

# Empa Quarterly

RECHERCHE & INNOVATION II #81 II OCTOBRE 2023

FOCUS: RECHERCHE SUR LES BATTERIES

## STOCKAGE DURABLE



INTELLIGENCE ARTIFICIELLE  
BRUIT DE TRAIN SIMULÉ  
« MINING THE ATMOSPHERE »

# [ CONTENU ]

[ FOCUS : RECHERCHE SUR LES BATTERIES ]

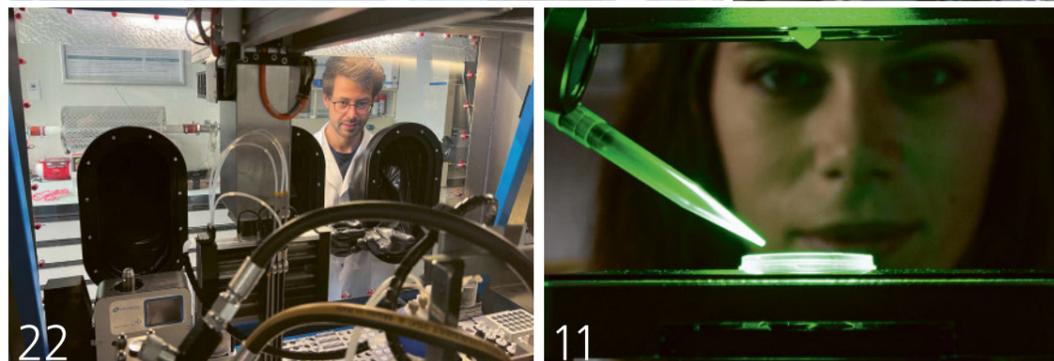


08



26

14



22

11

[ FOCUS ]

**14** PORTRAIT

Des couches minces, des objectifs élevés

**18** MATÉRIAUX

Qu'y a-t-il dans la batterie du futur ?

**20** BATTERIE À FLUX

Ceci est une batterie

**22** ROBOTIQUE

Un tremplin pour la recherche sur les piles

**24** ANALYSE

Chasse aux métaux lourds

**26** RECYCLAGE

Loin d'être la fin

[ THÈMES ]

**08** INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

De simple outil à partenaire à part égal ?

**11** ÉRYTHROCYTES

Hors de forme

**12** TECHNOLOGIE MÉDICALE

Une carte pour le genou

**30** SIMULATION

Bruit ferroviaire virtuel

**32** « MINING THE ATMOSPHERE »

En dehors de l'air

[ RUBRIQUES ]

**04** LA PHOTO

**06** BRIÈVEMENT

**28** ZUKUNFTSFONDS

Une vision à long terme

**34** EN ROUTE

[ COUVERTURE ]



De meilleures batteries sont indispensables à la transition énergétique et donc à l'avènement d'un monde plus durable. Les chercheurs de l'Empa développent des batteries pour différentes applications, de l'électromobilité au stockage stationnaire de l'énergie. Un autre thème de recherche important est le recyclage des batteries à la fin de leur durée de vie. Image : Adobe Stock

[ IMPRESSUM ]

**ÉDITEUR :** Empa

Überlandstrasse 129  
8600 Dübendorf, Suisse  
www.empa.ch

**RÉDACTION :** Empa Kommunikation

**DIRECTION ARTISTIQUE :** PAUL AND CAT. www.paul-and-cat.com

**CONTACT :** Tél. +41 58 765 47 33

empaquarterly@empa.ch

www.empaquarterly.ch

**PUBLICATION :**

publié quatre fois par an

**PRODUCTION**

anna.ettlin@empa.ch



ISSN 2673-1746

Empa Quarterly (édition française)

## IL EST GRAND TEMPS DE VOIR GRAND

Chère lectrice, cher lecteur,



Il ne fait aucun doute que les solutions pour le tournant énergétique et la crise climatique sont des tâches gigantesques qui nécessitent avant tout un certain état d'esprit pour être menées à bien: « Think big ! » Autrement dit : penser dans de grands contextes et impliquer tous les acteurs qui peuvent contribuer à la recherche de solutions. C'est exactement ce que nous avons entrepris à l'Empa, par exemple dans la recherche sur les batteries, le thème de ce numéro (à partir de la p. 14). Que ce soit avec nos institutions sœurs du domaine des EPF, avec des partenaires industriels ou dans des consortiums de recherche paneuropéens, la collaboration interdisciplinaire est toujours au cœur de nos activités de recherche.

