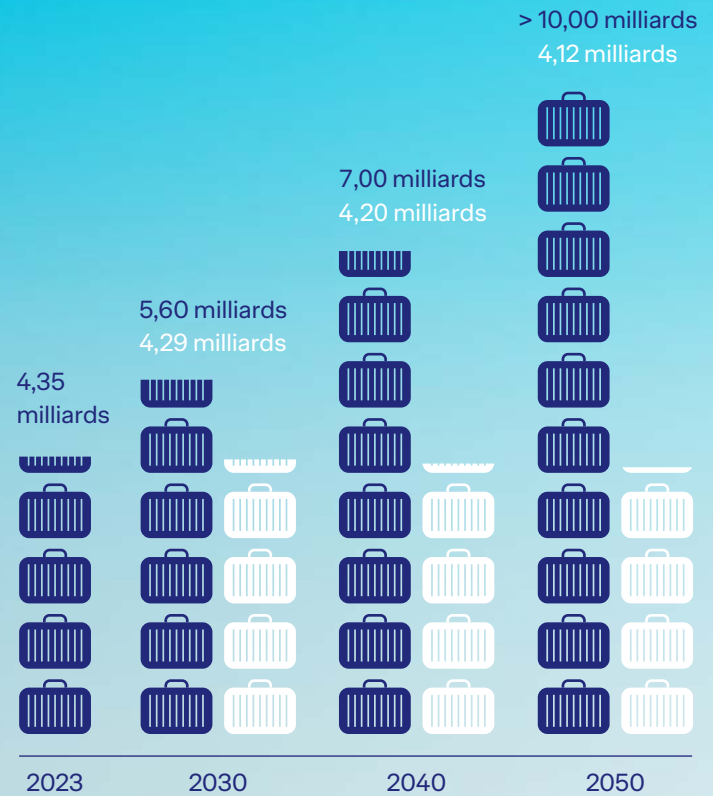
Ce qui nous ramène aux compensations. Les scientifiques du PSI et de l'ETH ont également calculé cet aspect: «Demander seulement quelques euros en supplément, c'est jeter de la poudre aux yeux, affirme Christian Bauer. Pour compenser l'impact effectif sur le climat, il faudrait qu'un billet d'avion coûte le triple.» Le montant du vol pour New York ne serait donc plus de 800 francs, mais de 2 400 francs.

«Une telle augmentation des prix aurait en même temps l'avantage de réduire nettement la demande de vols», relève Viola Becattini. C'est là que réside le principal message de leur étude: aussi prometteurs que soient l'utilisation du CAD, les propulsions alternatives et les gains d'efficacité dans la fabrication, la logistique et les transports, aucun d'eux ne mèneront au but, si l'on se réfère aux scénarios. Du moins pas d'ici 2050. Car il faudrait compenser de trop grandes quantités d'émissions restantes par CSC, c'est-à-dire les capter dans l'air et les stocker dans le sol. «Les capacités mondiales de cette méthode n'y suffiront pas», explique Christian Bauer. D'autant qu'elles ne

Désirs et réalité

Les prévisions de l'industrie aéronautique sur le nombre de vols s'écartent considérablement de ce que nous pouvons nous permettre du point de vue climatique. Même si nous convertissons toute la flotte en avions verts, il faudra que les chiffres baissent afin que nous atteignons la neutralité climatique d'ici 2050.

-  Prévisions de l'évolution du nombre de passagers
-  Evolution nécessaire du nombre de passagers



Source: IATA

sont évidemment pas réservées à l'aviation et encore peu testées à grande échelle.

Conclusion: nous devons voler moins, et non plus. Autrement, cela ne fonctionnera pas. Romain Sacchi et Viola Becattini ont également calculé la réduction nécessaire: en combinaison avec une efficacité accrue et, dans la mesure du possible, un CSC, le trafic aérien devrait reculer de 0,2 % par an pour ne plus représenter qu'environ 95 % du volume actuel en 2050. Si nous continuons à utiliser le kérosène fossile,

nous devrions nous restreindre quatre fois plus pour arriver à 80 %.

«Comment parvenir à réguler le nombre de vols dans la proportion nécessaire, telle est la question à laquelle la société et la politique devront répondre, conclut Thomas J. Schmidt. Cela impliquera certainement une modification des comportements, qui ne sera pas facile à imposer. Le nombre de vols ne diminuera sensiblement que lorsque leur prix augmentera franchement.» ●



Des investissements massifs

Emanuel Fleuti est le responsable Développement durable et environnement de Flughafen Zürich AG.

Emanuel Fleuti, l'aviation est censée devenir climatiquement neutre d'ici 2050. Comment votre aéroport peut-il avancer dans cette direction?

Emanuel Fleuti: Nous investissons massivement dans la décarbonisation, par exemple en électrifiant notre flotte de véhicules. Mais surtout, nous concevons l'approvisionnement énergétique de notre vaste parc immobilier de manière toujours plus efficace et nous misons sur les énergies renouvelables. Nous avons douze installations photovoltaïques et nous entendons au moins doubler leur nombre d'ici 2040. Nous voulons également assainir les bâtiments existants sur le plan énergétique et équiper les nouveaux de technologie ultramoderne, comme de pieux énergétiques et de sondes géothermiques, qui rendent la chaleur du sous-sol utilisable. Actuellement, nous examinons avec des spécialistes si le chenal géologique glaciaire qui passe sous notre aéroport peut servir de réservoir de chaleur et de froid. Ce serait un grand pas vers notre objectif: chauffer et refroidir sans émissions l'aéroport de Zurich dès 2040.

Comment cela fonctionnerait-il?

Le chenal a une profondeur d'environ 300 mètres, une largeur d'un kilomètre et une longueur d'environ 30 kilomètres. Il est rempli de gravier aquifère. En été, nous pourrions stocker la chaleur générée par nos excédents d'énergie dans l'eau qu'il contient, puis utiliser cette même chaleur en hiver. Et inversement. Nous sommes en train de construire un puits d'essai.

De votre point de vue, quel rôle joue le CAD pour atteindre la neutralité climatique?

Le CAD est considéré comme une sorte de voie royale vers la neutralité climatique dans le trafic aérien. En 2020, nous avons engagé une coopération avec l'entreprise high-tech Synhelion SA. Toujours en 2020, un avion a fait, chez nous, pour la première fois, le plein de CAD en Suisse. Mais, en tant qu'aéroport, nous n'avons qu'une fonction de médiation entre les fabricants de carburant et les compagnies aériennes.

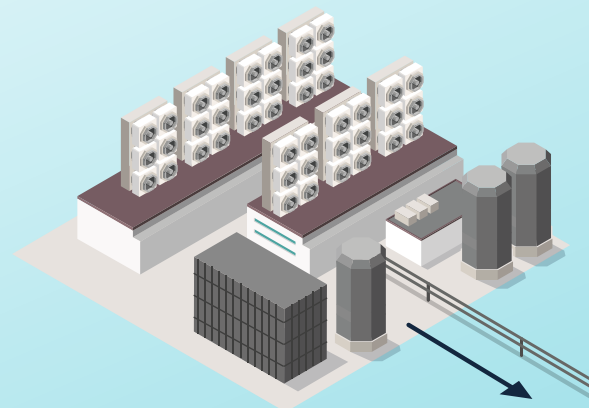
Une étude du PSI a montré que, pour atteindre la neutralité climatique, il faudrait également que le nombre de vols recule de 5 %. Qu'est-ce que cela signifierait pour votre aéroport?

Je ne connais pas cette étude. En tant qu'aéroport, nous n'avons pas d'objectifs de croissance. Notre développement dépend de l'augmentation de la population et de la croissance économique de la Suisse. Mais étant donné la demande existante en matière de voyages en avion, il me semble difficile de réduire leur nombre. Surtout dans le cas des vols long-courriers, pour lesquels il n'y a souvent pas d'alternative. N'oublions pas que, dans un monde globalisé, l'avion représente pour beaucoup la seule option réaliste pour voir leurs amis, leurs parents et leur famille.

Comment pourriez-vous gérer un recul du nombre de passagers?

La Confédération nous a confié pour mission, en tant qu'aéroport, d'assurer les liaisons entre la Suisse et les métropoles du monde. Si la société devait décider de voler moins, nous nous adapterions.

Chaîne de fabrication: comment le CAD pourrait être produit à l'avenir



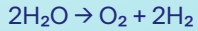
Filtrage du CO₂ de l'air ambiant

Des turbines spéciales filtrent le CO₂ de l'air ambiant. Le CO₂ peut être également capté dans les gaz d'échappement émis par les installations de biogaz ou les stations d'épuration.



Electrolyse de l'eau

Des électrolyseurs décomposent l'eau en oxygène et en hydrogène, en utilisant du courant électrique et une membrane spéciale.



Energies renouvelables

La condition de base est de couvrir de manière écologique les besoins en électricité des installations, c'est-à-dire à partir de l'eau, du vent et du soleil. Notamment pour faire fonctionner des électrolyseurs, très gourmands en énergie.

Synthèse du méthanol

Dans une installation de type raffinerie, on produit du méthanol à partir de dioxyde de carbone et d'hydrogène, à l'aide de catalyseurs.



A l'aéroport

Le substitut de kérosène est livré à l'aéroport via la logistique de transport habituelle. Les avions peuvent faire le plein de CAD de la même façon que de kérosène ordinaire.

