

DOSSIER

LA MOBILITÉ DE DEMAIN

Le magazine de l'Institut Paul Scherrer

01 / 2020

2025



DOSSIER: LA MOBILITÉ DE DEMAIN



1

TOILE DE FOND

Des rayons X pour améliorer les propulsions des véhicules

Les grandes installations de recherche du PSI permettent de scruter précisément ce qui se passe dans les moteurs et d'optimiser les propulsions des modèles de demain.

Page 10



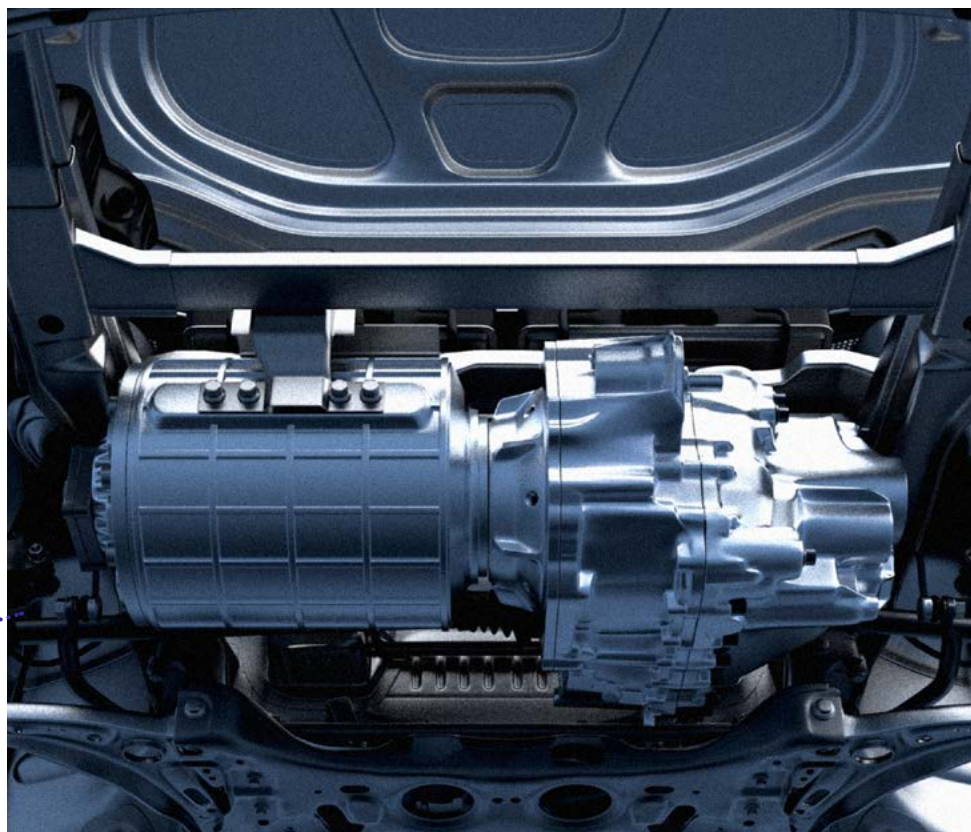
ÉTUDE

Priorité aux voitures électriques

Au terme d'une étude de bilan complexe, les chercheurs du PSI ont identifié le type de propulsion le plus écologique pour les véhicules individuels. Pour aujourd'hui et dans vingt ans.

Page 18

3





2

INFOGRAPHIE

L'«empreinte écologique» des véhicules individuels

À essence, diesel, à pile à combustible ou tout électrique – quelle voiture a le plus d'avenir? Une infographie montre le résultat du bilan écologique établi au PSI.

Page 16

CONTENU

QUESTIONS-RÉPONSES	
Trois questions à Thierry Strässle	4
LE PRODUIT	
Les médicaments	6
L'AUXILIAIRE	
Le ruban adhésif	7
DOSSIER:	
LA MOBILITÉ DE DEMAIN	8
 TOILE DE FOND	
Des rayons X pour améliorer les propulsions des véhicules	10
 INFOGRAPHIE	
L'«empreinte écologique» des véhicules individuels	16
 ÉTUDE	
Priorité aux véhicules électriques	18
EN IMAGE	
Masako Yamada	21
AILLEURS EN SUISSE	
Détecter les sources radioactives dans le transport de marchandises	22
Le PSI effectue régulièrement des contrôles aux postes-frontières et en d'autres endroits, pour déterminer si les camions ont un chargement rayonnant à bord.	
EN BREF	
Actualité de la recherche au PSI	26
1 Dans les glaces du pôle Nord	
2 Empêcher les tumeurs de métastaser	
3 Microrobots intelligents	
 GALERIE	
Mobile au PSI	28
PORTRAIT	
Pour une vue d'ensemble	34
Au PSI, Alexander Röder développait des modèles pour des bilans écologiques. Aujourd'hui, il dirige l'Institut Bâtiment et environnement à Berlin.	
QUI SOMMES-NOUS?	38
IMPRESSUM	40
DANS LE PROCHAIN NUMÉRO	41

The background of the page features a blurred image of a modern building with large windows on the left and a red bicycle-sharing station with the 'OHSB' logo on the right. A person's leg and a bicycle wheel are visible in the lower right corner.

1

Thierry Strässle, en matière de mobilité écologique, est-ce que le PSI donne l'exemple?

Oui. Le PSI s'est doté d'un concept de mobilité qui inclut par exemple une bonne desserte de bus et la prise en charge des coûts de l'abonnement à demi-tarif des CFF pour tous les collaborateurs. Comme la demande est importante, nous mettons aussi toujours plus de range-vélos à disposition. Quant à ceux qui viennent malgré tout en voiture, il y a suffisamment de stations de recharge pour les voitures électriques. Nous avons pris des mesures et nous montrons ainsi que, de ce point de vue en tout cas, rien ne s'oppose à l'acquisition d'un véhicule électrique individuel. Enfin, nous créons des incitations: seules les voitures dotées d'un moteur à combustion sont soumises à des frais de stationnement; celles et ceux qui viennent à vélo ou en bus touchent un écobonus. Par ailleurs, la flotte de véhicules du PSI est actuellement en train de passer à la mobilité électrique.

2

Toutes ces mesures sont-elles liées à la recherche que conduit le PSI dans le domaine de la mobilité?

C'est surtout lié au fait qu'en tant qu'institut fédéral, nous estimons que nous avons une responsabilité sociale et que nous devons donner l'exemple. De nombreux chercheurs du PSI, qui travaillent par exemple dans le domaine de l'énergie et de l'environnement, ont aussi l'ambition d'aménager leur quotidien dans le respect de l'environnement. Durant leur temps de travail, ils peaufinent des détails qui contribueront à rendre plus durable le futur du paysage énergétique et, notamment, de la mobilité.

3

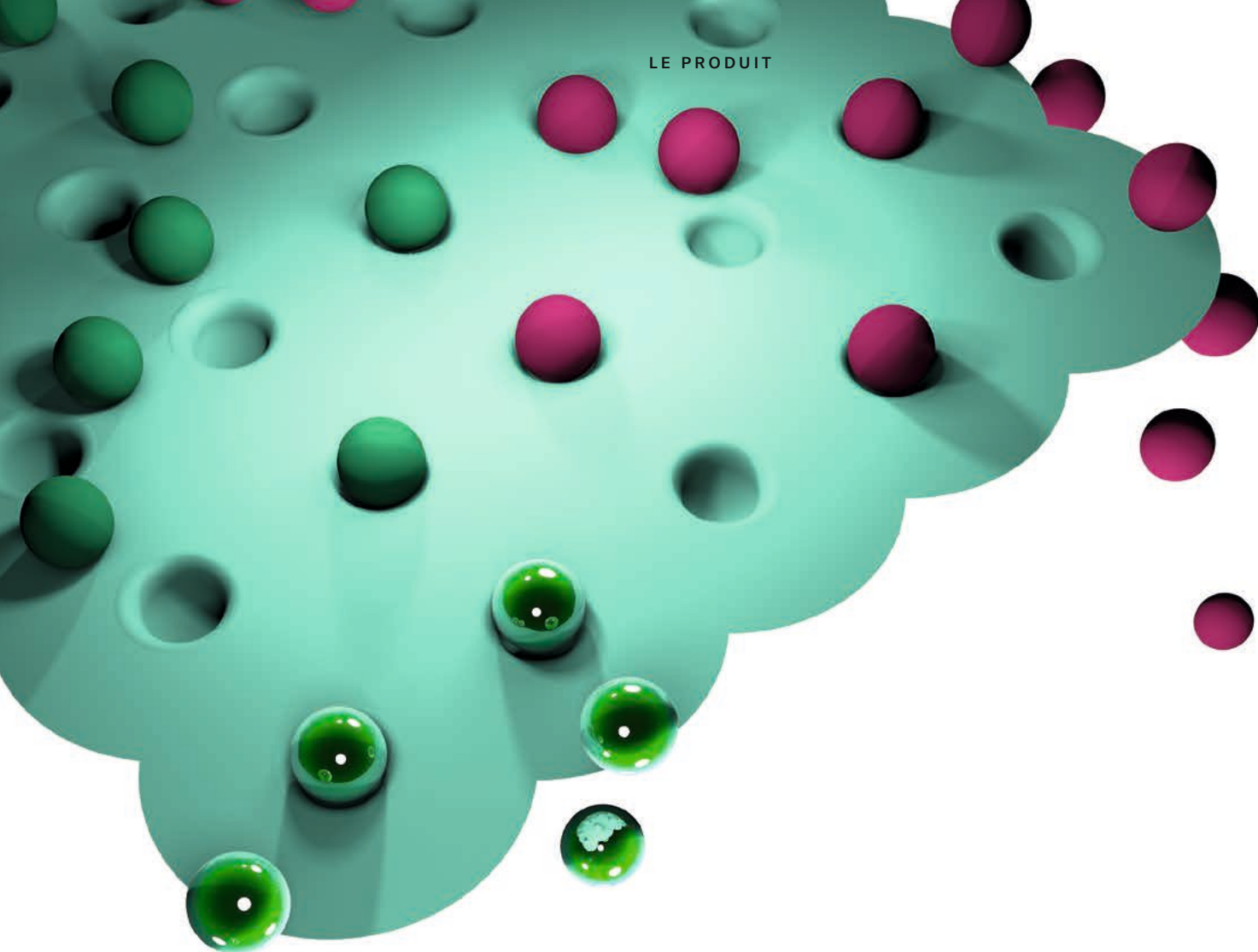
La recherche au PSI va-t-elle révolutionner la mobilité en Suisse?

Révolutionner, peut-être pas. Mais nous contribuons à ce que nous restions mobiles dans l'avenir – et ce de manière écologique. Le plus souvent, nous nous concentrons sur la recherche de certains fondamentaux, par exemple, dans le domaine des nouveaux matériaux pour une mobilité plus durable. Nos grandes installations de recherche, uniques en Suisse, au moyen desquelles nous analysons ces matériaux, nous aident dans cette entreprise. A cela s'ajoutent nos nombreuses coopérations avec de hautes écoles et d'autres centres de recherche en Suisse – dont l'Empa, le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche, qui travaille sur des prototypes concrets: par exemple, des voitures électriques en exploitation. Il s'agit d'une coopération exemplaire qui se déroule sous l'égide du Domaine des EPF: ensemble, nous faisons bouger les choses dès aujourd'hui.

Trois questions à Thierry Strässle

Une mobilité écologique est essentielle au succès d'une politique climatique. En Suisse, les transports sont responsables d'environ un tiers des émissions de gaz à effet de serre. Les chercheurs du PSI contribuent à rendre les véhicules du futur plus propres. Thierry Strässle, directeur *ad intérim*, explique ce qui motive les chercheurs.





Certaines analyses menées au PSI pourraient servir un jour à améliorer des produits du quotidien. Exemple.