Pouvoir stocker l'énergie – sous quelque forme que ce soit – est en effet un pilier central d'un système énergétique durable, car l'énergie solaire et éolienne n'est pas toujours disponible en quantité suffisante au moment où l'on en a besoin. C'est pourquoi le stockage sur batterie joue un rôle essentiel sur la voie du zéro net. Mais ce n'est que la moitié du chemin. En effet, au cours des 200 dernières années, nous avons littéralement pollué l'atmosphère terrestre avec du CO<sub>2</sub> issu de sources fossiles. Et celui qui fait des saletés devrait aussi les nettoyer – et peut-être même en faire quelque chose d'intelligent. Voilà, en bref, l'idée qui se cache derrière notre nouvelle initiative de recherche à grande échelle « Mining the Atmosphere ». Vous en aurez un avant-goût à la page 32 – nous vous présenterons ce grand projet en détail dans le prochain numéro. Si ce n'est pas un cliffhanger...

Bonne lecture !

Votre MICHAEL HAGMANN

#### LA BEAUTÉ DE L'IMPERFECTION

Les défauts cristallins peuvent modifier radicalement les propriétés de matériaux fonctionnels tels que les « ferroélectriques ». Ces substances présentent une polarité – comparable à celle des aimants avec un pôle nord et un pôle sud, mais qui peut être inversée en appliquant non pas un champ magnétique, mais un champ électrique. Cette propriété rend les ferroélectriques adaptés à une utilisation dans les systèmes de stockage de données, par exemple dans les ordinateurs.

Toutefois, pour les optimiser en vue d'applications technologiques, une compréhension approfondie et un contrôle précis des éventuels défauts sont nécessaires. Les chercheurs du Centre de microscopie électronique de l'Empa utilisent des méthodes d'analyse d'image de pointe basées sur la microscopie électronique à transmission à balayage pour examiner de tels « défauts » dans les cristaux au niveau atomique. Sur cette image à résolution atomique, un film ferroélectrique ultramince (couche de points jaunâtres) présente un arrangement remarquable de particules sur son bord supérieur. Ces « colonnes » d'atomes, disposées par paires les unes au-dessus des autres, peuvent avoir une influence négative sur les propriétés ferroélectriques du film mince.

Plus d'informations : [www.empa.ch/web/s299](http://www.empa.ch/web/s299)