CAD

Le méthanol est à son tour utilisé pour synthétiser de manière très efficace le bon mélange d'hydrocarbures. Pour ce faire, on recourt à un procédé en plusieurs étapes, récemment mis au point, et à un catalyseur. Ce carburant d'aviation artificiel peut remplacer le kérosène.

Décoller avec du kérosène durable

Dans le monde entier, les scientifiques travaillent à trouver et à optimiser de nouveaux moyens de produire du carburant sans impact sur le climat.

Au PSI, ils poursuivent une approche prometteuse en commun avec l'industrie.

Texte: Jan Berndorff

Dans l'aviation, l'un des grands espoirs pour atteindre l'objectif proclamé de la neutralité climatique d'ici 2050 porte le nom de «carburant d'aviation durable» (CAD), en anglais «*sustainable aviation fuel*» (SAF). Le kérosène utilisé jusqu'à présent comme carburant est un mélange d'hydrocarbures dérivé du pétrole. Lors de sa combustion dans les turbines d'avion, il libère de l'énergie, mais émet aussi du dioxyde de carbone (CO₂). La concentration de celui-ci dans l'atmosphère augmente par conséquent, et le climat se réchauffe.

Le CAD est composé des mêmes hydrocarbures que le kérosène et peut le remplacer directement, contrairement aux vecteurs énergétiques comme l'électricité ou l'hydrogène. «Le CAD peut être intégré directement à l'infrastructure existante des aéroports et être utilisé dans les réacteurs conventionnels moyennant quelques adaptations», explique Marco Ranocchiaro, chimiste au PSI et responsable de la plate-forme ESI (acronyme de «*Energy System Integration*»), une installation d'essai pour les énergies écologiques du futur.

L'avantage climatique du CAD réside dans le fait que les hydrocarbures ne sont pas prélevés dans le sous-sol sous forme de pétrole et ne représentent pas une pollution supplémentaire pour l'atmosphère. Pour l'instant, on le fabrique à partir de matériaux biologiques de surface comme les huiles végétales et les graisses animales usagées. Quant au carbone contenu dans le CAD, il provient de l'atmosphère. La concentration de CO₂ reste donc finalement identique. La propulsion est neutre pour le climat, à condition que la fabrication et le transport du CAD fonctionnent exclusivement avec de l'énergie renouvelable plutôt que fossile. Or, actuellement, ce n'est pas encore le cas. Le CAD ne peut donc pas réduire à zéro les émissions de CO₂ d'un avion, mais de 80 % quand même.

Toutefois, la production des quantités nécessaires de CAD à des coûts supportables reste un grand défi. En 2023, environ 600 millions de litres de CAD ont été produits, soit une infime fraction des quelque 325 milliards de litres nécessaires. En 2050, si l'on veut remplacer le kérosène fossile, le besoin sera de 450 milliards de litres, estime l'Association du transport aérien international (IATA).

C'est la raison pour laquelle les scientifiques du PSI étudient, développent et optimisent, avec divers partenaires, plusieurs méthodes de fabrication de kérosène sans pétrole. Par exemple, dans le cadre de l'initiative SynFuel avec l'Empa, le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche, et avec le soutien financier du Conseil des EPF. Ou encore avec la start-up climatique Metafuels.

La biomasse disponible ne suffit pas

Une possibilité se fonde sur la biomasse. La seule option déjà utilisée et certifiée à ce jour est le CAD produit à partir d'huiles et de graisses alimentaires. Les acides gras sont extraits des huiles par un procédé appelé «hydrolyse». D'autres étapes permettent ensuite de les transformer en produit similaire au pétrole brut. Enfin, ce dernier est raffiné en biokérosène à l'aide d'hydrogène. Ce CAD de première génération peut être aujourd'hui mélangé au kérosène traditionnel à hauteur de 50 %.

Mais l'humanité n'est pas en mesure d'ingérer suffisamment de friture pour générer assez d'huile alimentaire usagée et produire les quantités nécessaires de CAD. Les scientifiques explorent donc d'autres voies pour transformer la biomasse en kérosène. La sciure et d'autres résidus végétaux issus de l'horticulture, de l'agriculture et de la sylviculture ou encore les boues d'épuration sont autant de matières premières utilisables. Grâce à divers procédés hydrothermaux – qui utilisent donc de la chaleur, de la pression et de l'eau –, les scientifiques obtiennent les hydrocarbures recherchés à partir de ces substances, qui sont ensuite raffinées en kérosène avec de l'hydrogène.

Mais cela ne suffira pas et les scientifiques sont donc à la recherche d'autres options pour remplacer le kérosène fossile. Une variante possible consisterait à fabriquer le CAD artificiellement à partir d'hydrogène et de dioxyde de carbone, en utilisant du courant écologique (Power-to-Liquid) ou directement la force du soleil (Sun-to-Liquid). On l'appelle «CAD de deuxième génération» et donc aussi «e-kérosène». Cette méthode permettrait d'en produire beaucoup plus qu'à partir des huiles alimentaires usagées (voir infographie page 14).

Marco Ranocchiari (à gauche) et Jörg Roth ont pour objectif de faire progresser la production de CAD à l'échelle industrielle. L'une des étapes nécessaires est la construction d'une installation-pilote. Elle est en cours sur le site du PSI.



Les carburants artificiels sont particulièrement écologiques

Il existe un procédé qui permet de produire des carburants à partir de solides et de gaz riches en hydrocarbures: la synthèse Fischer-Tropsch, du nom des chimistes allemands Franz Fischer et Hans Tropsch, qui ont déposé un brevet sur cette méthode il y a près de cent ans. Celle-ci consiste à hydrogéner du monoxyde de carbone à des températures comprises entre 150 et 350 degrés Celsius, sur des surfaces catalytiques qui contiennent du cobalt ou du fer et qui régulent les réactions chimiques. Le procédé est établi et utilisé aujourd'hui à grande échelle.

«Mais le kérosène est particulièrement exigeant», souligne Jörg Roth, ingénieur chimiste au PSI et coordinateur de projet au sein de l'initiative SynFuel. Ce carburant riche en énergie est composé d'une combinaison spéciale d'hydrocarbures légers et lourds. Celle-ci confère au kérosène certaines valeurs de viscosité, un point d'ébullition, un point de combustion et d'autres paramètres qui doivent être impérativement respectés dans l'aviation. Or, le procédé Fischer-Tropsch produit un mélange non maîtrisé, qui contient beaucoup de variétés que l'on ne veut pas voir dans le kérosène. «Il faut d'abord faire subir au produit un traitement complexe pour obtenir du kérosène de haute qualité, ce qui entraîne une grande perte d'efficacité», reconnaît Jörg Roth.

Le méthanol: une piste prometteuse

Les scientifiques du PSI travaillent donc à développer des alternatives. La synthèse du méthanol fait partie de ces possibilités. Elle consiste à produire

du méthanol à partir de monoxyde de carbone et d'hydrogène en soumettant des catalyseurs d'oxyde de zinc et de cuivre à une haute pression. Le procédé est établi depuis longtemps, mais c'est seulement avec des recherches récentes que l'on a découvert comment produire, en passant par d'autres étapes de synthèse, des hydrocarbures à chaîne plus longue, comme l'éthène (C_2H_4), le propène (C_3H_6), le butène (C_4H_8) et, finalement, le kérosène à partir du méthanol (CH_3OH).

Le type de réacteur, la température, la pression, le rapport entre hydrogène et dioxyde de carbone, ne sont que quelques paramètres parmi tous ceux à ajuster. «Mais le point décisif est le choix du catalyseur», souligne Marco Ranocchiari. Un catalyseur est un matériau qui favorise certaines réactions chimiques ou qui les rend même possibles. Dans ce cas, il contrôle l'enchaînement croissant des hydrocarbures. La taille des pores de sa surface détermine les chaînes de molécules qui se forment. Un bon catalyseur permet donc de réduire les produits secondaires indésirables. Mais, surtout, il interrompt les réactions à un certain point. «Sinon, la chaîne carbonée devient interminable et, pour finir, nous n'avons plus que de la cire», explique Jörg Roth.

Les connaissances acquises à la plate-forme ESI servent aussi de base à une coopération prometteuse avec l'industrie, qui a démarré au début de l'année dernière: «La start-up suisse Metafuels nous a approchés», raconte Marco Ranocchiari. L'entreprise, qui considère le CAD comme un énorme marché, disposait déjà d'un business plan et d'investisseurs solides du secteur des technologies vertes. Ce qui manquait encore, c'était la preuve que l'on pouvait produire du CAD de manière plus efficace qu'avec

les installations Fischer-Tropsch conventionnels. A ce moment-là seulement, la production deviendrait économiquement viable.

Le catalyseur assure le bon mélange

Ensemble, les partenaires du projet ont testé différentes idées et finalement découvert une configuration qui fonctionne, y compris un catalyseur efficace. En laboratoire, la synthèse se comporte déjà comme on le souhaite. Il s'agit à présent de modifier l'échelle du processus: à l'heure actuelle, les partenaires assemblent les composants pour une installation-pilote de la taille d'une maison, qui sera mise en service l'année prochaine sur le site du PSI et qui devrait produire quelque 50 litres de CAD par jour. Sa construction reçoit le soutien de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) avec 9 millions de francs. D'ici 2028, Metafuels veut construire une première installation commerciale à l'échelle industrielle avec une capacité multipliée par cent environ. «Il nous faudra d'abord identifier, avec l'installation-pilote, comment concevoir de manière optimale une production à cette échelle», relève Marco Ranocchiaro.