Les médicaments

Les principes actifs des médicaments sont, la plupart du temps, de grandes molécules disponibles en deux variantes qui, au niveau de leur forme, sont le reflet l'une de l'autre. Le point problématique est que notre organisme peut réagir de manière très différente à chacune d'elles: si l'une soigne ou soulage, l'autre peut se révéler dangereuse. C'est pourquoi, lorsque les principes actifs existent sous deux formes – les spécialistes parlent d'«énantiomères» –, on les sépare aujourd'hui soigneusement l'une de l'autre. Un processus long et coûteux.

On imagine qu'à l'avenir ce processus pourra se faire à l'aide d'une espèce de nanotamis. Les chercheurs du PSI étudient des regroupements de certaines molécules qui laissent de petits trous dans leur réseau plat. À travers ces pores, chimiquement spécifiques, seule une variante du principe actif pourrait être transformée, tandis que la variante miroir serait pour ainsi dire filtrée. La méthode permettrait de séparer plus efficacement les bonnes variantes des principes actifs pharmaceutiques de celles qui sont nocives.

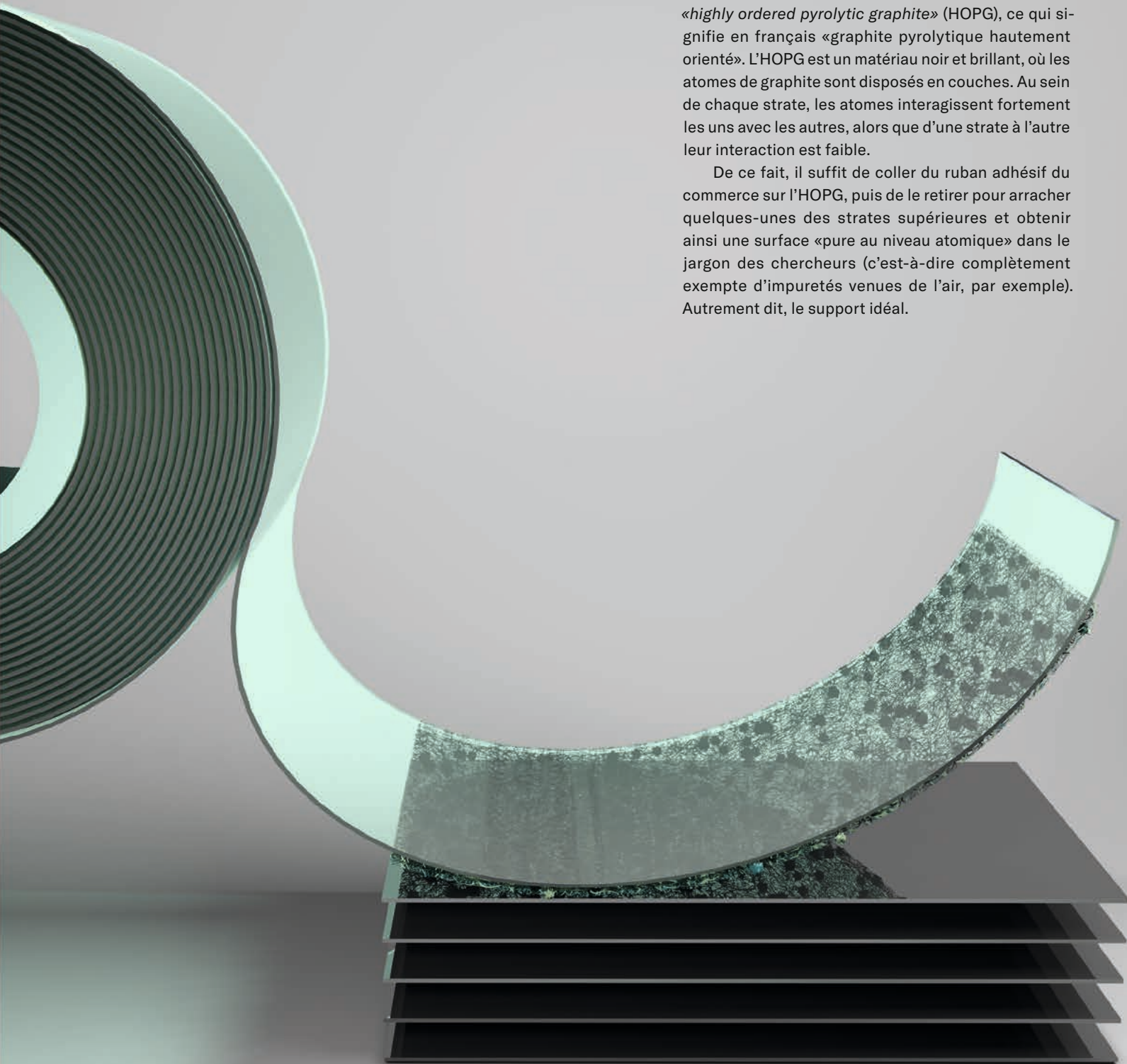
La recherche de pointe recourt parfois à des auxiliaires étonnamment ordinaires. Exemple.

Le ruban adhésif

Pour de nombreuses analyses, il est avant tout nécessaire de disposer d'un support extrêmement propre sur lequel placer l'échantillon. Les chercheurs au PSI – qui étudient des molécules susceptibles d'être utilisées comme nanotamis pour des principes actifs médicamenteux – sont très exigeants sur ce point: ils ont, eux aussi, besoin d'une surface lisse et propre. Ce qu'ils obtiennent grâce à deux ingrédients: du graphite sous une forme particulière et du ruban adhésif.

Ce graphite particulier est ce qu'on appelle du «*highly ordered pyrolytic graphite*» (HOPG), ce qui signifie en français «graphite pyrolytique hautement orienté». L'HOPG est un matériau noir et brillant, où les atomes de graphite sont disposés en couches. Au sein de chaque strate, les atomes interagissent fortement les uns avec les autres, alors que d'une strate à l'autre leur interaction est faible.

De ce fait, il suffit de coller du ruban adhésif du commerce sur l'HOPG, puis de le retirer pour arracher quelques-unes des strates supérieures et obtenir ainsi une surface «pure au niveau atomique» dans le jargon des chercheurs (c'est-à-dire complètement exempte d'impuretés venues de l'air, par exemple). Autrement dit, le support idéal.



1

TOILE DE FOND

Des rayons X pour améliorer
les propulsions des véhicules

Page 10

2

INFOGRAPHIE

L'«empreinte écologique»
des véhicules individuels

Page 16

DOSSIER

La mobilité de demain

L'augmentation du trafic, la pollution et le changement climatique ont rendu nécessaire une révolution technique sur nos routes. Ce futur a déjà commencé. Mais il faudra encore beaucoup de travaux de recherche pour rendre les propulsions électriques, les piles à combustible et les moteurs à gaz à la fois véritablement concurrentiels et dénués d'impact négatif sur le climat. Au PSI, plusieurs groupes y travaillent.

3

ÉTUDE

Priorité aux véhicules électriques

Page 18



Des rayons X pour améliorer les propulsions des véhicules

Relever les défis de l'avenir, pour le trafic routier suisse, va surtout demander des efforts de recherche.

Aux grandes installations du PSI, des chimistes et des ingénieurs étudient comment rendre les propulsions des véhicules plus efficaces et moins polluantes.

Texte: Jan Berndorff



Les véhicules diesels sont sous le feu des critiques en raison de leurs émissions polluantes. Les chercheurs du PSI ont découvert comment certains catalyseurs permettent de mieux réduire ces émissions de gaz nocifs.

«Le système global des transports suisses en 2040 sera efficient à tous points de vue.» Tel est l'objectif stratégique du Département de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC). L'idée serait que le trafic pèse moins sur l'environnement, qu'il soit plus efficace et qu'il ménage le climat, précise encore l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Cela devrait permettre d'atteindre un objectif ambitieux: la Suisse vise la neutralité carbone d'ici à 2050.

Le défi est de taille. D'après le dernier Microrecensement mobilité et transports de 2015, toute personne vivant en Suisse parcourt quelque 24 850 kilomètres par an, voyages à l'étranger inclus. Si l'on se limite aux trajets effectués en Suisse, cela représente en moyenne près de 37 kilomètres parcourus chaque jour – et la tendance est à la hausse.

D'après l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), les trois quarts des émissions de gaz à effet de serre, dans le secteur des transports, sont dus aux véhicules

cycle de vie des véhicules, de la production à l'élimination (voir p. 16 et suivantes). Ces dernières années, ce sont surtout les véhicules diesels qui se sont retrouvés sous le feu des critiques, en raison des quantités importantes d'oxydes d'azote, nocifs pour la santé, qu'ils rejettent. Davide Ferri et Maarten Nachtegaal, chercheurs au PSI, ont découvert un moyen de réduire considérablement ces émissions. Aujourd'hui, nombre de véhicules diesels roulent déjà avec l'adjuvant connu sous le nom de marque AdBlue. Une fois injecté dans les gaz d'échappement, ce dernier est dégradé sous forme d'ammoniac, lequel réagit avec les oxydes d'azote grâce à un catalyseur. On obtient alors deux substances inoffensives: de l'azote et de l'eau. Toutefois, le principe ne fonctionne de manière efficace que si les gaz d'échappement atteignent une température supérieure à 200°C. Il reste donc beaucoup d'oxyde d'azote pendant les premières minutes de démarrage et lors des froides journées d'hiver.

Les chercheurs ont examiné le matériau catalytique (un composé cuivre-zéolithe) à la lumière concentrée de type rayons X de la Source de Lumière Suisse SLS. Ils ont découvert qu'à basses températures un excès d'ammoniac diminue la performance du cuivre. L'étude des chercheurs du PSI a finalement montré que, pour optimiser cette action, il fallait injecter différentes quantités d'ammoniac en fonction de la température et du moment d'utilisation. Cette méthode permet de réduire jusqu'à 90 % les émissions d'oxyde d'azote.

Néanmoins, le moteur diesel a toujours un effet négatif sur le climat – plus encore que le moteur à essence – en raison de sa grosse consommation de carburant. Pour réduire radicalement cet impact, d'autres technologies sont nécessaires, qui n'émettront, si possible, aucun gaz nocif.

Dans cette perspective, on pense naturellement aux moteurs électriques. Au PSI, d'importants efforts de recherche sont consentis en vue d'améliorer cette technologie, notamment son autonomie, et de remplacer bientôt, de manière adéquate, les moteurs diesels et à essence. Deux questions – auxquelles tentent de répondre les chercheurs du PSI – sont liées à la batterie de ces véhicules électriques: quel est l'électrolyte qui transmet le mieux la charge dans un accumulateur? Et pour atteindre une densité énergétique maximale, sans accroître le risque d'explosion de la batterie, quelle doit être la composition des électrodes? Résoudre ces deux interrogations permettrait déjà d'améliorer nettement l'autonomie des voitures électriques équipées de batteries lithium-ion classiques.

Dans le cadre d'un projet commun avec l'entreprise chimique BASF, une équipe menée par Sigita Trabesinger, chimiste au PSI, se consacre à la proportion de métaux de transition qui se trouve dans l'électrode positive, la cathode, de la batterie. Sigita Trabesinger cherche à connaître l'effet des variations de composition sur la stabilité et la sécurité de la batterie. La composition la



La recherche de Davide Ferri se concentre sur des catalyseurs semblables à ceux qui équipent les véhicules diesels ou au gaz naturel.



individuels, aux poids lourds et aux bus. La réalisation de cet objectif dépendra donc, pour l'essentiel, des propulsions de ces différents moyens de transport. Leurs émissions de CO₂ devront être réduites de manière radicale. Et c'est précisément à quoi travaillent les chercheurs au PSI.

Christian Bauer et Brian Cox, du Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques au PSI, ont déterminé, dans le cadre d'une étude, les quantités de gaz d'échappement – en particulier de gaz à effet de serre – que produisent actuellement les différents types de propulsions des véhicules individuels et les quantités qu'ils produiront en 2040, si l'on se fonde sur les tendances actuelles. Pour ce faire, ils ont considéré l'ensemble du

Actuellement, les voitures électriques sont surtout idéales pour les trajets en ville, car leur autonomie est limitée. Les chercheurs du PSI travaillent à améliorer celle-ci.



plus courante est la suivante: différentes parts de nickel, de manganèse et de cobalt, d'où son abréviation en NMC. «Le but est d'augmenter la part de nickel et de réduire autant que possible celle de cobalt», explique Sigita Trabesinger.