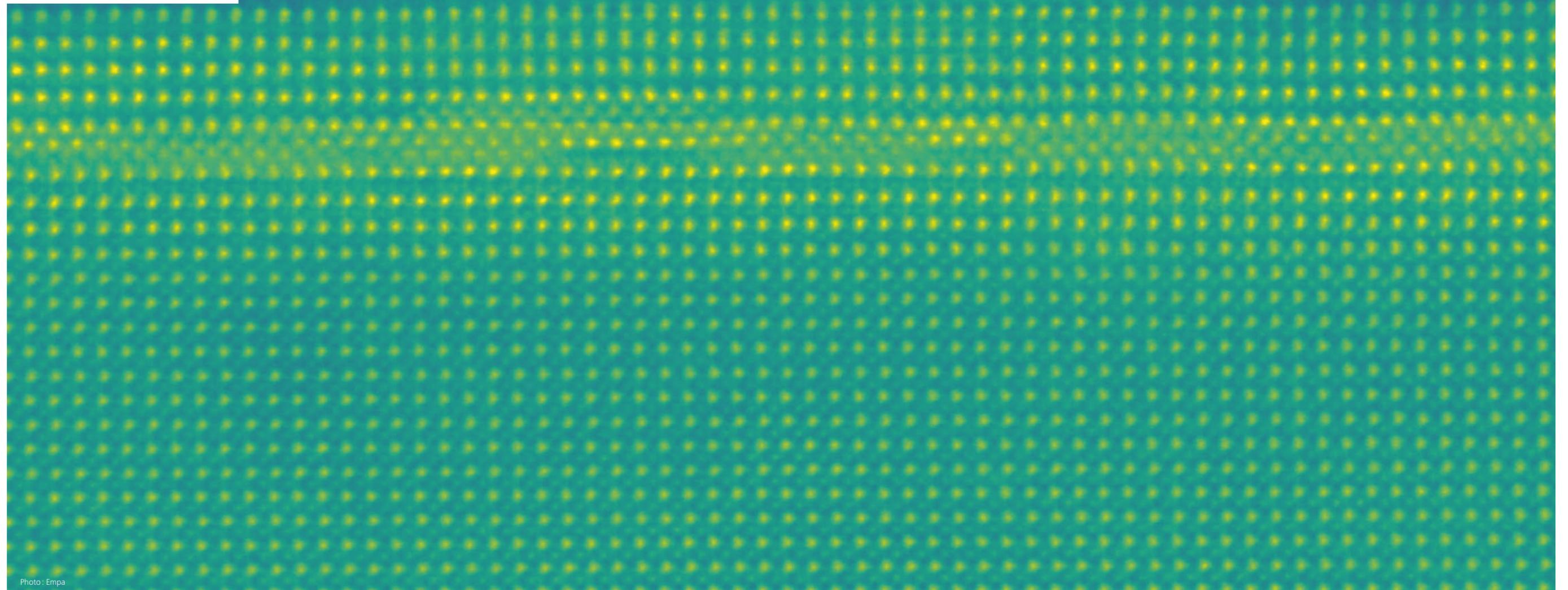


Photo : Empa

## « BRIGHT MINDS » : RÉVOLUTIONNER LE MARCHÉ DES BATTERIES



### SÉRIE VIDÉO

Dans le nouvel épisode de « Bright Minds », Abdessalem Aribia, chercheur à l'Empa et cofondateur d'une spin-off, met en lumière les défis et les envolées.

Des batteries lithium-ion plus sûres et plus durables, qui sont aussi beaucoup plus écologiques à produire devraient bientôt révolutionner le marché des batteries. Le développement de telles solutions n'est pas facile. Les scientifiques de l'Empa s'attellent à cette tâche – et ils y parviennent. Il est grand temps de mettre en lumière les visages qui se cachent derrière les nouveaux matériaux et technologies développés à l'Empa : une nouvelle série de vidéos – « Bright Minds : Bold Ideas. Smart Materials » vous donnera un aperçu du parcours personnel d'un chercheur et de son chemin vers les découvertes jusqu'au passage de la recherche aux applications pratiques. Dans l'épisode actuel, Abdessalem Aribia, chercheur à l'Empa et cofondateur d'une spin-off, présente les défis et les succès rencontrés dans le développement de cette technologie de batterie prometteuse.

[www.empa.ch/bright-minds](http://www.empa.ch/bright-minds)

## UN SIGNAL LUMINEUX POUR UN AIR PLUS SAIN



### OUVRIR LA FENÊTRE

Lorsque la concentration en CO<sub>2</sub> augmente, le « Wuerfeli » change de couleur.

Le « Wuerfeli » (i.e. petit cube) rend la qualité de l'air visible. Le petit capteur mesure la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'air ambiant et indique par sa couleur quand il est temps d'aérer. En outre, la petite pyramide mesure des paramètres tels que la température, l'humidité relative et la pression atmosphérique. Le capteur a été développé avec la participation de l'Empa dans le cadre d'une étude à grande échelle sur la qualité de l'air dans les salles de classe. Le résultat est un appareil de mesure de l'air efficace et testé, fabriqué en Suisse. La start-up QE GmbH, établie au Technopark Graubünden, produit le « Wuerfeli », qui est désormais disponible en ligne.

[www.wuerfeli.ch](http://www.wuerfeli.ch)

Photos : Empa, Wuerfeli

Photos : BASF, mäd

## DE LA VISION À L'INNOVATION



### PODCAST

Tanja Zimmermann, directrice de l'Empa, en discussion avec Matthias Halusa, directeur national de BASF en Suisse.

Dans le podcast « Schweizer Macher » de BASF, Tanja Zimmermann, directrice de l'Empa, parle de sa vision de l'Empa comme « phare pour les nouveaux matériaux et technologies » et d'idées lumineuses pour un avenir durable. Elle révèle en outre comment l'innovation est vécue à l'Empa, quelle est la part de diversité qui y contribue et ce que nous pouvons apprendre de la « science-fiction ». L'épisode peut être écouté en allemand sur Spotify, Apple Podcasts et sur le web.