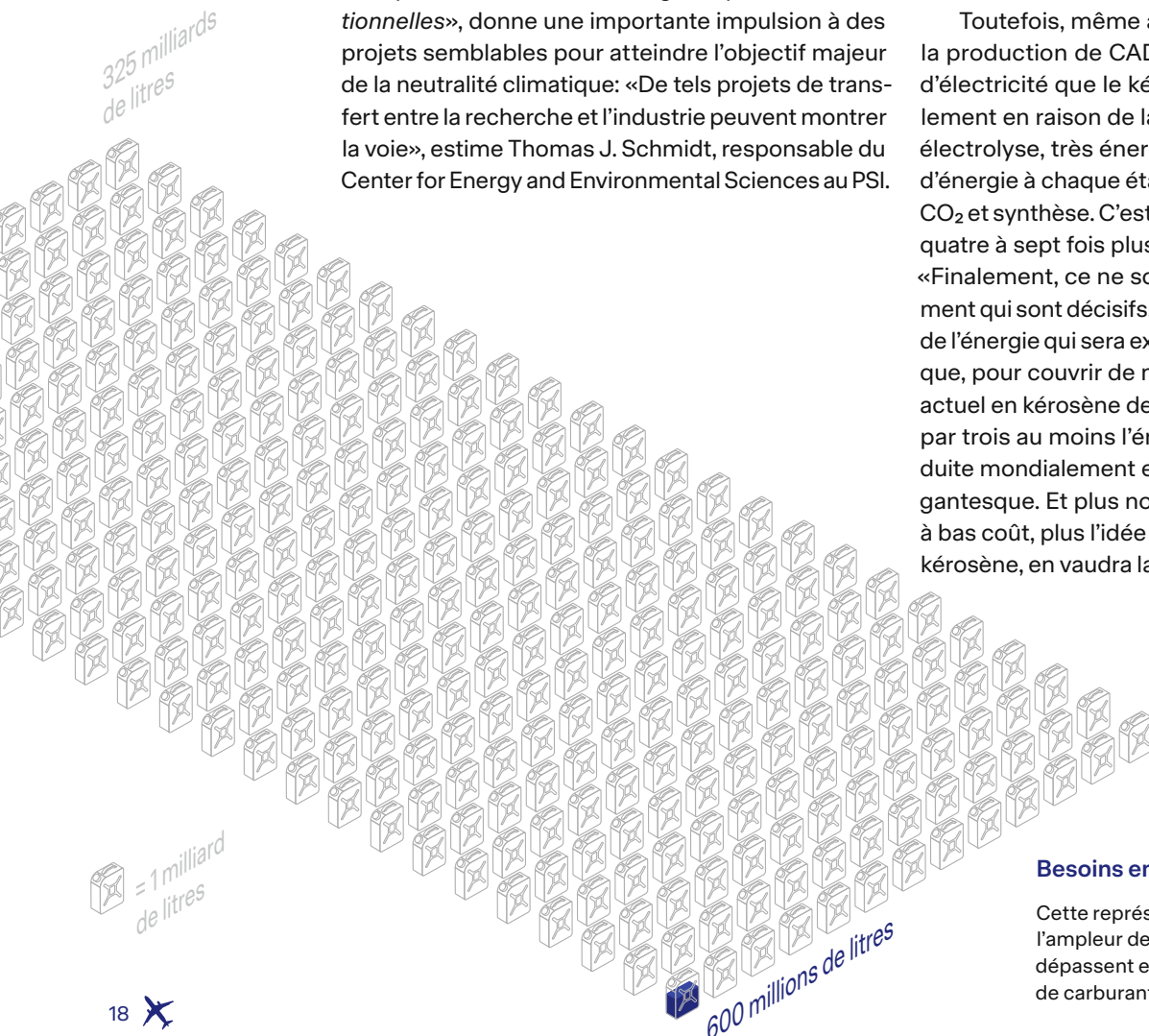
Quoi qu'il en soit, tous les participants s'attendent à ce que leur nouvelle technologie, baptisée «conventionnelles», donne une importante impulsion à des projets semblables pour atteindre l'objectif majeur de la neutralité climatique: «De tels projets de transfert entre la recherche et l'industrie peuvent montrer la voie», estime Thomas J. Schmidt, responsable du Center for Energy and Environmental Sciences au PSI.

Bien conçu, le CAD peut réduire la formation de suie

Tous les participants estiment que le CAD a d'excellentes chances. Il permet non seulement de réduire les émissions de CO₂ au minimum, sans bouleverser techniquement toute l'aviation, mais aussi de diminuer les effets non-CO₂ des avions (encore plus importants dans le réchauffement climatique). Le kérosène synthétique peut être conçu et utilisé de telle manière qu'il réduise la formation de nuages et qu'il limite le réchauffement climatique.

Une nouvelle initiative, nommée reFuel.ch, devra étudier d'ici 2032 dans quelle mesure cette entreprise est judicieuse et réalisable. Hormis la composition du CAD, le projet se concentre sur un autre aspect important: «Les matières premières comme le méthanol, le monoxyde de carbone et l'éthylène sont pour l'essentiel les mêmes que celles utilisées dans l'industrie chimique pour fabriquer toutes sortes de matières plastiques et de produits chimiques fins pour les médicaments», explique Thomas J. Schmidt. Jusqu'à présent, on se servait surtout du gaz naturel comme base, autrement dit d'une ressource fossile nuisible au climat. C'est aussi en raison de cette diversité d'applications que reFuel.ch a reçu un subside de 15 millions de francs de l'OFEN.

Toutefois, même avec une efficacité améliorée, la production de CAD nécessitera beaucoup plus d'électricité que le kérosène traditionnel, principalement en raison de la production d'hydrogène par électrolyse, très énergivore, mais aussi des pertes d'énergie à chaque étape: électrolyse, extraction du CO₂ et synthèse. C'est pourquoi le CAD reste encore quatre à sept fois plus cher que le kérosène normal. «Finalement, ce ne sont pas les coûts d'investissement qui sont décisifs, souligne Jörg Roth, mais ceux de l'énergie qui sera exploitée.» Les calculs montrent que, pour couvrir de manière synthétique le besoin actuel en kérosène de l'aviation, il faudrait multiplier par trois au moins l'énergie solaire et éolienne produite mondialement en 2021. Le besoin est donc gigantesque. Et plus nous obtiendrons cette énergie à bas coût, plus l'idée du CAD, en remplacement du kérosène, en vaudra la peine. ●



Besoins en CAD

Cette représentation met bien en évidence l'ampleur de la tâche: les besoins réels en CAD dépassent encore très largement la quantité de carburant actuellement produite.



Modélisation mathématique avec l'IA

Romana Boiger, mathématicienne, est spécialisée dans la modélisation numérique et l'intelligence artificielle. C'est son axe principal de recherche au sein du Laboratoire de sécurité du stockage final, qui soutient la Société coopérative nationale pour le stockage des déchets radioactifs (Nagra) dans son programme en Suisse. Elle développe des modèles complexes qui déduisent les propriétés physiques et chimiques des roches des données de laboratoire provenant de nombreux échantillons de forage. Ces propriétés sont utilisées pour simuler la dispersion de gaz, d'eau et de radionucléides. Sa contribution soutient ainsi le développement et la construction d'un dépôt en couches géologiques profondes.

A bord du laboratoire volant

L'aéroradiométrie permet de détecter la radioactivité au sol depuis les airs. La Centrale nationale d'alarme (CENAL) effectue, chaque année, des vols de mesure avec le soutien du PSI. Objectif: déterminer la situation radiologique en Suisse.



Texte: Benjamin A. Senn



Les pales du rotor de l'hélicoptère vibrent et soulèvent sans effort ce monstre de cinq tonnes. L'odeur et les chuintements du Super Puma ressemblent à ceux d'une gigantesque tondeuse à gazon. A 100 kilomètres à l'heure, l'engin file au-dessus de la ville de Zurich, depuis l'aéroport de Dübendorf, avant de suivre le cours de la Limmat en direction du Château d'eau: c'est là que se trouve la zone de mesure où sera déterminée la situation radiologique du PSI, de l'Entrepôt central pour déchets radioactifs (Zwilag) et des deux centrales nucléaires de Leibstadt et de Beznau.

Pour fournir des données de mesure aussi précises que possible, l'hélicoptère doit être maintenu à 90 mètres d'altitude. Il embarque en effet, dans sa soute, un système de mesure destiné à détecter la radioactivité de la surface terrestre. Le fait de le maintenir constamment à cette altitude représente un défi, aussi bien pour les pilotes que pour l'équipage, car on ressent chaque colline du paysage par la modification continue du sol. L'hélicoptère s'élève à la verticale de la crête du Geissberg de Villigen – l'équipage est tassé dans les sièges – pour redescendre en plongée de l'autre côté, donnant la sensation de montagnes russes. Les sacs vomitoires distribués au début du vol prennent soudain tout leur sens.