Car, en plus d'être toxique, le cobalt est rare et cher. Il est extrait notamment au Congo, dans des conditions sociales et écologiques discutables. Par ailleurs, sur le plan technique, l'augmentation de la part de nickel aurait l'avantage d'améliorer la capacité de la cathode et l'autonomie de la voiture électrique. Idéalement, les chercheurs aimeraient pouvoir se passer complètement de cobalt dans un avenir proche.

Cependant, la composition NMC – avec plus de nickel et moins de cobalt – a tendance à être instable lorsqu'elle est exposée à l'air et, une fois dans la batterie, à être plus réactive que souhaité. Différentes astuces pourraient permettre de stabiliser les nouveaux matériaux. Les essais actuels impliquent l'ajout d'infimes quantités d'autres éléments ou encore des revê-

ger plus vite et faire économiser l'espace qui serait occupé par le dispositif de refroidissement. Enfin, elle promet, elle aussi, une densité énergétique plus élevée que les batteries lithium-ion actuelles. Cependant, la mise en charge d'une telle batterie dure plus longtemps, car on ne peut la brancher que sur un courant d'intensité relativement faible.

Des chercheurs du PSI ont analysé le phénomène en détail grâce à ce qu'on appelle la «microscopie à tomographie aux rayons X». «En principe, cette méthode fonctionne comme un scanner d'hôpital, à la différence qu'à la SLS le flux de photons est plus important de plusieurs ordres de grandeur, explique Federica Marone, chercheuse spécialiste des lignes de faisceaux. Cela nous permet d'atteindre la résolution spatiale et temporelle nécessaire.» Pendant la charge, Federica Marone a pu observer avec une précision inégalée la formation de fissures dans une céramique à base de sulfure de lithium et de phosphore: les ions de lithium se fraient un chemin à travers une structure cristalline faite de particules d'étain, intégrées dans la céramique. Ils dilatent ces particules d'étain, dont le volume augmente alors jusqu'à 300%. Ce faisant, ils génèrent des fissures dans l'électrolyte environnant, qui gênent le flux des ions entre les électrodes. Certes, lors de la décharge, les fissures se referment, car l'électrolyte solide présente une certaine élasticité. Mais la limitation, lors de la charge, demeure. Cette compréhension du phénomène va faciliter la recherche d'autres matériaux électrolytes qui réagissent moins à la dilatation des particules d'étain. Néanmoins, il reste encore beaucoup de chemin à parcourir pour arriver à la production en série de batteries tout solide d'une qualité irréprochable.

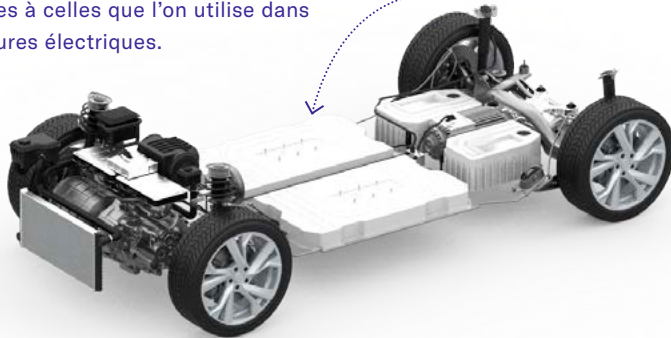
Les choses se présentent différemment dans le cas des piles à combustible. Comparées aux batteries, ces propulsions ont avant tout l'avantage de l'autonomie mais une efficacité énergétique moindre (voir l'interview en p. 19). «La technologie est mûre, affirme Thomas J. Schmidt, responsable du domaine de recherche Énergie et environnement du PSI. Il n'y a plus guère d'obstacles. Il manque juste une volonté politique.»

Actuellement, on continue d'optimiser la pile à combustible. Là aussi, les chercheurs utilisent les procédés d'imagerie uniques dont dispose le PSI avec ses grandes installations de recherche. Jusque-là, en effet, on n'avait pas encore compris en détail les processus qui se jouent à l'intérieur des piles à combustible. Mais la radiographie neutronique et la tomographie aux rayons X du rayonnement synchrotron permettent maintenant de les scruter en profondeur pendant leur utilisation.

Dans une pile à combustible, il se produit une réaction que les écoliers découvrent en cours de chimie: deux gaz, l'hydrogène et l'oxygène, s'associent pour former de l'eau et libèrent alors de l'énergie. Ce processus se joue au niveau des deux couches catalytiques poreuses des électrodes, qui sont séparées l'une de



La chercheuse Sigita Trabesinger planche sur des batteries similaires à celles que l'on utilise dans les voitures électriques.



tements de surface ciblés. Sigita Trabesinger et ses collaborateurs utilisent des sources lumineuses ultra-précises aux grandes installations de recherche du PSI afin de déterminer pourquoi les électrodes deviennent instables sans ces astuces et afin d'identifier les modifications prometteuses.

Il se pourrait aussi que l'avenir du moteur électrique réside dans ce qu'on appelle les «batteries tout solide». Une batterie tout solide contient une céramique solide à la place de l'électrolyte liquide qui transfère la charge entre les électrodes. L'avantage de cette céramique provient du fait qu'elle est moins inflammable que les électrolytes liquides. La batterie tout solide résiste aussi à des températures et à des tensions élevées, même sans refroidissement. Elle peut donc théoriquement se char-

l'autre par une membrane. D'une part, les deux gaz doivent diffuser à travers ces deux couches et, d'autre part, l'eau doit être évacuée. Ce dernier point, surtout, est important pour que la pile à combustible fonctionne bien. Sinon, l'eau bouche les pores des électrodes et empêche le passage des gaz. En hiver, lorsque l'eau gèle et se dilate, cela peut même occasionner des dégâts mécaniques. C'est pourquoi les chercheurs du PSI testent les moyens d'optimiser les flux d'eau et de gaz, en modifiant par exemple les composants poreux à l'intérieur de la pile à combustible.

La prochaine génération de piles à combustible devra – par une meilleure gestion de l'eau et par des catalyseurs optimisés – non seulement être plus résistante, mais aussi offrir une densité de courant plus élevée. «La densité de courant est surtout importante pour la flexibilité de la propulsion, explique Thomas J. Schmidt. Cet aspect a un impact direct sur la taille des systèmes de piles à combustible et donc sur leurs coûts.»

Ces progrès scientifiques trouvent un débouché dans la coopération avec la société Swiss Hydrogen (voir 5232, n° 1/2018, p. 18), qui a équipé des voitures électriques classiques de piles à combustible. Celles-ci rechargent l'accumulateur pendant le trajet et améliorent ainsi l'autonomie du véhicule. Depuis 2017, la flotte de Coop teste un camion équipé de cette propulsion électrique à hydrogène.

En matière de propulsions alternatives, le gaz naturel est un sujet important. Certaines voitures roulent déjà au gaz naturel, carburant fossile qui fait mieux que l'essence ou le diesel en ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre. «Le méthane est le principal composant du gaz naturel, rappelle Oliver Kröcher, directeur du Laboratoire de bioénergie et de catalyse au PSI. Sur le plan chimique, il présente un rapport plus favorable entre hydrogène et carbone et un indice d'octane (qui définit le pouvoir antidétonant d'un carburant) plus élevé que l'essence et le diesel.». De ce fait, le gaz peut être davantage comprimé dans le moteur, et sa combustion est plus efficace. Certes, les émissions de CO₂ sont moindres, mais le méthane non brûlé doit être éliminé des gaz d'échappement. Dans le laboratoire d'Oliver Kröcher, on étudie et on développe les catalyseurs nécessaires à cet effet.

Les moteurs à gaz fonctionnant au biométhane issu de la biomasse pourraient également présenter un intérêt. Ce biométhane est aussi appelé «gaz naturel de synthèse» (SNG). Comme son carbone a été d'abord soustrait à l'atmosphère, l'effet des émissions directes des véhicules sur le climat est pour ainsi dire neutre. Au PSI, on étudie différentes possibilités de production de biométhane.

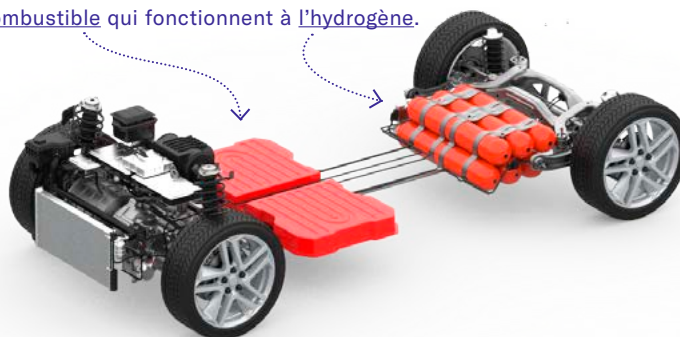
L'une d'elles consiste à faire fermenter des déchets organiques. Dans le cadre d'un test de longue durée, une installation du PSI a déjà démontré que cette méthode se prêtait à une utilisation quotidienne. Le procédé est particulièrement efficace, car la fermentation ne produit pas seulement du méthane; elle permet aussi de

convertir en méthane le dioxyde de carbone des gaz de fermentation par ajout d'hydrogène (voir 5232, n° 1/2018, p. 16).

Mais, d'un point de vue écologique, l'ensemble de ce procédé n'a de sens que si l'hydrogène ajouté est issu des énergies renouvelables: par exemple, l'électrolyse. Le principe vaut également pour les piles à combustible. On mène aussi des recherches là-dessus au



Thomas J. Schmidt dirige la division de recherche Energie et environnement du PSI, où la recherche porte, entre autres, sur des piles à combustible qui fonctionnent à l'hydrogène.



PSI: «Nous développons les matériaux adéquats qui fournissent une électrolyse efficace», explique Felix Büchi, responsable du Laboratoire d'électrochimie.

Dans certains de ces domaines, les chercheurs du PSI partagent leur expertise avec d'autres centres de recherche en Suisse, dont l'Empa, le Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche. «L'Empa est, pour nous, un partenaire compétent dans de nombreux projets», relève Thomas J. Schmidt. Le PSI et l'Empa collaborent avec d'autres instituts et d'autres hautes écoles de Suisse dans le cadre des pôles de compétence Heat and Electricity Storage et Mobility. Le second, comme son nom l'indique, se consacre à une mobilité efficace.

«Efficacité» est le maître-mot pour faire évoluer de nombreuses propulsions alternatives. Mais les experts recommandent de ne jamais perdre de vue l'ensemble du système des transports et sa rentabilité: «Au bout du compte, il s'agit de pouvoir se déplacer du point A au point B de manière aussi écologique et abordable que possible, rappelle Serge Biollaz, chef du groupe Processus thermiques au PSI. Pour ce faire, il faut enchaîner judicieusement nombre de solutions. Et, pour la mobilité du futur, nous n'avons pas besoin d'une seule technologie de propulsion mais de toute une palette. C'est seulement ainsi que nous atteindrons les objectifs suisses d'un système de transports efficace et peu émetteur de CO₂.» ♦



Les véhicules individuels propulsés par une pile à combustible ont une meilleure autonomie que les voitures électriques, mais ils sont moins efficaces. Les chercheurs du PSI s'efforcent d'améliorer ce bilan.



L'«empreinte écologique» des véhicules individuels

Dans le cadre d'une vaste étude du PSI, les chercheurs Brian Cox et Christian Bauer ont comparé l'impact écologique des différents types de véhicules individuels. Ce projet a été plus exigeant qu'on ne pourrait l'imaginer *a priori*. Car, en plus des émissions de polluants dégagées lors de l'utilisation de ces véhicules, il a fallu prendre en compte celles générées lors de leur fabrication. Sur l'ensemble de la durée de vie d'une voiture, cela représente la moitié de l'impact total sur l'environnement.