[in.basf.com/lwusxmk](http://in.basf.com/lwusxmk)

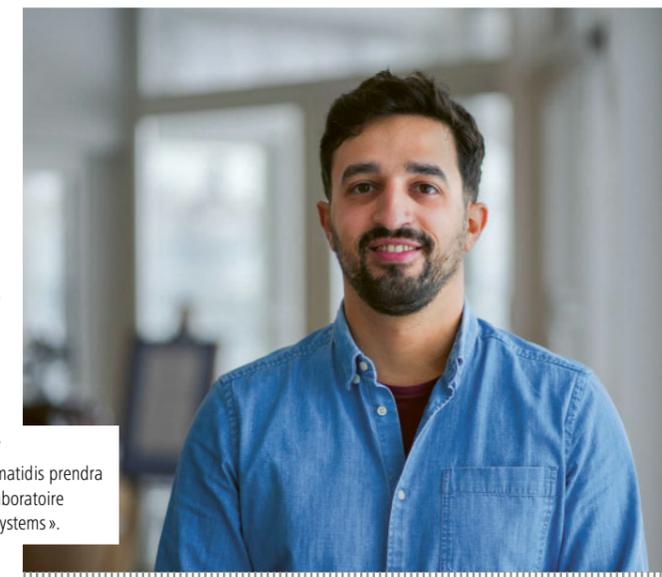
## NOUVEAU DIRECTEUR DU LABORATOIRE « URBAN ENERGY SYSTEMS »

Dès octobre, Georgios Mavromatidis prendra la direction du laboratoire « Urban Energy Systems » de l'Empa. Il succède à Kristina Orehounig, qui a été nommée professeur de physique et d'écologie de la construction à l'Université technique de Vienne. Georgios Mavromatidis, qui est actuellement « Senior Researcher » à l'EPF de Zurich, était déjà post-doctorant au laboratoire « Urban Energy Systems », où ses recherches portaient sur les systèmes multi-énergies et l'efficacité énergétique dans les bâtiments. Il est titulaire d'un doctorat en modélisation des systèmes énergétiques de l'EPF de Zurich, d'un Master of Science en « Sustainable Energy Futures » de l'« Imperial College » de Londres et d'un diplôme en ingénierie mécanique de l'Université Aristote de Thessalonique.

[www.empa.ch/web/s313](http://www.empa.ch/web/s313)

### CHANGEMENT

Georgios Mavromatidis prendra la direction du laboratoire « Urban Energy Systems ».





« COLLÈGE ROBOT »  
L'interface entre l'homme et la machine doit être correctement placée.

# L'IA : DE SIMPLE OUTIL À PARTENAIRE À PART ÉGAL ?

L'intelligence artificielle – IA – n'est pas seulement dans tous les médias, elle fait également son entrée dans nos environnements de travail, de l'industrie à la recherche. Mais comment pouvons-nous utiliser au mieux le potentiel de synergie entre l'homme et la machine et à quoi faut-il penser ? Voici quelques réflexions de Pierangelo Gröning, jusqu'à récemment membre de la direction de l'Empa.

Photo: Adobe Stock

Texte : Pierangelo Gröning

Les ordinateurs et Internet sont des piliers technologiques essentiels de notre société de plus en plus numérisée, car ils permettent l'accès, le traitement et l'échange de données à des vitesses bien supérieures à celles de l'homme. En ce qui concerne les tâches physiques dans le monde réel, les robots ont révolutionné les processus de fabrication industrielle en effectuant ces tâches plus rapidement, de manière plus fiable, plus endurante et avec une plus grande précision que l'homme ne peut le faire.

Avec la généralisation de l'intelligence artificielle (IA), ces technologies devraient, dans un avenir proche, passer du statut de simple outil et « auxiliaire » à celui de partenaire (plus ou moins) égal de l'activité humaine. Elles ne se contenteront pas d'exécuter avec précision et efficacité les tâches qui leur sont assignées, elles les élaboreront, les proposeront et les réaliseront éventuellement de manière autonome. Les ordinateurs, les robots et l'IA deviendront ainsi des collègues de travail et la notion d'« interaction homme-machine » prendra une toute nouvelle dimension.