Avec une visibilité de 300 mètres à la ronde, l'hélicoptère suit des trajectoires parallèles prédéfinies, situées à 250 mètres les unes des autres – il est ainsi possible de balayer l'ensemble du sol. Cette route, on peut aussi la suivre en direct à bord. Sur les écrans des deux opérateurs, qui procèdent à une première évaluation en temps réel dans ce laboratoire volant, les surfaces colorées permettent d'identifier immédiatement le fond radiologique: le bleu et le vert correspondent à une valeur de 40 à 100 nanosieverts par heure. Le sievert est l'unité physique utilisée pour quantifier l'exposition aux rayonnements. Là, tout est dans le vert (ou dans le bleu).

Depuis l'hélicoptère, les opérateurs peuvent suivre en direct les résultats de mesure. Si nécessaire, ils demandent aux pilotes de survoler de nouveau une position particulière.



Cristina Poretti, responsable de l'aéroradiométrie à la CENAL, et Alberto Stabilini, physicien au PSI, discutent encore une fois, peu avant le décollage, de la trajectoire de mesure.

Le laboratoire volant parvient à mesurer une surface d'environ 100 kilomètres carrés en trois heures, sans escale.

Le problème de la pluie

Trois heures plus tôt, dans une salle de conférences de l'aéroport militaire de Dübendorf, Cristina Poretti, responsable de l'exercice, présente la mission du jour et indique la zone de mesure sur une carte hachurée de lignes parallèles rouges. Ce sont celles qu'il faudra survoler. «Malheureusement, la météo ne se présente pas très bien, annonce-t-elle. Nous attendons un front pluvieux venu de l'est en soirée.» Cette Tessinoise de naissance pointe les minuscules chiffres allant de 1 à 4 au-dessus des lignes rouges. «J'ai divisé le terrain en quatre zones de priorité, indique-t-elle. Nous devrions arriver à couvrir aujourd'hui les zones 1 et 2. Il faudra peut-être reporter les zones 3 et 4 à une prochaine date de mesure.»

Son auditoire – composé de militaires de carrière en uniforme, de miliciens, de fonctionnaires civils de la CENAL et d'Alberto Stabilini, physicien au PSI – l'écoute attentivement. «Des remarques du côté des pilotes?» demande-t-elle. Il n'y en a pas. Dans sa tête, Cristina Poretti se repasse le déroulement de l'exercice. En cas d'urgence radiologique, elle aurait la responsabilité d'une organisation sans accroc.

Cela signifierait planifier la mission, collaborer avec les partenaires de l'armée et des cantons, localiser les zones concernées, puis projeter et prioriser d'autres mesures au sol – le tout sous la direction de sa division. Les vols de mesure annuels servent donc en même temps d'entraînement.

Les pilotes, le chef de soute et l'infrastructure de l'aéroport militaire de Dübendorf sont mis à disposition par l'armée. Des soldats, avec une formation spéciale et une durée de service prolongée, sont convoqués en tant qu'opérateurs. Sur le plan organisationnel, ces miliciens sont subordonnés à la CENAL. «Ces personnes ont, la plupart du temps, un bagage en sciences naturelles et font donc office de spécialistes pendant le vol, explique Cristina Poretti. Comme tout se passe en temps réel, ils peuvent intervenir directement dans le processus de mesure et, au besoin, donner instruction aux pilotes de survoler de nouveau un point donné.»

Et qu'en est-il de la pluie? «La pluie lave les produits de désintégration du radon dans l'air», explique Alberto Stabilini. Le radon est un gaz rare, naturel et radioactif, qui apparaît dans le sol et qui fait partie de la série de désintégration de l'uranium. Si le radon s'échappe dans l'atmosphère, il poursuit sa désintégration, donnant, entre autres, du bismuth et du plomb. Ces produits, dits de «filiation du radon», sont également radioactifs et en suspension dans l'air. En cas d'averse, ils sont lavés de l'atmosphère et s'accumulent au sol. «Lors de l'analyse, cela entraîne une surestimation de la concentration d'uranium dans le sol», relève le chercheur.

Vite et à large échelle

En 1975, l'aéroradiométrie suisse était encore purement militaire: la procédure voulait qu'un soldat équipé d'un compteur Geiger se penche hors de l'hélicoptère pour détecter le rayonnement. En 1986, cette méthode a été utilisée pour la première fois dans le cadre d'un projet de la Commission fédérale de géophysique pour réaliser la cartographie géologique des massifs centraux de l'Aar-Gothard. Un algorithme d'analyse des données a été ensuite développé dans le cadre de deux thèses de doctorat à l'ETH Zurich. A partir de 1994, la direction a été confiée à la CENAL. A cette occasion, le vol a été effectué avec un Super Puma de l'armée suisse, qui permet de conduire des missions même dans des conditions météorologiques difficiles et de nuit.

En 2003, l'expertise scientifique de l'ETH a été transmise au PSI, en coopération avec l'ENSI. Enfin, en 2018, un système de mesure novateur a été mis en service. Depuis, quatre détecteurs ultrasensibles sont disponibles en Suisse sur deux sites, avec

l'électronique et le logiciel correspondants. Un système de ce genre peut être monté en quelques heures à bord d'un Super Puma. L'analyse tient compte de toutes les données de l'hélicoptère, comme les informations GPS, l'altitude et la vitesse de vol. L'hélicoptère et le détecteur «fusionnent» en un seul appareil de mesure, qui fait également office de laboratoire grâce à l'analyse simultanée des données.

Cela permet de mesurer, en l'espace de trois heures et sans escale, une surface pouvant atteindre 100 kilomètres carrés et de déterminer la situation radiologique de cette zone en temps réel. Couplée à un réseau dense de sondes de mesure permanentes au sol ainsi qu'à d'autres équipes et véhicules de mesure, l'aéroradiométrie contribue de manière notable à la protection de la population.

Extraire le maximum de détails

Pendant le vol, Alberto Stabilini reste au sol et travaille en arrière-plan sur son ordinateur portable. Sa fonction est d'intervenir lorsqu'un résultat de mesure n'est pas clair et requiert l'opinion d'un expert. «A 90 mètres d'altitude, la quantité de rayonnement qui parvient au détecteur est faible, explique le physicien. Il arrive que le signal ne puisse pas être imputé clairement à une source.»

Pour la CENAL, l'exploitation des données doit se faire de manière instantanée, car c'est finalement sur cette base que la question sera tranchée: cette source radiologique est-elle cause de danger pour la population, et, le cas échéant, quelles sont les prochaines étapes à suivre? «Pour ce faire, le système est tout à fait suffisant, relève Alberto Stabilini. Mais parfois, il faut examiner les choses de plus près.»

Si les opérateurs et leurs ordinateurs ne parviennent pas à imputer une anomalie à une source ou s'ils ont besoin d'une seconde opinion, ils envoient leur jeu de données à Alberto Stabilini, qui le vérifie à l'aide d'un logiciel spécial. «Ce code a été mis au point par mon prédécesseur, Gernot Butterweck, explique Alberto Stabilini. Il concentre plus de vingt-cinq ans d'expérience, avec des mesures de terrain. En effet, la vitesse, l'altitude, la géométrie du rayonnement et le terrain peuvent influencer le signal. Grâce à ce logiciel, nous parvenons à extraire le maximum d'informations des données brutes.»

Le vol du jour n'a pas révélé d'anomalie. En trois heures, l'équipe est parvenue à cartographier 115 kilomètres carrés. «Une journée de travail réussie», estime Alberto Stabilini. ●

Actualité de la recherche au PSI



1 Une bionanomachine pour la chimie verte

Les scientifiques du PSI ont caractérisé précisément, et pour la première fois, l'isomérase d'oxyde de styrène, une enzyme qui permet de produire des produits chimiques précieux et des précurseurs de médicaments, tout en ménageant l'environnement. Avec deux autres enzymes, elle permet à certaines bactéries environnementales de croître sur le styrène, un hydrocarbure. Lors de cette transformation, l'isomérase d'oxyde de styrène catalyse une étape de réaction spécifique: dans l'oxyde de styrène, elle scinde ce qu'on appelle l'«époxyde», c'est-à-dire un cycle à trois chaînons composé d'un atome d'oxygène et de deux atomes de carbone. Ce faisant, l'enzyme ne génère qu'un seul produit à la fois. Elle peut également convertir une série de substances supplémentaires, engendrant des produits qui sont d'importants précurseurs pour des applications médicales. L'industrie pourrait utiliser cette enzyme pour fabriquer par exemple des précurseurs de médicaments et des produits chimiques primordiaux. Potentiellement, l'enzyme peut être modifiée pour produire toute une série de nouvelles substances. Par ailleurs, elle est très stable et donc utilisable à grande échelle. Elle pourrait devenir un outil essentiel pour l'économie circulaire et la chimie verte.

Informations supplémentaires:
<https://i.psi.ch/4ZW>

2 Réunir pratique médicale et recherche

Les progrès en recherche médicale profitent d'une étroite collaboration entre médecins, d'un côté, et scientifiques, de l'autre. Pour l'encourager, le Kantonsspital Aarau AG, le Kantonsspital Baden AG, la Hirslanden Klinik Aarau AG, l'ETH Zurich, l'Empa et le PSI ont fondé l'Association pour la recherche médicale et l'innovation dans le canton d'Argovie. A l'avenir, les médecins qui travaillent principalement en clinique dans les hôpitaux argoviens pourront déposer une demande de temps de recherche par le biais de cette association. Dans ce cadre de recherche, ils participeront à des projets communs avec les scientifiques de l'ETH Zurich, de l'Empa ou du PSI. L'association compensera, par des contributions financières, les périodes de recherche que les hôpitaux auront rendues possibles. Pour les cinq premières années, l'association touchera 1 million de francs de la part des institutions et des hôpitaux participants (50 %) comme du canton d'Argovie (50 %).