Cette infographie illustre une partie des résultats de l'étude avec l'impact sur l'environnement de différents types de véhicules individuels. Ces résultats sont fondés sur les données types de véhicules de 2018. Les barres qui se trouvent derrière les voitures représentent l'empreinte écologique de chacune. Leur longueur correspond au total des émissions de gaz à effet de serre, exprimé en émissions de CO₂ (en grammes) par kilomètre parcouru. Les autres gaz qui influencent le climat ont également été convertis en équivalent CO₂. Hormis les données actuelles, l'infographie présente aussi une prévision: les chercheurs ont en effet calculé les valeurs qui seront probablement atteintes en 2040. Leurs travaux montrent par exemple que les voitures du futur roulant au gaz naturel devraient permettre de réduire davantage les émissions de gaz à effet de serre que les véhicules à pile à combustible.

En outre, pour chaque type de voiture, on verra précisée la composition des gaz à effet de serre en 2018: la taille du nuage – à gauche de chaque auto – indique aussi bien la part de gaz à effet de serre liée à la construction du véhicule que celle liée à la construction des routes. La fabrication de la carrosserie, du système de propulsion et du réservoir (ou de la batterie) est donc incluse dans le calcul, de même que la construction et l'entretien des routes. Quant au nuage qui se trouve juste derrière le pot d'échappement, il représente les gaz d'échappement directs émis pendant le trajet ainsi que les rejets dus à la production du

carburant utilisé (essence, diesel ou courant pour la voiture électrique). Il apparaît ainsi que la fabrication des véhicules électriques est moins écologique que celle des véhicules à essence, mais que cet inconvénient est plus que compensé lors de l'utilisation de la voiture électrique, qui ne génère pas de gaz d'échappement directs.



Tous les chiffres indiquent l'équivalent en grammes de CO₂ par kilomètre parcouru.

2018

186,6

2040

155,3

2018

199,4

2018

233,8

2040

166,7

2018

293,7

2040

194,8

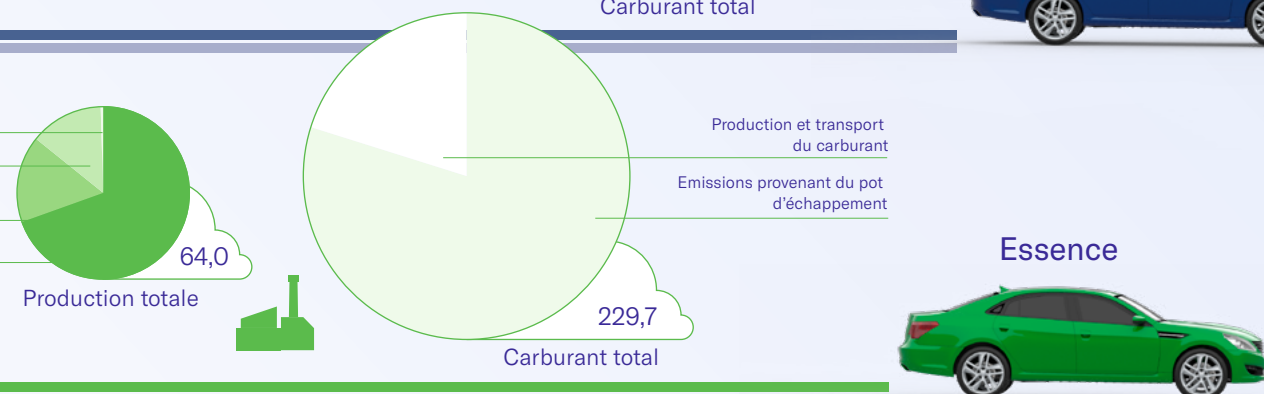
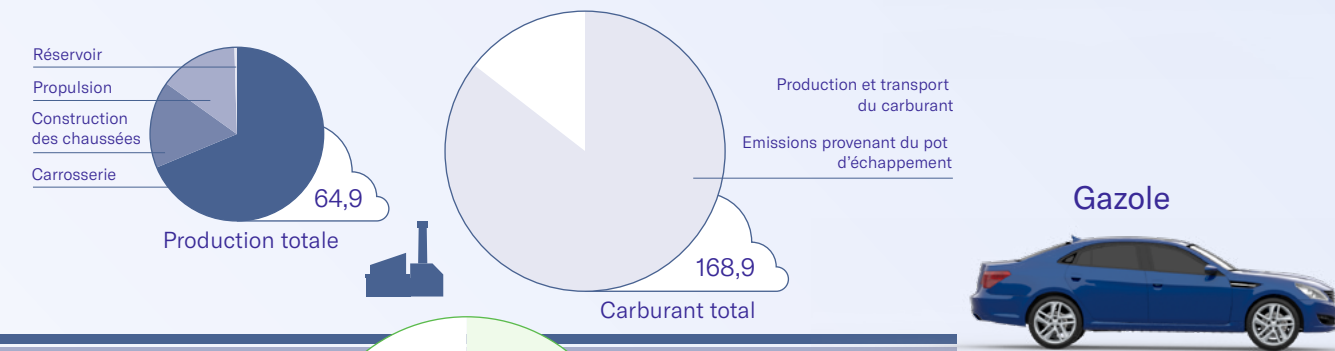
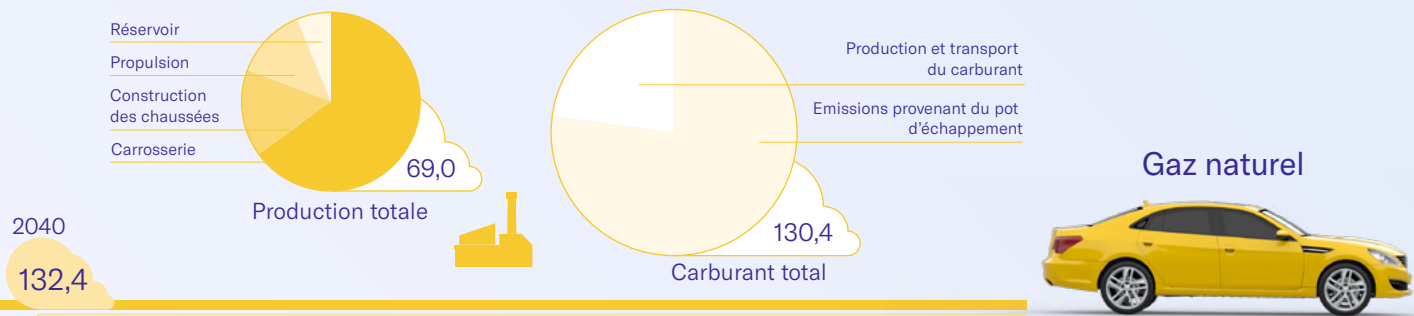
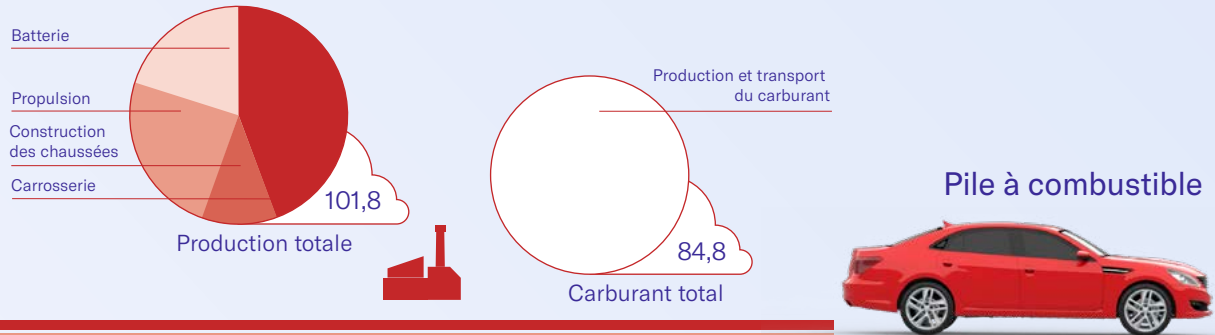
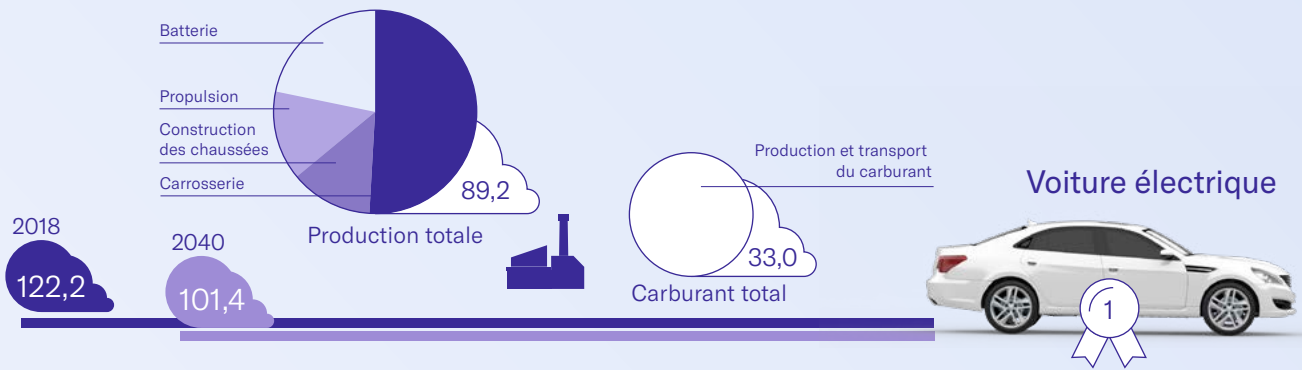
Réservoir

Propulsion

Construction des chaussées

Carrosserie







En termes de fabrication, une voiture électrique est moins écologique qu'une voiture à moteur thermique. Mais elle comble cet écart entre les 50 000 et 100 000 premiers kilomètres parcourus.

Priorité aux voitures électriques

À moteur à essence, à moteur diesel, à pile à combustible ou tout électrique: quelle est la voiture ayant le plus d'avenir? Une étude du PSI a analysé le bilan climatique des différentes propulsions actuellement disponibles. Et s'est aussi projetée en 2040.

Texte: Jan Berndorff

Celles et ceux qui souhaitent s'acheter une nouvelle voiture sont confrontés à un choix difficile. Car, depuis belle lurette, les questions ne tournent plus seulement autour du modèle et des critères financiers: les aspects écologiques – liés à la fabrication et à l'exploitation du véhicule – ont de plus en plus de poids, particulièrement en ce qui concerne les gaz à effet de serre comme le CO₂. Ce constat vaut tout particulièrement pour la Suisse, où le trafic est un élément important dans la protection du climat, puisqu'il est responsable

d'environ un tiers des émissions de gaz à effet de serre, soit plus que l'industrie et que le secteur du logement. Quant aux conditions générales pour une production et une exploitation des voitures aussi écologiques que possible, elles sont mises en place par le politique *via* des lois, des valeurs limites ou des taxes.

Une étude du PSI propose de quoi épauler à la fois le législateur et le consommateur dans leurs décisions. Sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie, Brian Cox, ancien doctorant, et Christian Bauer, chef de projet,

ont calculé l'impact sur l'environnement des différents types de propulsions pour véhicules individuels. Pour faciliter la comparaison, ils ont chaque fois présenté leurs résultats en équivalent CO₂. Depuis 2010, ces chercheurs ont collecté des données, épluché la littérature spécialisée et passé en revue des banques de données; ils ont interrogé les fabricants et demandé des informations aux experts de la recherche, dont leurs collègues du PSI. Le résultat est un tableau très nuancé du bilan écologique actuel des différents types

de propulsions, mais aussi de ce même bilan dans vingt ans. L'étude ose en effet avancer, pour la première fois, un pronostic de l'impact probable des propulsions sur l'environnement en 2040.

«L'important, pour ce genre d'analyse, c'est de considérer l'ensemble du cycle de vie du véhicule», souligne Brian Cox, qui travaille aujourd'hui pour la société de conseil Infrac. Pour le bilan climatique, il n'y a pas que le CO₂ émis lors de l'utilisation qui compte. Il faut aussi considérer la production de la voiture et



«Dès aujourd'hui, la voiture électrique serait le bon choix»

Christian Bauer est scientifique au Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du PSI et spécialiste des analyses de durabilité et du cycle de vie.