En règle générale, la collaboration est particulièrement fructueuse lorsque les forces et les faiblesses des partenaires impliqués sont connues, que les partenaires se concentrent sur leurs points forts et qu'ils les utilisent de manière ciblée. Dans la collaboration avec le « collègue robot » ou le « collègue IA », cela ne sera pas différent ; ce sera même essentiel. Il est essentiel de placer correctement l'interface entre l'homme et la machine, afin que le potentiel de synergie de l'« équipe » soit exploité de manière optimale – et surtout au profit de l'homme !

Les premières applications connues sont les robots de soins et de rééducation,

les chatbots pour le conseil à la clientèle ou le ChatGPT, omniprésent dans les médias. Ce dernier permet désormais à tous d'accéder à l'IA et fournit, grâce à des algorithmes auto-apprenants et sur la base des données disponibles sur Internet, des réponses plausibles à (presque) n'importe quelle question ; il génère même, à l'aide de quelques mots-clés, des textes entiers (plus ou moins riches de sens selon la problématique concrète), que ce soit sous forme de résumé, de prose ou de poésie, pour n'en citer que quelques-uns.

Dans le domaine de la science et de la recherche, l'IA et le « Machine Learning » qui en est à l'origine sont depuis longtemps des outils quotidiens. Que ce soit pour composer, à l'aide de l'IA, comme des planificateurs d'itinéraires numériques, les étapes de réaction de voies de synthèse (bio-)chimiques complexes allant des produits au produit, ou pour optimiser les paramètres de processus dans des processus de fabrication complexes comme l'impression 3D de métaux, pour ne citer que deux domaines d'application de la recherche de l'Empa.

Tout le monde s'accorde à dire que l'utilisation de l'IA et des systèmes basés sur l'IA représente un énorme défi pour la société dans son ensemble. Les réseaux sociaux et les algorithmes sous-jacents qui suivent leur propre logique commerciale ou de « like » – avec toutes les dérives connues comme les fake news, etc. en sont un premier avant-goût. Le risque de perte d'emplois est une autre thématique à laquelle nous devons faire face en tant que société.

## LA QUESTION CENTRALE : COMMENT RENDRE L'IA COMPATIBLE AVEC LA SOCIÉTÉ ?

Conscients de cela, les gouvernements, les ONG et d'autres parties prenantes discutent actuellement de mesures et de réglementations visant à rendre

**CONNECTER**

L'objectif est de parvenir à une coexistence harmonieuse entre l'homme et l'IA.

l'IA socialement acceptable, pour le dire simplement. D'un autre côté, les grands groupes technologiques américains qui proposent, diffusent et utilisent l'IA pour leur propre succès commercial affirment et promettent une utilisation responsable de l'IA. Cela suffira-t-il?

Pour établir une cohabitation harmonieuse entre l'homme et l'IA, il sera important de réfléchir aux valeurs et au rôle de l'homme dans un monde avec IA. L'examen de questions très fondamentales telles que : « Une peinture générée par une IA peut-elle être considérée comme de l'art – ou s'agit-il simplement d'une composition de couleurs sur une toile? » ou « Un roman écrit par une IA est-il de la littérature? » – autrement dit : qu'est-ce que la créativité? – aideront peut-être à utiliser l'IA à bon escient et pour le bien de l'homme.

En ce qui concerne la production industrielle, la Commission européenne a développé dès 2020 la vision « Industry 5.0 – Towards a Sustainable, Human-centric and Resilient Industry »<sup>1</sup> et l'a décrite comme suit : « L'industrie 5.0 vise à restructurer fondamentalement les tâches humaines dans la production de manière à ce que les travailleurs en bénéficient. Ils seront habilités à

effectuer des tâches cognitives au lieu de tâches manuelles ainsi que des tâches à valeur ajoutée dans la production et à travailler en toute sérénité aux côtés de leurs « collègues » autonomes »<sup>2</sup>.

Mais l'IA et les systèmes basés sur l'IA vont également modifier massivement le paysage de la recherche et du développement. Et ce, à plusieurs égards : d'une part, l'IA raccourcira encore une fois considérablement les cycles de développement et – ce qui en découle – rapprochera encore plus la recherche appliquée et le développement, jusqu'à les faire fusionner dans certains domaines. Dans le cas extrême, la recherche appliquée pourrait même devenir obsolète, car une IA optimisée pour la résolution de problèmes fournit une réponse appropriée à chaque question clairement définie – c'est-à-dire un produit. Le succès commercial devrait donc devenir un indicateur central pour évaluer la qualité de ce type de « recherche ».