Informations supplémentaires:
<https://i.psi.ch/4ZV>

3 Inauguration du Park Innovaare

Après quatre ans de travaux, un parc de l'innovation a vu le jour à côté du PSI. Le Switzerland Innovation Park Innovaare compte 23 000 mètres carrés de salles blanches, de laboratoires, d'ateliers de précision, de bureaux et de salles de réunion. Le site a été officiellement inauguré fin avril. Aujourd'hui, 80 % des bâtiments sont déjà loués. Le PSI en est à la fois le partenaire stratégique et le premier locataire. L'accès, unique en son genre, à l'infrastructure de recherche, aux grandes installations de recherche et au savoir-faire du PSI apporte aux entreprises sises au Park Innovaare une proximité technologique importante et, en conséquence, une longueur d'avance. La grande compétitivité de la Suisse s'en trouve renforcée. Le Park Innovaare est axé sur quatre domaines: les sciences photoniques et les technologies quantiques; les sciences du vivant; la fabrication avancée (*advanced manufacturing*); enfin, l'énergie et la durabilité.

Informations supplémentaires:
<https://i.psi.ch/52x>



34 ans après sa composition, la chanson «*Face It Alone*» du groupe Queen, qui avait failli disparaître, a été ramenée à la vie grâce à une nouvelle méthode.

0,001 millimètre: telle est la taille des particules magnétiques qui stockent l'information sur les bandes magnétiques.

48 minutes d'un concert de B. B. King, enregistré sur une bande magnétique très dégradée, devraient pouvoir être sauvées.

4 Des rayons X pour sauver la musique

Les scientifiques du PSI ont développé une méthode qui permet de numériser, sans les détruire, des bandes sonores magnétiques de grande valeur historique. À cette fin, ils utilisent la lumière de type rayons X de la Source de Lumière Suisse SLS. Les bandes sonores magnétiques stockent l'information dans une couche de minuscules particules magnétiques, semblables à des aiguilles de boussole qui indiquent soit le nord, soit le sud. Lors de l'enregistrement, leur alignement magnétique change: la bande est magnétisée et l'information audio est désormais stockée physiquement dans le motif d'alignement. Pour relire ce dernier, on le déplace devant une tête de lecture. Comme le champ magnétique est constamment modifié par le motif, une tension est induite dans la tête de lecture et un signal électrique généré, qui peut à son tour être amplifié et converti en signal acoustique. Avec leur méthode aux rayons X, les scientifiques ne misent pas sur le champ magnétique mais sur les aiguilles de boussole qui produisent ce champ. Les états de magnétisation de ces minuscules particules peuvent être lus de manière presque individuelle par le synchrotron et convertis en signal audio de haute qualité.

Informations supplémentaires:
<https://i.psi.ch/4ZU>

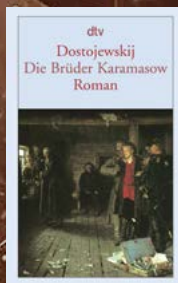


Les livres préférés au PSI

Nous avons demandé aux collaboratrices et collaborateurs du PSI quel était leur livre préféré. Dans cette galerie, nous vous en présentons cinq parmi les nombreuses réponses reçues.



Frères



Federica Marone est scientifique à la ligne de faisceau TOMCAT de la Source de Lumière Suisse SLS. A TOMCAT, des techniques tomographiques permettent de réaliser des images non destructives de la microstructure d'échantillons issus d'un large éventail de domaines de recherche: biomédecine, science des matériaux, géoscience et paléontologie.

Le livre préféré de Federica Marone est l'un des grands romans de la littérature: *Les Frères Karamazov*. Dans cette épique saga familiale, Fiodor Dostoïevski plonge au plus profond de l'âme humaine. Federica nous explique: «J'ai été complètement soufflée par l'actualité de ce drame, vieux de presque cent cinquante ans. Les questions éthiques sur la foi, le doute, la moralité et la liberté y sont abordées avec une telle passion!»



Galaxie

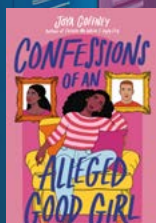


Andreas Spittler travaille comme expert informatique au sein du Service Desk informatique. Lorsque les collaboratrices et collaborateurs du PSI perdent leurs moyens face aux ordinateurs, il les aide à trouver des solutions.

Son livre préféré a été publié en 1979 et s'intitule *Le Guide du voyageur galactique*. Ce roman culte de Douglas Adams n'offre rien de moins que la réponse au sens de la vie! Et pourquoi, Andreas, ce livre te plaît-il tellement? «Je trouve ce livre génial, car il rappelle brillamment l'amitié et la cohésion au travers de rebondissements pleins d'humour, tout en nous permettant d'oublier le côté parfois morose du quotidien. Comme lorsqu'il écrit: «Deux têtes valent mieux qu'une. On s'amuse deux fois plus.»»



Fille



Shawn Bell est assistante au projet de mise à niveau de la Source de Lumière Suisse SLS, appelé SLS 2.0. Lorsque la SLS sera de nouveau opérationnelle en 2025, les performances seront souvent améliorées d'un facteur allant jusqu'à 40.

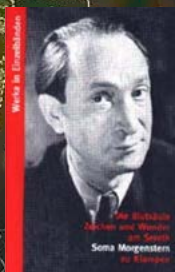
Shawn Bell a découvert son nouveau livre préféré durant l'hiver dernier: *Confessions of an Alleged Good Girl* de Joya Goffney, publié en 2022. Dans ces confessions sur son passage à l'âge adulte, la fille d'un pasteur d'une petite ville texane découvre l'amour, la sexualité et l'indépendance. Shawn nous avoue: «Ce livre m'a fait sentir que j'étais reconnue et que je n'étais pas la seule personne à devoir faire face aux effets destructeurs de la culture de la pureté. Ce type d'histoire n'existait pas lorsque j'avais l'âge du personnage principal, mais je suis heureuse qu'il soit là maintenant pour tous ceux qui traversent une situation similaire.»



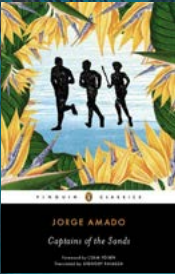
Colonne de sang

Ute D. Mayer est assistante au sein du Center for Nuclear Engineering and Sciences au PSI, le centre de compétence nucléaire suisse.

L'un de ses livres préférés s'intitule *Die Blutsäule* (*La Colonne de sang*). Paru en 1955, il traite de la persécution et du meurtre des Juifs européens dans les années 1930 et 1940 et explore différentes questions: la culpabilité, le sens et la justice. Dans son livre, Soma Morgenstern manie avec une virtuosité impressionnante une langue au style biblique. Ute déclare: «Morgenstern dote la langue allemande d'une diversité et d'une clarté que je n'avais jamais vues auparavant et qui m'ont enthousiasmée. Pour moi, le livre brille par son langage noble et plein de grâce: une œuvre vraiment exceptionnelle!»



Capitaines



Vitor Barrote travaille comme chimiste au laboratoire chaud du PSI, installation de recherche du PSI et seul laboratoire en Suisse qui soit autorisé à manipuler d'importantes quantités de matières radioactives, y compris des combustibles nucléaires commerciaux et expérimentaux.

L'un de ses livres préférés est le sixième roman de l'auteur brésilien à succès Jorge Amado: *Capitaines des sables*. Cette étude de milieu décrit la vie d'adolescents sans-abri qui ont formé un gang à Salvador de Bahia. Vitor explique: «Les livres de Jorge Amado ont tous le même personnage principal: le peuple brésilien. Et, comme le peuple brésilien, ce livre se nourrit de beauté et d'un peu de tristesse.»



Une physicienne des particules en salle de classe

En Suisse, la désintégration des muons n'est pas inscrite au programme scolaire. Giada Rutar, qui a étudié de telles désintégrations pendant son doctorat au PSI, peut néanmoins nourrir son enseignement de certains éléments de sa recherche. Et transmettre son enthousiasme pour la physique.

Texte: Benjamin A. Senn

Les remparts de la Musegg et leurs neuf tours font partie des symboles de la ville de Lucerne. De là, l'on embrasse la ville du regard et l'on voit le lac des Quatre-Cantons, d'un bleu profond, au pied d'un panorama montagneux où se dressent le Pilate et le Rigi, la reine des montagnes. C'est dans cet environnement pittoresque, sous le Schirmerturm, que se trouve le gymnase de la Musegg, où Giada Rutar enseigne la physique et l'informatique.

Très vite, on s'aperçoit que Giada Rutar est une véritable passionnée de physique. Son enthousiasme est contagieux, par exemple lorsqu'elle explique que dans le jeu d'ombres des feuilles d'arbre, ce n'est pas une lumière solaire diffuse qui tombe sur le sol, mais partout de petites images du soleil lui-même. «Un peu comme un sténopé», dit-elle. Au départ, pourtant, il n'était pas clair qu'elle ferait profession d'enseigner et de transmettre cet enthousiasme, alors qu'elle voulait s'occuper de physique pour étudier ces phénomènes et les comprendre. Rien d'étonnant, donc, à ce qu'elle se soit attelée à une thèse de doctorat, sitôt son diplôme de physique en poche – c'est ainsi qu'elle est arrivée au PSI en 2013.