Christian Bauer, si vous deviez acheter aujourd'hui une voiture, quel type de propulsion choisiriez-vous?

Bauer: J'espère que la voiture diesel que je conduis actuellement tiendra encore trois à cinq ans. Puis trouver un modèle électrique qui me convienne. Notre étude montre clairement qu'à long terme les voitures électriques représentent l'option la plus durable, notamment si elles roulent au courant écologique. Beaucoup de personnes hésitent encore. Elles craignent que l'autonomie et l'infrastructure de recharge ne s'avèrent insuffisantes au quotidien ou que le prix de ces véhicules ne soit trop élevé. Mais, dès aujourd'hui, la voiture électrique serait finalement le bon choix. Celles et ceux qui effectuent des trajets courts entre deux lieux où les possibilités de recharge sont fiables devraient vraiment faire le calcul. Si l'on part du principe que la technologie des batteries et la durée de charge vont continuer à s'améliorer, on s'aperçoit que seulement 2 à 5% des automobilistes estiment l'autonomie de ces véhicules insuffisante. Et, dans un avenir proche, il devrait y avoir suffisamment de stations de recharge rapide pour effectuer de longs trajets.

Mais les voitures électriques restent chères.

Oui. Aujourd'hui, à l'achat, il faut dépenser davantage. Néanmoins, on économise de manière continue en coûts de carburant. Dans le cas des taxis, l'achat d'un véhicule électrique en vaut certainement déjà la peine. Et je pars du principe que la comparaison des prix se

fera bientôt en faveur des voitures électriques: celles-ci ne vont sûrement pas tarder à devenir meilleur marché, alors que les prix des voitures à essence et au diesel vont continuer à grimper.

La pile à combustible représente aussi une bonne option?

Seulement si les trajets sont longs et si la capacité de chargement doit être élevée. Autrement dit, surtout pour les poids lourds et les autocars. Je pense qu'à long terme la pile à combustible ne jouera pas de rôle majeur dans la catégorie des véhicules individuels.

Dans quelle mesure le gouvernement suisse encourage-t-il les propulsions alternatives? Les objectifs sont-ils ambitieux?

Il existe une «Feuille de route pour la mobilité électrique 2022» de l'Office fédéral de l'énergie et de l'Office fédéral des routes. Elle vise à porter à 15%, en trois ans, la part des voitures 100% électriques dans les nouvelles immatriculations de véhicules individuels. Mais, au premier semestre 2019, cette part n'était que de 4%: on est donc encore loin du compte!

Est-ce que, dans vingt ans, tous les Suisses rouleront quand même en voiture électrique?

Ils seront en tout cas très nombreux. La Suisse ne peut pas se séparer du reste de l'Europe. Si les grands constructeurs automobiles passent systématiquement aux propulsions à batterie pour s'aligner sur le durcissement des règlements, il sera difficile de s'accrocher à l'essence et au diesel. Il se peut tout à fait que, d'ici vingt à trente ans, nous puissions complètement nous en passer.

de ses composants ainsi que leur élimination. Enfin, il faut inclure les émissions dues à la construction des routes et à la production du carburant. Ces dernières sont liées à l'extraction du pétrole et à son raffinage dans le cas des moteurs à essence; à la production d'hydrogène dans le cas des véhicules à pile à combustible et à la production de courant dans le cas des voitures électriques. Cela représente donc un énorme effort de recherche. «D'autant plus que certaines données sont difficiles à obtenir, précise Christian Bauer. Personne ne vous expliquera comment une voiture électrique est produite. Les constructeurs traitent cette information de manière strictement confidentielle.»

En fin de compte, les chercheurs ont quand même réussi à réunir les informations nécessaires. Le résultat est net: dans le domaine des véhicules individuels, si nous voulons protéger le climat, nous devons miser sur la propulsion électrique à batterie. Si l'on fait la somme de tous les facteurs, il s'agit de celle dont l'impact climatique est le plus faible. En Suisse, ce constat est déjà valable aujourd'hui, car le courant est avant tout issu de l'hydraulique et du nucléaire. Le mix électrique suisse génère à peine plus de 100 grammes de CO₂ par kilowattheure, en tenant compte de l'énergie importée.

«Personne ne vous expliquera comment une voiture électrique est produite. Les constructeurs traitent cette information de manière strictement confidentielle.»

Christian Bauer, scientifique au Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du PSI

Il y a un aspect typique du bilan de la voiture électrique: elle fait moins bien que les autres véhicules pendant les premiers kilomètres parcourus, mais plus on roule avec en utilisant du courant peu émetteur de CO₂, plus elle devance les autres dans le classement. La raison? La fabrication de la batterie provoque beaucoup d'émissions, parce qu'elle contient des métaux spéciaux extraits dans des régions très lointaines et acheminés jusqu'au lieu de fabrication. Mais la voiture électrique compense largement ce défaut pendant qu'elle roule (voir infographie p. 16).

La pile à combustible est la propulsion qui arrive en deuxième position parmi les plus favorables à la protection du climat – mais seulement si les bonnes conditions sont réunies. Dans ce cas, c'est aussi un moteur électrique qui actionne les roues du véhicule, mais dont le courant provient d'une pile à combustible (et non d'une prise). Cette dernière transforme en eau

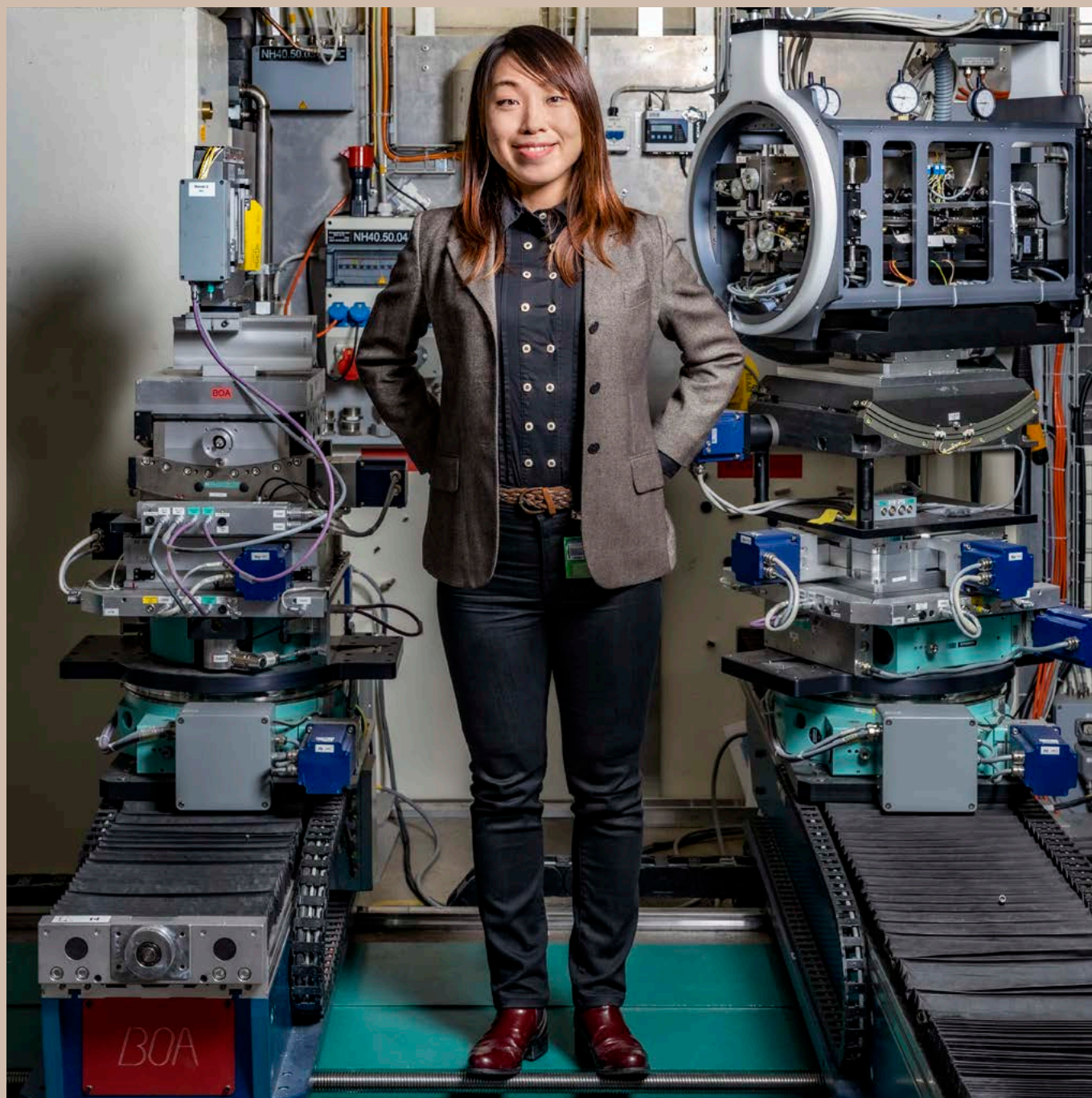
l'hydrogène contenu dans un réservoir à haute pression, lorsqu'il entre en contact avec l'oxygène de l'air, processus qui libère de l'énergie. Le point décisif réside dans la manière dont l'hydrogène a été produit: s'il est issu de l'électrolyse – c'est-à-dire de la division de l'eau en oxygène et en hydrogène par du courant électrique – et que ce courant est d'origine solaire, la pile à combustible est très favorable à la protection du climat. Si l'hydrogène est issu du mix électrique suisse, elle l'est un peu moins. Et le bilan est carrément défavorable, si l'hydrogène a été produit à partir de gaz naturel, une énergie fossile.

En termes de bilan climatique, les voitures qui roulent au gaz naturel sont comparables à celles qui roulent au diesel. Le gaz naturel synthétique (SNG) occupe une position à part. Ce succédané artificiel du gaz naturel est fabriqué à l'issue de plusieurs étapes. Comme pour la pile à combustible, la première consiste à produire de l'hydrogène avec de l'eau par électrolyse. Puis l'hydrogène est combiné avec du dioxyde de carbone prélevé dans une usine de biogaz, une usine d'incinération des ordures ou une centrale à charbon – ou produit directement en l'isolant de l'air. Le résultat est un hydrocarbure qui ressemble tellement au gaz naturel (tous deux sont principalement composés de méthane) que l'on peut l'injecter dans le réseau gazier. «Mais en termes de bilan global, les voitures qui roulent au SNG consomment cinq ou six fois plus de courant que les voitures électriques, explique Christian Bauer. Il se produit beaucoup de pertes énergétiques tout au long de la chaîne de production du SNG, et le moteur à combustion est inefficace.»

Alors, pourquoi miser sur ce type de propulsion? L'idée serait de fabriquer le SNG en utilisant le courant écologique excédentaire. Lorsqu'en été nous disposons de plus d'énergie issue du solaire et de l'éolien que nous ne pouvons en consommer, il faut pouvoir la stocker d'une manière ou d'une autre. Ces excédents seront ensuite disponibles en hiver, lorsque le besoin de courant est important et que les énergies renouvelables faiblissent. L'astuce réside dans le fait que le SNG peut être facilement stocké. Les petits excédents seront injectés dans le réseau gazier existant, d'où l'on pourra les retirer à tout moment. Et, pour les excédents importants, il existe des réservoirs avantageux et pratiquement sans pertes. «Si, à l'avenir, il devait nous rester beaucoup d'excédents de courant écologique, le SNG représenterait un mode de propulsion parfaitement valable pour les véhicules individuels», relève Christian Bauer.