D'autre part, le produit primaire de la recherche – les données – revêt une importance capitale. Car comment l'IA apprend-elle? Comment évolue-t-elle? En la nourrissant en permanence de nouvelles données – et surtout de données fiables. Notez bien : des

données non générées par l'IA, elle a donc besoin d'un apport extérieur! Cela devrait donner une impulsion supplémentaire à la politique « Open Data », le libre accès aux données de recherche. Si cela n'est pas fait, ou pas en quantité suffisante, ou seulement avec des données de « mauvaise qualité », l'IA ne fera que fournir toujours la même chose ou – pire encore – probablement bientôt des absurdités.

Enfin, pour réaliser de véritables progrès, il faut toujours de nouvelles découvertes scientifiques révolutionnaires. Malgré les immenses possibilités que l'IA ouvre à la recherche, la base pour réaliser des sauts quantiques scientifiques ou pour ouvrir de nouveaux horizons scientifiques restera la curiosité, la persévérance et l'intuition. Et surtout une forte culture de l'erreur, car on n'apprend quelque chose que des échecs – alors que l'IA sert en premier lieu à éviter les erreurs. Ces vertus doivent absolument être préservées, elles ne doivent en aucun cas être victimes de la tentation de la réussite rapide rendue possible par l'IA. ■

<sup>1</sup> ISBN 978-92-76-25308-2

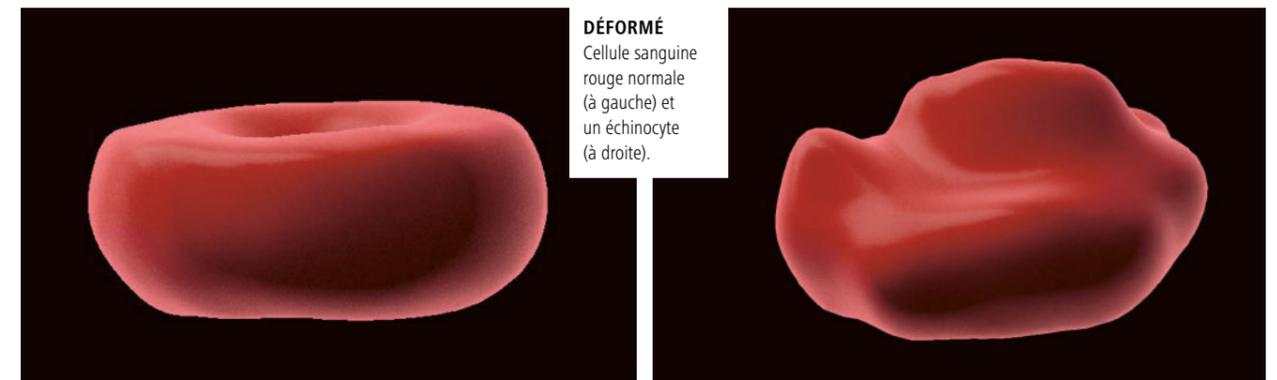
<sup>2</sup> F. Longo et al. Appl. Sci. 10 (2020) 4182

Photo: MX3D and Joris Laarman Lab

# HORS DE FORME

Des chercheurs de l'Empa ont observé au microscope holotomographique des globules rouges vivants se transformer en « échinocytes » hérissés de pointes lorsqu'ils sont traités avec de fortes concentrations d'ibuprofène et les ont représentés en 3D. Ils ont récemment publié leurs résultats dans la revue scientifique ACS Nanoscience Au.

Texte : Andrea Six

**DÉFORMÉ**

Cellule sanguine rouge normale (à gauche) et un échinocyte (à droite).

Le sang est en effet « un suc tout particulier ». Ce que Goethe, poète et spécialiste des sciences naturelles, soupçonnait déjà peut désormais être visualisé grâce à des techniques d'imagerie innovantes. L'une de ces particularités est la cellule la plus fréquente dans la circulation sanguine : l'érythrocyte. Chaque minute, des trillions de ces globules rouges se frayent un chemin dans le corps humain. Le fait qu'ils ne prennent pas toujours une forme ronde leur permet de se faufiler dans les vaisseaux sanguins les plus étroits pour alimenter en oxygène les endroits les plus reculés de notre corps.