Son domaine de recherche, elle l'a trouvé au Center for Neutron and Muon Sciences. Avec son mentor, Angela Papa, elle-même spécialisée dans la physique des particules, elle a entrepris de chercher des désintégrations rares de muons. Les muons sont des particules élémentaires exotiques à durée de vie très brève, qui se désintègrent en particules plus stables, presque immédiatement après être apparus. Mais les voies de désintégration qu'ils empruntent peuvent être très différentes.

Giada Rutar étudiait une désintégration bien particulière, qui n'existe qu'en théorie. «Notre expérience visait à détecter la désintégration MEG», explique-t-elle. MEG est l'acronyme de muon-électron-gamma, autrement dit la désintégration du muon en un électron et un photon, désigné par la lettre grecque gamma. «Cette voie de désintégration, c'est un peu

le Graal de la physique des particules, poursuit l'ancienne chercheuse. La découvrir reviendrait à révéler une physique complètement nouvelle, au-delà du modèle standard.» Mais, si elle existait, la désintégration MEG serait extrêmement rare. «Les chances de la découvrir sont inférieures à une valeur de 1 à 3,2 millions de milliards, soit environ 650 000 fois moins que de décrocher la timbale au Loto suisse.»

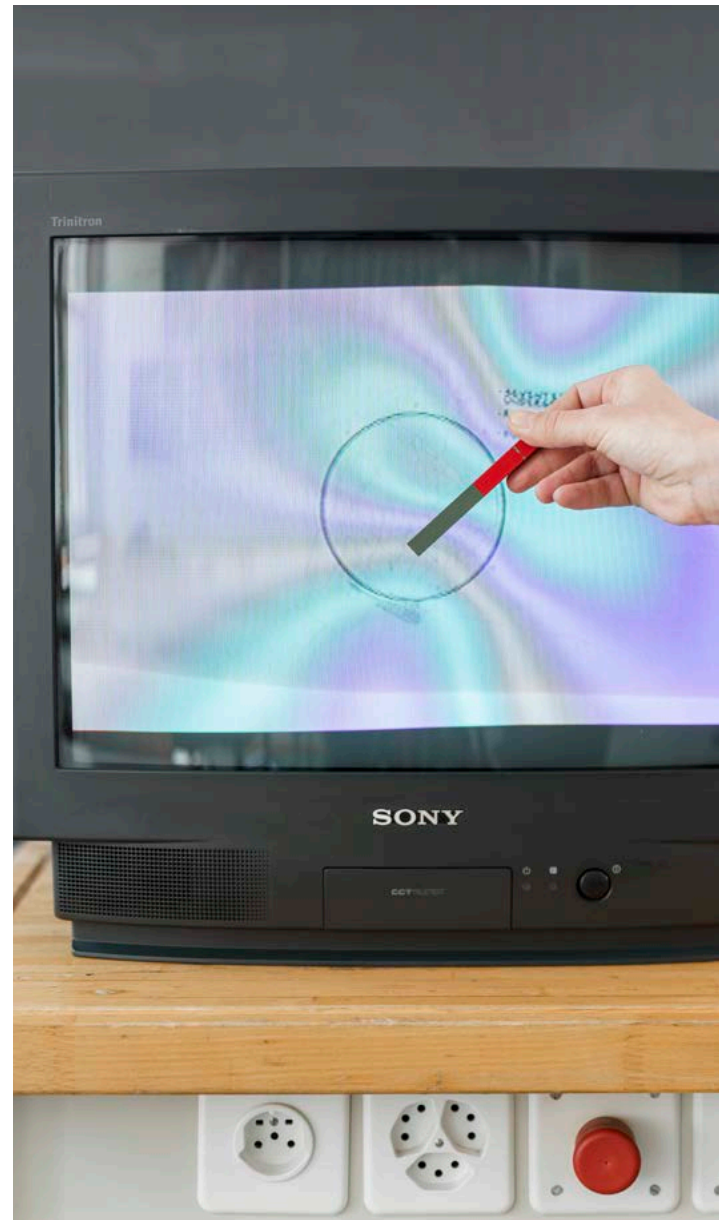
Le PSI abrite l'une des installations de muons les plus puissantes au monde, où l'on peut observer quelque 30 millions de désintégrations de muons par seconde. Des conditions parfaites pour détecter une désintégration aussi rare. Mais, étant donné ce taux de désintégrations élevé, il est besoin de détecteurs suffisamment rapides. Or, ces appareils n'existaient pas sur le marché et Giada Rutar a fait avancer leur développement pendant sa thèse de doctorat. En outre, il a fallu calibrer des expériences et analyser la montagne de données au moyen des logiciels correspondants. «Tout cela était extrêmement intéressant et varié», se souvient-elle.

Pourquoi, dans ce cas, n'a-t-elle pas poursuivi sa carrière académique? «Le moment était tout simplement venu de tenter quelque chose de nouveau, répond-elle. Et je trouvais que le métier d'enseignante avait du sens.» Giada Rutar a donc entamé, directement après son doctorat, un cursus pour obtenir son diplôme de professeur à l'ETH Zurich et s'est mise à enseigner. «Je me réjouissais de faire quelque chose de nouveau, poursuit-elle. Mais, en même temps, j'étais aussi un peu mélancolique: le travail au PSI me plaisait beaucoup et j'avais des collègues formidables. Je me rappelle que, lors de mon dernier jour, il y avait un arc-en-ciel au-dessus du PSI. Totalement kitsch, comme dans un film de Bollywood», ajoute-t-elle en souriant.

Transmettre le plaisir de faire de la physique

Au gymnase de la Musegg, les expériences sont un peu plus digestes qu'au PSI: pas de grande installation





«Je veux transmettre le plaisir de faire de la physique et montrer que c'est un domaine où l'on peut aussi réussir en tant que femme.»

Giada Rutar, enseignante de physique et d'informatique à l'école cantonale Musegg

de recherche complexe, moins de câbles enchevêtrés et pas d'ensemble embrouillé de données à examiner pour y déceler certains pics. «Ici, l'idée est d'appréhender la physique avec nos propres sens et de chercher des explications de manière autonome», explique Giada Rutar. Elle dispose d'une petite collection d'expériences qui l'aident à rendre tangibles différents phénomènes.

Dans le cadre d'un cours du type «*bring your own device*», lors duquel les élèves sont priés d'apporter leur ordinateur portable ou leur tablette, un appareil détonne particulièrement : un ancien téléviseur à tube cathodique. «Nous avons grandi avec ce genre d'engin, mais, pour la plupart de mes élèves, c'est une pièce de musée, dit-elle en riant. Pourtant, il permet de visualiser magnifiquement la déviation des électrons par un champ magnétique.»

L'écran d'un téléviseur à tube cathodique est composé de petits points fluorescents qui s'allument lorsqu'un électron les touche. Pour générer une image en couleur, on utilise trois faisceaux d'électrons différents pour les couleurs primaires rouge, vert et bleu. Ces rayons sont dirigés simultanément vers un point de l'image, chaque rayon faisant briller sa couleur respective. En combinant les trois couleurs, il est possible de représenter le spectre de couleurs souhaité.

Giada Rutar prend un aimant qu'elle pose sur l'écran. L'image d'origine devient instantanément floue et les couleurs se diffractent en motif psychédélique. «Comme les neutrons possèdent une charge négative, ils sont détournés par l'aimant et arrivent au mauvais endroit sur l'écran, explique-t-elle. L'image se couvre alors de taches colorées. A la SLS aussi, on utilise des aimants pour diriger les électrons sur leurs trajectoires circulaires.»

Un simple CD – lui aussi une pièce de musée d'une époque numérique révolue – suffit pour visualiser des phénomènes physiques. Tout le monde connaît le motif en arc-en-ciel de la face inférieure des CD disponibles dans le commerce. «Ici, la lumière blanche du soleil est décomposée en couleurs spectrales», explique Giada Rutar. Mais cette décomposition peut être démontrée par d'autres moyens que la lumière du soleil : «Chaque élément émet un spectre très caractéristique, lorsqu'on le chauffe par exemple», rappelle-t-elle

Cette «empreinte digitale» des éléments permet de tirer des conclusions sur la composition chimique d'une substance. «De cette façon, nous pouvons également déterminer les éléments que contiennent les étoiles.» Giada Rutar démontre l'effet avec une lampe au néon. «Là aussi, nous voyons une sorte d'arc-en-ciel, dit-elle. Il est simplement composé de couleurs rouge orangé, qui sont caractéristiques de l'élément néon.»

Voyage scolaire au PSI

Voici sept ans que Giada Rutar travaille au gymnase de la Musegg. Comme elle est née à Lucerne et qu'elle y a grandi, cet emploi représente une sorte de retour aux sources. «J'ai aussi fait mon gymnase à Lucerne. Pas à la Musegg, mais à l'Alpenquai, de l'autre côté du lac.»

Se retirer de la recherche ne signifiait pas seulement un retour au pays, mais un nouveau «*work-life-balance*» et, tout à coup, plus de temps pour elle-même. «J'adore la recherche et je faisais mon travail avec passion, souligne Giada Rutar. Mais le fait est que la science exige beaucoup de vous. Il faut s'engager pleinement et aller parfois au-delà de ses limites, si l'on veut réussir. S'y ajoute la nécessité d'être très mobile. Les chances de décrocher un emploi permanent sont minces. Dans l'ensemble, tout cela n'était pas conciliable avec mes projets de vie.»