La grande question, pour le bilan climatique de l'ensemble des propulsions, est donc de savoir à quoi ressemblera le réseau électrique du futur. Les politiques et la société auront-ils le courage de passer rapidement aux énergies renouvelables? Les propulsions alternatives pourraient alors pleinement user de leurs atouts. ♦





Masako Yamada

La grande installation SINQ est la source suisse de neutrons de spallation: c'est là que Masako Yamada développe un instrument optique novateur qui dirigera davantage de neutrons – et donc un faisceau neutronique plus intense – sur les échantillons à étudier. La physicienne exploite la nature ondulatoire des neutrons et se sert de nouveaux matériaux pour construire son instrument optique. Ce travail rend désormais possible d'analyser des échantillons extrêmement petits – de l'ordre du millimètre cube – et améliore remarquablement les données de mesure. Les modifications que les propriétés des neutrons subissent dans l'échantillon permettent aux chercheurs de tirer des conclusions sur la structure interne de ce dernier.



Détecter les sources radioactives dans le transport de marchandises

Le PSI opère régulièrement des contrôles de radioactivité sur des camions à l'aide d'un portique de détection mobile, sur mandat de l'Office fédéral de la santé publique. Sa mission: détecter les sources de radiation orphelines. Mais il arrive aussi que du matériau naturellement radioactif déclenche l'alarme et prenne l'équipe du PSI au dépourvu.

Texte: Barbara Vonarburg

Si des valeurs remarquables apparaissent lors des contrôles de radioactivité, Udo Strauch du laboratoire d'étalonnage du PSI vérifie les résultats.

Un camion chargé de ciment est en train de passer par le portique qu'Udo Strauch et Rouven Philipp du PSI ont installé au centre de contrôle du trafic lourd à Erstfeld, au terme de trois heures de travail. Depuis le conteneur qu'ils ont amené et qui leur sert à présent de bureau, ils peuvent suivre sur un moniteur ce que mesurent les détecteurs placés dans les six colonnes blanches à gauche et à droite du camion: des rayons gamma émis par du matériau radioactif. Comme l'environnement naturel est, lui aussi, toujours légèrement radioactif, il arrive que le taux de radiation chute quand un camion passe le portique de détection, car il bloque en partie le rayonnement de fond. Mais ce n'est pas ce qui se produit avec notre camion chargé de ciment. Au contraire, il déclenche l'alarme.

«Cela arrive relativement souvent, explique Udo Strauch. Comme tous les matériaux de la croûte terrestre, le ciment peut contenir d'infimes parts de radionucléides naturels qui émettent un rayonnement gamma.» Des roches comme le granit, le gravier, les sables minéraux, ou encore certains engrais figurent au nombre de ces marchandises qui contiennent plus ou moins de matériau radioactif, suivant leur origine, les procédures de transformation qu'elles ont subies et leur quantité. Il s'agit souvent de parts infimes qui resteraient indétectables, si leur volume était celui d'un sac de sport ordinaire, par exemple. «Mais quand la charge est celle d'un camion de 22 tonnes, la radiation devient mesurable par notre portique», poursuit Udo Strauch.

Puisque le moniteur du conteneur signale une alarme, le camion chargé de ciment est stoppé. L'expert du PSI en fait le tour avec un appareil de mesure portable et contrôle la surface de chargement. Le niveau de radioactivité est partout légèrement élevé. Si Udo Strauch devait constater un pic de radioactivité bien net, il se munirait d'un autre appareil de mesure pour déterminer quels sont les radionucléides à l'origine du rayonnement gamma. Mais le camion chargé de ciment ne dépasse pas la limite autorisée pour les matières radioactives naturelles, et le chauffeur peut donc poursuivre son trajet. «Ces alertes montrent que nos instruments de mesure fonctionnent, même si les limites applicables aux radionucléides naturels n'ont encore jamais été dépassées lors de contrôles de ce type de chargement», relève Udo Strauch.

Ferraille radioactive

Mais les exemples effrayants dans le domaine du transport de marchandises existent bel et bien. Ainsi, depuis novembre 2018, quatre sources radioactives ont été découvertes dans les ports de Hambourg et de Rotterdam, semblables à celles qu'emploient la médecine et l'industrie alimentaire pour les irradiations. Ces sources de cobalt 60 sont hautement radioactives. En l'occurrence, elles étaient enfouies dans des conte-

neurs chargés de ferraille et ont été détectées grâce à des portiques de mesure, comme le rapporte l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). A Hambourg, le cylindre métallique radioactif de 10 centimètres était emballé dans un sac en toile. La livraison de ferraille provenait d'Afrique de l'Ouest. En revanche, on n'a pas réussi à établir d'où provenaient les sources de cobalt 60 détectées aux Pays-Bas. Ce matériau extrêmement dangereux a heureusement pu être récupéré et entreposé en sécurité, sans que personne soit blessé.

Des produits en acier inoxydable, contaminés au cobalt 60, sont aussi apparus en Suisse à la fin de l'année 2008. Apparemment, une source s'était retrouvée dans des matériaux recyclables qui avaient été transformés dans une fonderie en Inde. Or, des boutons d'ascenseur avaient, entre autres, été fabriqués avec cet acier. «Il a fallu les éliminer comme déchets radioactifs, du fait que la limite autorisée avait été dépassée», raconte Reto Linder de l'Office fédéral de la santé publique (OFSP). Cet événement ainsi que d'autres similaires, comme de possibles importations de marchandises contaminées après la catastrophe nucléaire de Fukushima, sont à l'origine de l'introduction de mesures périodiques dans le transport de marchandises.» Des contrôles de radioactivité sont régulièrement conduits depuis 2015. Avec la révision de l'ordonnance sur la radioprotection en 2018, l'OFSP a été chargé d'organiser des mesures périodiques dans le transport de marchandises à l'importation, à l'exportation et lors du transit.

«L'exigence est fondée, entre autres, sur des recommandations de l'AIEA et des directives de l'UE», précise Reto Linder. Les Etats-Unis, notamment, avaient insisté sur ce point en raison de la menace terroriste. Des «bombes sales» qui contiennent du matériau radioactif pourraient avoir un impact dévastateur. Mais des sources radioactives égarées, qui peuvent refaire surface n'importe où en raison du commerce mondial de la ferraille, représentent elles aussi un danger pour l'être humain et l'environnement. «La probabilité que du matériau radioactif orphelin soit découvert est certainement plus grande, note Reto Linder. Mais la contrebande de matériau radioactif ne peut pas être exclue – et l'objectif de ces contrôles, c'est aussi de mettre la main dessus.»

Plusieurs fois par an, Udo Strauch et Rouven Philipp installent donc, sur mandat de l'OFSP, le portique mobile sur différents sites – poste-frontière ou encore centre de contrôle du trafic lourd – afin de procéder à des mesures de radioactivité pendant une semaine, souvent avec le soutien de l'OFSP et l'aide de l'Administration fédérale des douanes (AFD) et de la police. «Nous procédons à une analyse de risque qui montre où les contrôles sont les plus utiles, explique David Marquis de l'AFD. Et nous nous appuyons sur cette base pour coordonner la collaboration entre notre personnel – aux bureaux de douane et aux postes-frontières – et les organisations partenaires,

Au centre de trafic lourd d'Erstfeld, le PSI effectue le contrôle des camions au moyen d'un portique mobile.



c'est-à-dire le PSI et l'OFSP. Nous épaulons aussi les experts lors des contrôles, en stoppant par exemple les véhicules.» Jusque-là, le PSI a participé à des contrôles menés sur quinze sites répartis dans toute la Suisse: entre autres, au centre de contrôle du trafic lourd d'Erstfeld ou aux postes-frontières de Bâle, de Chiasso et de Kreuzlingen.

L'alarme déclenchée par du tabac

Udo Strauch se réjouit, chaque fois, de la serviabilité et du vif intérêt du personnel des douanes et de la police. Il arrive également qu'un chauffeur de camion veuille savoir pourquoi il est contrôlé et ce qui est alors mesuré. «Parfois, ces contrôles sont même surprenants pour nous», avoue Udo Strauch. Son équipe a par exemple été prise au dépourvu en découvrant qu'un camion ayant déclenché l'alarme transportait du tabac. L'appareil de mesure portatif indiquait que l'alerte était due à du potassium 40. Le potassium est un élément vital pour tous les organismes et contient cet isotope à l'état naturel. La quantité de matière végétale séchée que ce camion transportait était telle que la part de potassium 40 était clairement mesurable. «Ce n'est pas dangereux, en tout cas pas pour les non-fumeurs», assure Udo Strauch.

Mais les déchets radioactifs, comme le radium, que l'on utilisait autrefois dans l'industrie horlogère pour ses couleurs luminescentes, constituent bel et bien une menace. Raison pour laquelle les contrôles ne se limitent pas au transport routier de marchandises. Dès 2021, les usines d'incinération des ordures ménagères (UIOM) et les entreprises de recyclage en Suisse devront également opérer des contrôles à l'arrivée. L'équipe du PSI teste actuellement, sur le site d'une UIOM, ce que l'on peut attendre de ce type de contrôles. Rouven Philipp se souvient encore de cette journée de plein été où une benne chargée de dix tonnes d'ordures ménagères a déclenché l'alarme en passant par le portique de détection. «C'est avec ce cas que nous avons découvert notre premier dépassement de la valeur limite, raconte Rouven Philipp. Il a fallu alors basculer toute la charge et la trier pour localiser la source.» Au bout de trois quarts d'heure, l'équipe a fini par mettre la main sur le sac-poubelle qu'elle recherchait. L'appareil portatif indiquait que les rayons gamma mesurés étaient émis par de la technologie médicale. Un patient avait probablement jeté aux ordures des articles hygiéniques, après avoir été traité dans un centre de médecine nucléaire. Or, ces articles contenaient encore des résidus de radionucléides qui rendaient nécessaires leur collecte et leur élimination de manière appropriée. ♦

Actualité de la recherche au PSI

1 Dans les glaces du pôle Nord

Depuis fin septembre 2019, la plus grande expédition polaire à ce jour est en cours: pendant une période d'environ treize mois, des chercheurs de 20 nations se rendent au pôle Nord à bord du brise-glaces Polarstern. Une fois que le navire aura atteint un point situé au nord de la Russie, il se laissera emprisonner par banquise. De là, il sera naturellement emporté jusqu'au nord-est du Groenland par la dérive des glaces. Fridtjof Nansen avait déjà exploité ce phénomène lors de son expédition polaire, entre 1893 et 1896. Dans le cadre de Mosaic, les chercheurs mènent les projets les plus divers: par exemple, l'analyse des eaux, des glaces et de l'atmosphère, mais aussi des effets du changement climatique d'origine anthropique sur ces dernières. Le PSI est à bord avec un projet de chimie de l'atmosphère.

Informations complémentaires:

<http://psi.ch/fr/node/30512>

13 mois: c'est la durée prévue de l'expédition polaire Mosaic, dont cinq mois de nuit polaire, pendant lesquels le soleil restera sous la ligne d'horizon.

7 kilomètres par jour: c'est la distance parcourue par le navire de l'expédition Polarstern, une fois pris dans la banquise, en raison de la dérive des glaces.

-45°C: c'est la valeur à laquelle la température devrait chuter.





2 Empêcher les tumeurs de métastaser

Les métastases sont la cause de décès la plus fréquente chez les patients cancéreux. Elles se propagent dans l'organisme par le système lymphatique, notamment. Une protéine membranaire, le récepteur de chimiokines 7, joue un rôle important dans cette migration des cellules cancéreuses. En utilisant la cristallographie aux rayons X à la Source de Lumière Synchrotron Suisse SLS, les chercheurs du PSI ont réussi à décoder précisément la structure de ce récepteur. Ces informations leur ont permis d'identifier la molécule qui bloque le récepteur et qui empêche ainsi la transmission dans la cellule d'un signal contrôlant son mouvement. Dans le cadre d'un projet commun avec la société pharmaceutique F. Hoffmann-La Roche AG, les chercheurs ont jeté les bases du développement d'un médicament qui pourrait empêcher certains types de cancers (comme le cancer du côlon) de métastaser.