En tant qu'enseignante, elle n'est plus confrontée à ces inconvénients. Elle a enfin un peu de temps pour ses hobbies. Giada Rutar joue de la flûte à bec dans un ensemble. Pas de la petite flûte à bec des cours de musique pour enfants, mais de celle qui permet de jouer toutes les tonalités exotiques possibles: «De la basse au soprano, précise-t-elle. Nous sommes quatre et nous faisons de la musique ancienne.» En décembre 2023, elle est devenue maman: «Là aussi, je suis reconnaissante à mon métier d'enseignante pour la flexibilité qu'il me donne et la possibilité qu'il m'offre de concilier vie professionnelle et vie familiale», souligne la jeune mère de famille avec fierté. Elle a d'ailleurs rencontré son mari au PSI: il travaillait également à l'expérience MEG.

Giada Rutar est toujours en contact avec son ancien employeur, en dépit de la distance qui la sépare de Villigen. Elle y organise, au moins une fois par an, une excursion d'un jour avec sa classe. Au programme: le PSI Visitor Center, le labo des élèves iLab et les grandes installations de recherche – tout inclus. «L'expérience peut se révéler très inspirante, raconte-t-elle. L'une de mes élèves s'est ainsi découvert une passion pour la matière au Centre de protonthérapie et fait actuellement des études de physique pour devenir physicienne médicale.»

Et c'est également une motivation dans son métier: enthousiasmer et inspirer de jeunes gens, surtout des jeunes femmes, qui restent encore en minorité dans cette discipline. «Je veux leur transmettre le plaisir de faire de la physique et leur montrer que c'est un domaine où l'on peut aussi réussir en tant que femme», conclut-elle. ●

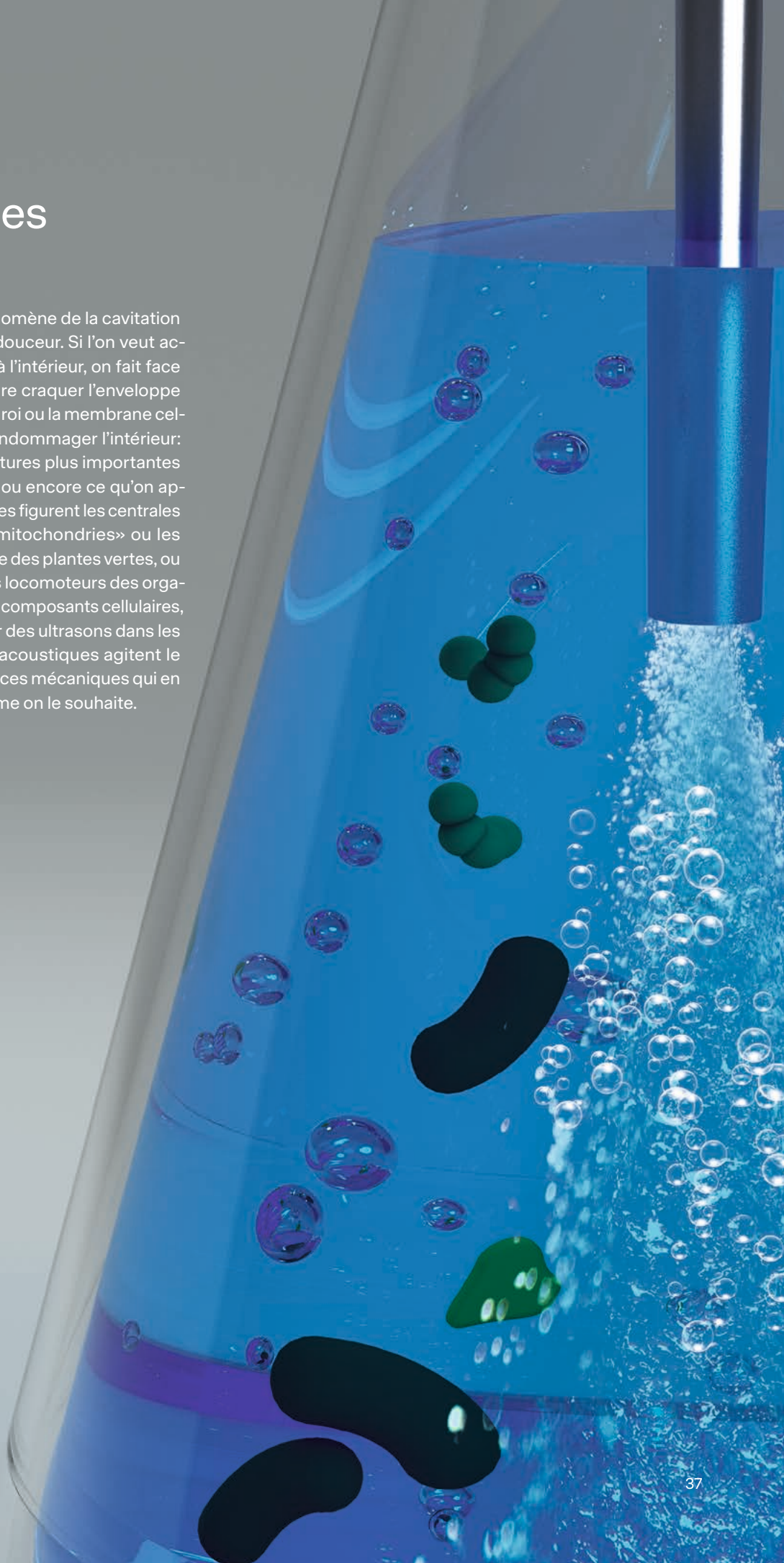


Limite de vitesse pour les dauphins

Lorsque les liquides sont agités, leur pression statique baisse, dit une loi physique. Si cette pression tombe au-dessous de ce qu'on appelle la «pression de vapeur des gaz dissous», de petites bulles de vapeur se forment. Si le courant les ramène dans une zone où la pression statique est plus élevée, ces bulles implosent brusquement. Cela provoque d'énormes ondes de choc, qui déploient une force destructrice. C'est ce que les dauphins ressentent lorsqu'ils nagent trop rapidement et qu'ils frappent l'eau de leur nageoire caudale. Le phénomène de cavitation affecte alors cette même nageoire et y provoque des lésions tissulaires douloureuses. Les scientifiques ont calculé que la vitesse maximale des dauphins à la surface de l'eau est de 54 kilomètres à l'heure. D'autres poissons peuvent nager plus vite, car leur nageoire caudale, en règle générale, n'est pas innervée. Ils ne sentent donc rien à cet endroit. On a découvert, sur les nageoires des thons, des dommages similaires à ceux que l'on trouve sur les hélices de bateaux ou les turbines abîmées par la cavitation.

Casser les cellules en douceur

Au PSI, les scientifiques utilisent le phénomène de la cavitation pour ouvrir les cellules biologiques en douceur. Si l'on veut accéder aux composants qui se trouvent à l'intérieur, on fait face à un dilemme: d'un côté, on aimerait faire craquer l'enveloppe protectrice extérieure, par exemple la paroi ou la membrane cellulaire; mais de l'autre, on ne veut pas endommager l'intérieur: des molécules spécifiques ou des structures plus importantes composées de nombreuses molécules ou encore ce qu'on appelle des «organelles». Parmi ces dernières figurent les centrales énergétiques de la cellule appelées «mitochondries» ou les chloroplastes, où se fait la photosynthèse des plantes vertes, ou encore les flagelles, qui sont les organes locomoteurs des organismes unicellulaires. Pour accéder à ces composants cellulaires, une méthode a fait ses preuves: envoyer des ultrasons dans les liquides à l'aide de sondes. Les ondes acoustiques agitent le liquide et la cavitation se produit. Les forces mécaniques qui en résultent ouvrent alors les cellules comme on le souhaite.



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



5232 est l'adresse où l'on fait de la recherche en Suisse à de grandes installations de recherche. Car l'Institut Paul Scherrer PSI a son propre code postal. Une particularité justifiée, d'après nous, pour un institut qui s'étire sur 342 000 mètres carrés, qui possède son propre pont sur l'Aar et qui compte 2300 collaboratrices et collaborateurs, autrement dit plus d'employés que certains villages des environs n'ont d'habitants.

Le PSI est sis dans le canton d'Argovie, sur les deux rives de l'Aar, entre les communes de Villigen et de Würenligen. C'est un institut de recherche fédéral pour les sciences naturelles et les sciences de l'ingénieur, qui fait partie du domaine des Ecoles polytechniques fédérales (EPF), les autres membres étant l'ETH Zurich, l'EPF Lausanne, l'Eawag, l'Empa et le WSL. Avec

notre recherche fondamentale et notre recherche appliquée, nous œuvrons à l'élaboration de solutions durables pour répondre à des questions majeures, tant sociétales que scientifiques et économiques.

De grandes installations de recherche complexes

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

De nombreux scientifiques, actifs dans les disciplines les plus diverses, ont la possibilité de faire des découvertes essentielles pour leur travail en menant des



expériences à nos grandes installations de recherche. En même temps, la construction et l'exploitation d'installations pareilles sont si complexes et coûteuses qu'au niveau de leur propre infrastructure les groupes de recherche dans les hautes écoles et dans l'industrie ne peuvent pas disposer de ce genre d'instruments de mesure. C'est pourquoi nos installations sont ouvertes à tous les scientifiques.