Informations complémentaires:
<http://psi.ch/fr/node/30041>

3 Microrobots intelligents

Des chercheurs de l'Institut Paul Scherrer PSI et de l'ETH Zurich ont développé une micromachine qui peut exécuter différentes actions. Le principe consiste à programmer la magnétisation de nanoaimants logés dans certains composants du microrobot pour en commander ensuite les mouvements au moyen de champs magnétiques. Ce concept novateur représente une étape importante vers des microrobots et des nanorobots qui ne stockent pas uniquement les informations pour une seule action précise, mais qui peuvent sans cesse être reprogrammés pour accomplir diverses tâches. L'un de ces robots, par exemple, est en forme d'oiseau. À l'aide de différents champs magnétiques, il est capable d'abord de battre des ailes, avant de glisser sur le côté, puis de battre des ailes de nouveau. Des machines de ce genre, qui mesurent seulement quelques micromètres, pourraient être utilisées dans le corps humain pour exécuter de petites interventions chirurgicales.

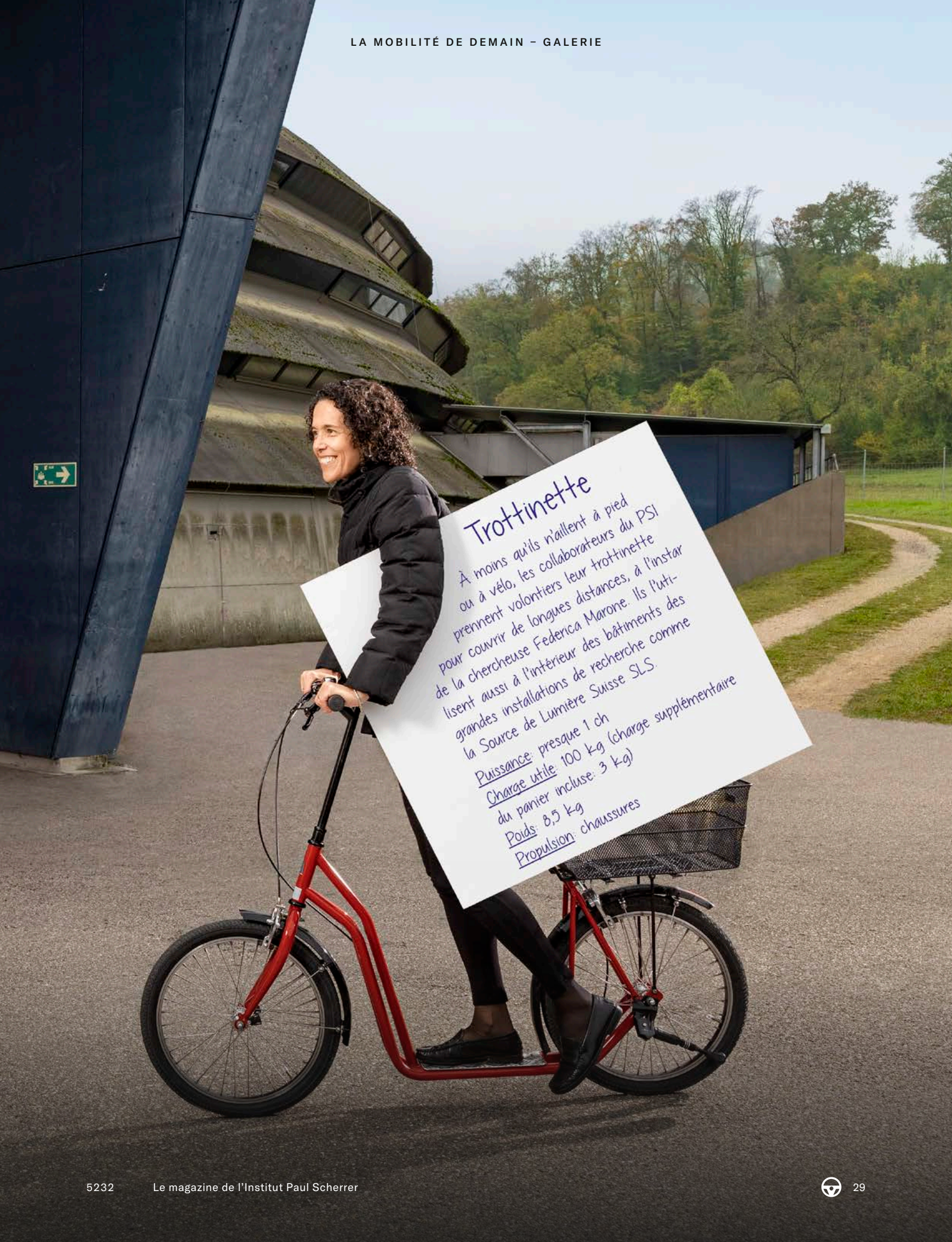
Informations complémentaires:
<http://psi.ch/fr/node/30590>



Mobile au PSI

L'Institut Paul Scherrer PSI s'étend sur environ 350 000 mètres carrés entre Villigen et Würenlingen, sur les deux rives de l'Aar. Sa superficie est aussi vaste que celle d'un village, mais c'est surtout une grande zone piétonne. Voici les moyens de transport que l'on peut y emprunter, si l'on veut malgré tout se rendre rapidement du point A au point B.

Texte: Christian Heid



Trottinette

À moins qu'ils n'aillent à pied ou à vélo, les collaborateurs du PSI prennent volontiers leur trottinette pour couvrir de longues distances, à l'instar de la chercheuse Federica Marone. Ils l'utilisent aussi à l'intérieur des bâtiments des grandes installations de recherche comme la Source de Lumière Suisse SLS.

Puissance: presque 1 ch

Charge utile: 100 kg (charge supplémentaire du panier incluse: 3 kg)

Poids: 8,5 kg

Propulsion: chaussures



Voiture électrique

La voiture électrique permet de se déplacer de manière plus confortable. Mirjam van Daalen, cheffe d'état major du département des Sciences photoniques, enlève le câble de recharge puis transporte de manière silencieuse des matériaux lourds sur l'ensemble du site.

Longueur x largeur x hauteur:

3,48 x 1,48 x 1,61 m

Charge utile (conducteur inclus): 385 kg

Classe d'efficacité énergétique: A

Emissions de CO₂: 0 g/km







Chariot tracteur

Le chariot tracteur électrique utilisé au SwissFEL fait figure d'hercule parmi les véhicules. Il permet à Lars Binder, coordinateur, d'acheminer de grosses charges aux bons endroits, dans ce bâtiment d'une longueur de 740 mètres.

Charge de traction: jusqu'à 20 000 kg

Temps de charge: environ 13 h

Vitesse avec charge: 7 km/h

Siège conducteur: siège ergonomique

Pour une vue d'ensemble

Au PSI, Alexander Röder développait des modèles pour conduire des bilans écologiques. Aujourd'hui, il dirige l'Institut Bâtiment et environnement sis à Berlin, où il met à profit ses connaissances afin d'aider à construire des immeubles plus respectueux de l'environnement.

Texte: Joel Bedetti

Depuis son nouveau bureau, Alexander Röder a une vue qui embrasse à la fois la Fernsehturm et la station de S-Bahn Alexanderplatz. «Berlin est une ville géniale, mais les hivers y sont nettement plus froids qu'à Madrid», relève ce physicien de 48 ans. C'est bien la seule ombre au tableau, depuis qu'il a déménagé d'Espagne dans la capitale allemande au printemps dernier. Sa famille s'est acclimatée, et Alexander Röder effectue un travail qui associe son goût pour les modèles mathématiques à son sens de l'écologie.

L'institut vérifie et publie des déclarations sur les matériaux de construction en vue de préparer les données qui permettront de dresser le bilan écologique d'un bâtiment. «Aujourd'hui plus que jamais, je perçois à quel point mes études m'ont marqué, dit Alexander Röder. Les physiciens abordent les problèmes à l'aide de modèles abstraits.» Ce qui permet d'éviter les conclusions fausses, notamment pour un sujet aussi sensible que la protection de l'environnement. Mais cela nécessite une base de données aussi vaste que possible, souligne-t-il encore.

Alexander Röder a appris à développer des modèles et à gérer d'importantes quantités de données pendant ses études universitaires, qui se sont conclues par une thèse de doctorat à l'Institut Paul Scherrer. Bien que son projet initial ait été de poursuivre des études de génie mécanique, il a fini par choisir la physique sur les conseils d'un proche, qui a fait valoir que ces études-là offraient un plus grand nombre d'applications et de débouchés sur des métiers différents.

En conséquence, Alexander Röder a suivi ces conseils et effectué son premier cycle d'études à l'université de Fribourg-en-Brisgau, puis son deuxième cycle, dès 1994, à l'ETH Zurich. Aujourd'hui

encore, il se souvient de la phrase d'un professeur lors du premier cours de mécanique quantique: «Vous allez souffrir, mais notre objectif est que vous puissiez discuter d'égal à égal avec les diplômés de l'Ivy League.» Dans le jargon académique, l'Ivy League regroupe les huit meilleures hautes écoles des Etats-Unis, dont les universités Harvard, Princeton et Yale.

La technologie énergétique au lieu de la mécanique quantique

Mais c'est le cours de technologie énergétique, dispensé par le directeur des services industriels argoviens de l'époque, qu'Alexander Röder a trouvé le plus palpitant. «La physique y était associée aux questions écologiques, se rappelle-t-il. Nos parents nous ont éduqués dans le respect de la création. C'est pourquoi le thème de l'écologie m'a toujours intéressé.» Ce même enseignant lui a présenté une liste de sujets potentiels pour son travail de diplôme, qui émanaient du centre de recherche de son canton – l'Institut Paul Scherrer – et parmi lesquels il s'en trouvait un qui lui convenait.

Il a ainsi obtenu, pour quatre mois, un poste de travail au Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques du PSI. Sa thématique de recherche était l'«hydrogène propre». Le bilan écologique de ce vecteur énergétique n'est en effet pas le même suivant son mode de production: «Il est nettement moins bon si l'hydrogène a été produit à partir de gaz naturel plutôt que par électrolyse, c'est-à-dire en scindant les molécules d'eau en oxygène et en hydrogène à l'aide du courant électrique issu des énergies renouvelables», détaille Alexander Röder.





«Aujourd’hui plus que jamais,
je perçois à quel point
mes études m’ont marqué.»

Alexander Röder, directeur de l'Institut Bâtiment et environnement sis à Berlin



L'atmosphère du PSI lui a plu, notamment la façon dont de nombreux chercheurs engagés s'inspiraient mutuellement, si bien qu'en 1997 il est resté à Villigen pour effectuer son doctorat. Comme le PSI développait avec Volkswagen une pile à combustible pour une voiture à hydrogène, Alexander Röder a été chargé d'établir son bilan écologique et de le comparer à celui d'autres véhicules munis d'un moteur à essence classique. «Il existait déjà un modèle informatique qui permettait de simuler la consommation de carburant des différents véhicules», raconte-t-il. Mais il ne reproduisait que l'exploitation du véhicule et non l'ensemble de son cycle de vie. Le physicien a donc dû intégrer les émissions dans ce modèle, de la production à l'élimination. Y compris la production du carburant, soit précisément le sujet de son travail de diplôme: «Il est vrai qu'une pile à combustible n'émet pratiquement aucun polluant, admet Alexander Röder. Mais si l'hydrogène qu'elle consomme a été produit à partir de gaz naturel, son bilan global est négatif.»

Chez un géant mexicain du ciment

Hormis la programmation assistée par ordinateur de plusieurs modèles, ce projet s'est surtout traduit par d'intenses recherches. «A la fin des années 1990, il n'y avait encore que très peu de données numérisées, se souvient Alexander Röder. J'ai écumé les bibliothèques et compulsé une foule de revues spécialisées afin de collecter de nouveaux chiffres-clés pour la fabrication d'un vecteur énergétique. Des heures et des heures de travail!» Ses efforts ont été récompensés en 2001 par un titre de docteur.

Après sa thèse, Alexander Röder a continué à travailler au PSI en rapport avec ce thème. Il s'est notamment chargé, pour le compte de l'Office fédéral de l'énergie, de calculer un pronostic pour le bouquet électrique européen jusqu'en 2050, en extrapolant l'évolution des nouvelles technologies comme le photovoltaïque et l'éolien. Puis un chasseur de têtes lui a fait une offre alléchante: Cemex, le géant mexicain du ciment, cherchait un spécialiste de l'énergie pour son site de recherche sis près de Bienne, dans le canton de Berne.

Au début des années 2000, le sujet de l'écologie avait débordé le strict cadre des instituts de recherche pour gagner les milieux économiques. De fait, ces derniers avaient besoin de l'expertise d'Alexander Röder. Il a donc aidé Cemex à planifier sa propre centrale avec 167 éoliennes dans le sud du Mexique et obtenu, pour ces installations, l'autorisation de générer des certificats d'émissions dans le contexte de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC). D'autres entreprises

achètent ces certificats et compensent ainsi les émissions de CO₂ de leurs propres installations.

C'est par le biais de son travail, qui l'amenait régulièrement au siège de Cemex à Monterrey, qu'Alexander Röder a connu sa femme, une Panaméenne. C'était en 2005. Trois ans plus tard, il était nommé Manager Climate Change et déménageait avec son épouse à Madrid, où Cemex avait établi son quartier général pour l'Europe et l'Asie.

Préparer les données relatives aux produits

A cette époque, son engagement pour l'écologie l'a poussé à monter, en dehors de son travail, le Concrete Sustainability Council, une association internationale de fabricants de béton qui certifie une gestion responsable des ressources humaines et environnementales. Poser sa candidature, à l'automne 2018, au poste de directeur de l'Institut Bâtiment et environnement en était la suite logique. Et Alexander Röder a décroché le poste!

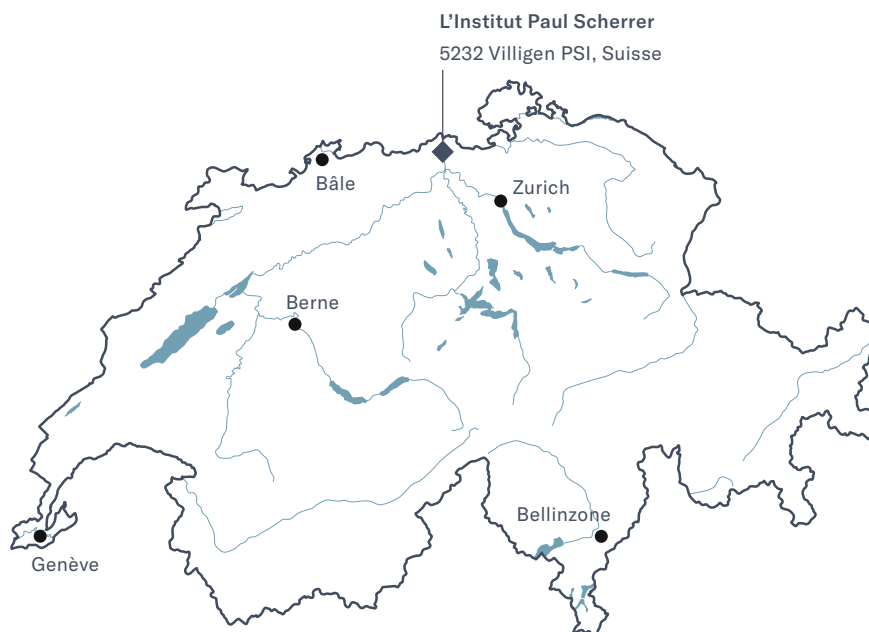
Aujourd'hui, à l'institut, il dirige une équipe de huit collaborateurs, donne des conférences et s'occupe des membres de l'institut, qui sont surtout des fabricants du domaine de la construction. L'institut met notamment à leur disposition les fondamentaux pour calculer l'impact environnemental de chaque produit. Quant aux maîtres d'ouvrage, ils peuvent se référer à ces données relatives aux produits qui ont été préparées en amont et calculer ainsi le bilan écologique de leur bâtiment. «Mais les données d'un produit ne constituent pas encore une évaluation», avertit Alexander Röder. C'est seulement sur l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment – de sa construction à sa démolition – que l'on peut voir à quel point un matériau de construction est écologique.

Alexander Röder prend l'exemple des matériaux isolants pour expliquer ce point. «Si l'on se borne à considérer la construction d'une maison, il faudrait y renoncer complètement», dit-il. En effet, la production du matériau est elle-même gourmande en énergie. En revanche, si l'on considère uniquement l'exploitation du bâtiment, il faudrait emballer ce dernier dans d'épaisses couches de matériaux isolants afin d'économiser l'énergie thermique. «Seule l'interaction de tous ces éléments dans le modèle de calcul permet d'obtenir une vue d'ensemble cohérente pour déterminer les quantités judicieuses de matériaux isolants», conclut Alexander Röder. Avant d'ajouter que c'est au PSI qu'il a acquis ce mode de pensée. Et c'est bien la perspective d'une vue d'ensemble que le physicien aime encore plus que sa vue berlinoise sur la Fernsehturm. ♦

QUI SOMMES-NOUS?

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





L'Institut Paul Scherrer
5232 Villigen PSI, Suisse

4

grandes installations de recherche
uniques en Suisse

800

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

5000

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

5232 est l'adresse où l'on fait de la recherche en Suisse à de grandes installations de recherche. Car l'Institut Paul Scherrer PSI a son propre code postal. Une particularité justifiée, d'après nous, pour un institut qui s'étire sur 352643 mètres carrés, qui possède son propre pont sur l'Aar et qui compte 2000 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 Würenlingen. C'est un institut de recherche fédéral pour les sciences naturelles et les sciences de l'ingénieur, qui fait partie du domaine des Ecoles polytechniques fédérales (EPF), les autres membres étant l'ETH Zurich, l'EPF Lausanne, l'Eawag, l'Empa et le WSL. Avec notre recherche fondamentale et notre recherche appliquée, nous œuvrons à l'élaboration de solutions durables pour répondre à des questions majeures, tant sociétales que scientifiques et économiques.

De grandes installations de recherche complexes

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

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

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

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

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

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

Nos trois principaux domaines de recherche

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

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

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

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

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

Les cerveaux derrière les machines

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

IMPRESSUM

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

Paraît trois fois par an.
Numéro 1/2020 (janvier 2020)
ISSN 2571-6891

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

Rédaction
Dagmar Baroke, Monika Blétry,
Monika Gimmel, Christian Heid,
Dr Laura Hennemann,
Sebastian Jutzi (resp.),
Dr Brigitte Osterath

Traduction
Catherine Riva

Correction
Étienne Diemert

Design et direction artistique
Studio HübnerBraun

Photos
Scanderbeg Sauer Photography, sauf:
Cover, pages 2, 3, 11, 12, 17, 20 (image
de fond): Adobe Stock;
page 14: Mauritius Images;
pages 21, 38: Institut Paul Scherrer/
Markus Fischer;
page 27: Institut Paul Scherrer;
pages 37–39: Thomas Meyer;
page 41: Institut Paul Scherrer/
Frank Reiser.

Infographies
Studio HübnerBraun, sauf:
Cover, pages 2, 3, 11–17, 18, 19:
Stefan Schulze-Henrichs;
pages 6, 7: Daniela Leitner;
pages 28, 29: Institut Alfred Wegener/
Martin Künsting (CC-BY 4.0).

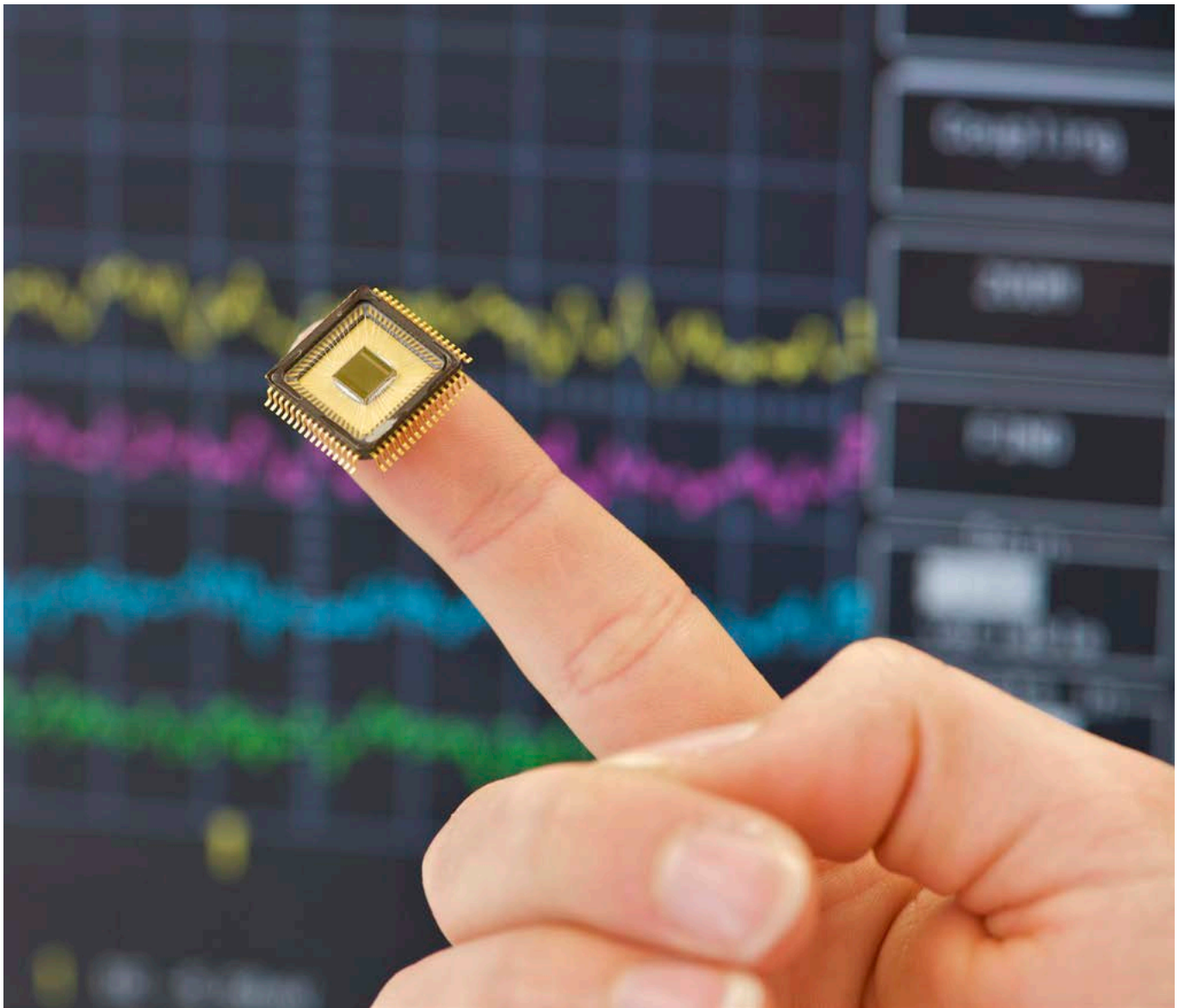
Pour en savoir plus sur le PSI
www.psi.ch/fr/

Pour lire 5232 sur Internet
www.psi.ch/5232/le-magazine-5232

**Pour vous abonner gratuitement
au magazine**
www.psi.ch/5232/abonner-5232

**5232 est également disponible
en allemand**
www.psi.ch/5232/magazin-5232

PAUL SCHERRER INSTITUT

Ce qui vous attend au prochain numéro

Inventivité brevetée

Les chercheurs du PSI ne se contentent pas de percer les secrets de la nature, ils réussissent aussi à tirer de leurs découvertes un bénéfice très pratique pour la Suisse. C'est ce que montrent notamment la centaine de brevets liés aux inventions réalisées dans tous les domaines de recherche du PSI: nouveaux traitements médicaux, technologies écologiques ou encore détecteurs hypersensibles destinés à la recherche de pointe. Mais, au fait, combien de temps faut-il compter entre l'idée initiale et le brevet? Et à quoi sert un brevet? Dans le prochain numéro, nous vous présenterons des chercheurs ingénieux et leurs inventions et nous vous montrerons comment un brevet peut servir de tremplin pour le développement de nouveaux produits.



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