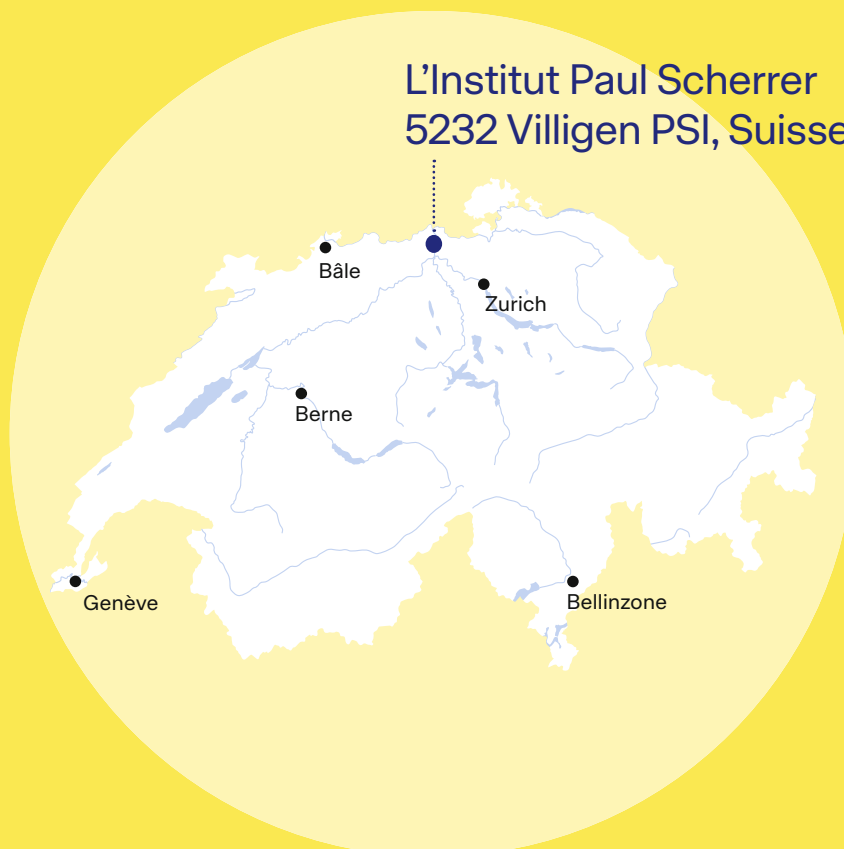
S'ils veulent obtenir du temps de mesure pour leurs expériences, les scientifiques de Suisse et de l'étranger doivent toutefois faire acte de candidature auprès du PSI. Le comité de sélection, composé d'experts, évalue ces demandes en fonction de leur qualité scientifique et recommande au PSI les scientifiques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

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

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

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

L'Institut Paul Scherrer 5232 Villigen PSI, Suisse



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

3000
scientifiques du monde entier
mènent chaque année
des expériences à ces grandes
installations de recherche

5
grandes installations de recherche
uniques en Suisse

Nos quatre principaux domaines de recherche

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

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

Notre propre recherche se concentre sur quatre points principaux. Dans le domaine Technologies d'avenir, nous étudions les multiples propriétés des matériaux. Avec ces connaissances, nous créons les bases de nouvelles applications – que ce soit en médecine, dans

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

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

Dans le domaine Innovation santé, les chercheuses et les chercheurs s'efforcent d'identifier les causes de certaines maladies et les méthodes thérapeutiques possibles. Par ailleurs, nous exploitons la seule installation de Suisse permettant de traiter des maladies cancéreuses spécifiques avec des protons. Cette méthode, particulièrement peu agressive, permet de détruire les tumeurs de manière ciblée, tout en préservant la quasi-totalité des tissus sains environnants.

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

Les cerveaux derrière les machines

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

Impressum

5232 – Le magazine de l'Institut Paul Scherrer

Paraît deux fois par an.
Numéro 2/2024 (septembre 2024)
ISSN 2571-6891

Editeur

Institut Paul Scherrer
Forschungsstrasse 111
5232 Villigen PSI
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

Concept de design

Scholtysik & Partner AG et
Studio HübnerBraun

Conception, direction artistique et mise en page

Studio HübnerBraun

Photos

Institut Paul Scherrer PSI /
Markus Fischer et Mahir Dzambegovic
sauf: page 14: Flughafen Zürich.

Génération d'images par IA

Couverture, pages 3, 6, 7, 9, 10, 13:
Adobe Stock (KI);
pages 26–31: Midjourney par Studio
HübnerBraun.

Infographies

Studio HübnerBraun,
sauf: page 36, 37: Daniela Leitner.

Pour en savoir plus sur le PSI

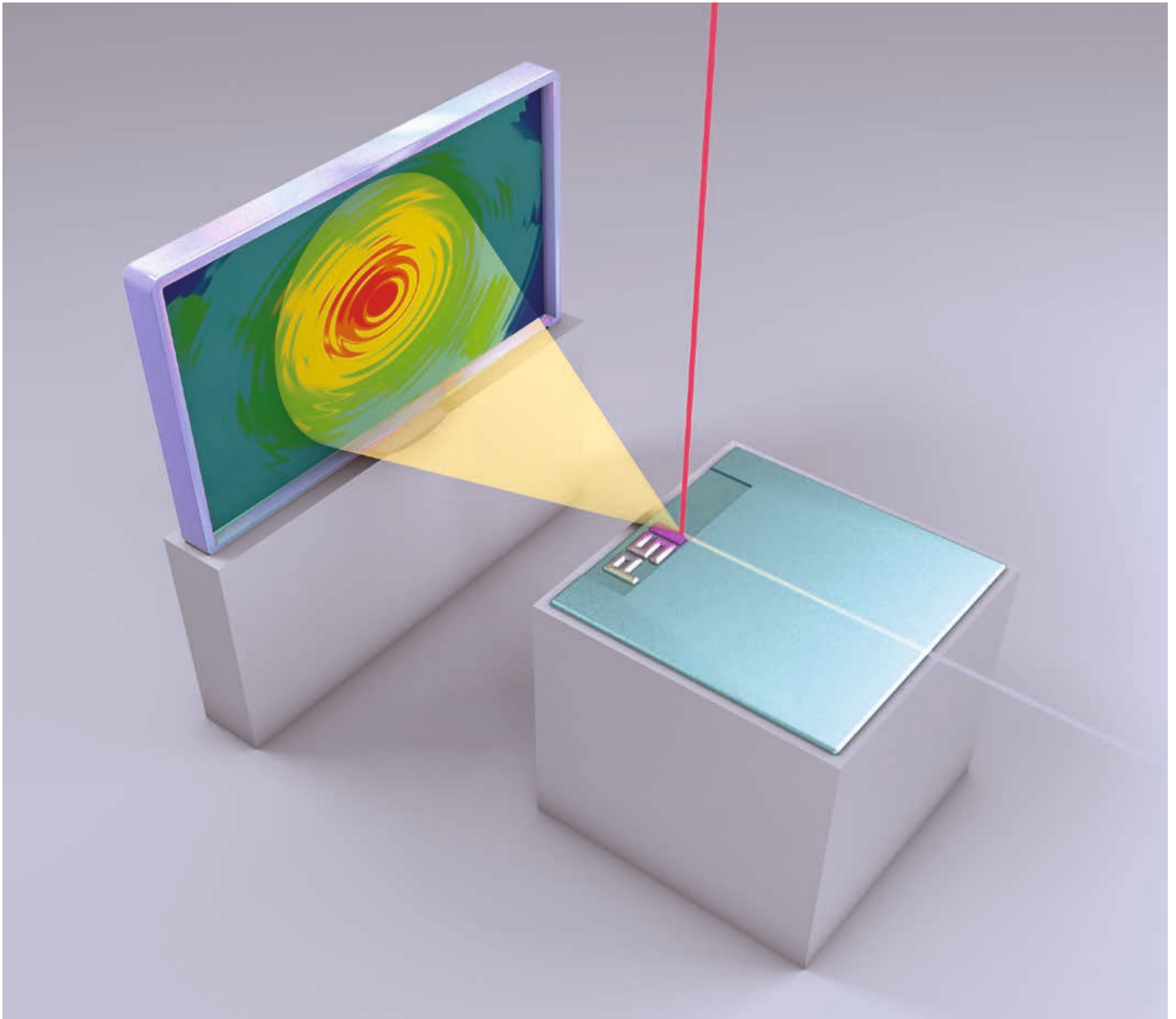
www.psi.ch/fr/

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



Ce qui vous attend dans le prochain numéro

Tout objectif, quel qu'il soit, requiert souvent des technologies, des procédés et des matériaux innovants. La recherche et le développement de méthodes de production avancées sont donc essentiels pour nous fournir les outils nécessaires. Dans ce domaine connu sous le nom de «fabrication avancée», nous travaillons, au PSI, en étroite collaboration avec des scientifiques internationaux pour développer des solutions aux multiples défis auxquels la Suisse et d'autres pays du monde sont confrontés. Dans ce numéro, vous découvrirez quelques-unes de ces avancées captivantes: de l'impression 3D pour la fabrication de semi-conducteurs au développement de nouveaux matériaux, en passant par le verre intelligent ou l'épiderme sensible destiné aux robots.



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