Mais certaines modifications de la forme des érythrocytes sont aussi typiques de changements particuliers dans l'environnement : les échinocytes avec des prolongements épineux semblables à ceux d'un oursin apparaissent par exemple en cas de

brûlures, de lésions du foie ou après un contact avec certains médicaments. Des chercheurs de l'Empa ont observé la transformation de globules rouges en échinocytes à l'aide de la microscopie holotomographique numérique.

Talia Bergaglio et Peter Nirmalraj du laboratoire « Transport at Nanoscale Interfaces » de l'Empa à Dübendorf ont provoqué la déformation de globules rouges vivants en y ajoutant un médicament, l'ibuprofène. Grâce à la microscopie holotomographique, ils ont pu montrer en temps réel la transformation des beignets ronds en échinocytes. Cette technique innovante fonctionne de la même manière que la tomodesitométrie (TDM), mais l'imagerie est réalisée à l'aide d'une technologie laser au lieu de rayons X. La microscopie holotomographique numérique est donc particulièrement adaptée aux échantillons biologiques tels que les cellules

sanguines, car elle permet de prendre des images à haute résolution, sans contact et sans marqueur, qui peuvent ensuite être reconstruites sous forme de représentations tridimensionnelles.

Les globules rouges sont des cellules modèles idéales pour cette étude car ils sont facilement identifiables même dans le sang total et leur morphologie est sensible à l'environnement chimique et physique au cours de leur existence ; ils sont en fin de compte des coquilles membranaires (presque) vides. « C'est pourquoi notre technique de bio-imagerie permet d'étudier de manière particulièrement précise les interactions de diverses molécules médicamenteuses avec la membrane cellulaire des globules rouges », explique Peter Nirmalraj, chercheur à l'Empa. ■

Plus d'informations : [www.empa.ch/web/s405](http://www.empa.ch/web/s405)

# UNE CARTE POUR LE GENOU

Les opérations du genou sur le ménisque sont des interventions fréquentes sur une partie du corps particulièrement complexe. Des chercheurs de l'Empa veulent fournir des bases améliorées pour la médecine afin de réduire les risques de l'opération. Avec des modèles 3D basés sur des analyses de microtomographie assistée par ordinateur en laboratoire, ils cartographient le réseau de vaisseaux sanguins du cartilage méniscal à l'échelle nanométrique.

Texte : Andrea Six

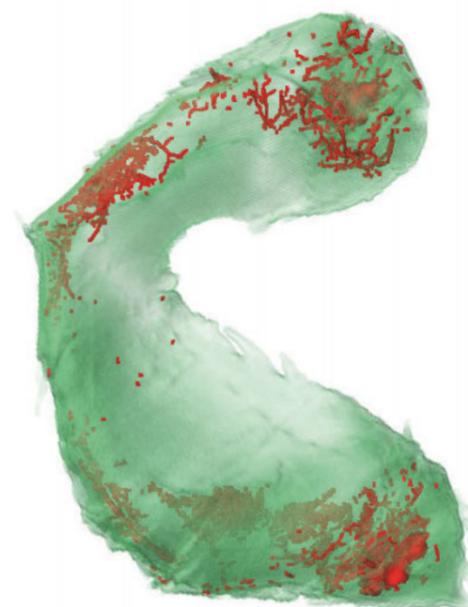
L'articulation du genou est une conquête biomécanique extrêmement complexe de l'évolution. Quiconque a déjà subi une blessure à ce niveau connaît les douloureuses épreuves de patience lors du diagnostic et de la thérapie. Le ménisque est un acteur non trivial dans l'orchestre anatomique de l'articulation composite. Des chercheuses de l'Empa établissent désormais une « carte en 3D » du précieux cartilage.

## MODÈLES 3D POUR L'OPÉRATION

En tant que coussinet en forme de croissant de lune, le ménisque amortit les chocs et permet un mouvement fluide entre la cuisse et la jambe. Toutefois, les deux ménisques de chaque genou sont sujets à l'usure et aux blessures. Ainsi, environ un genou sur trois dans la population âgée de 40 ans et plus présente une nette usure du ménisque, et environ 15 % de tous les accidents de l'articulation

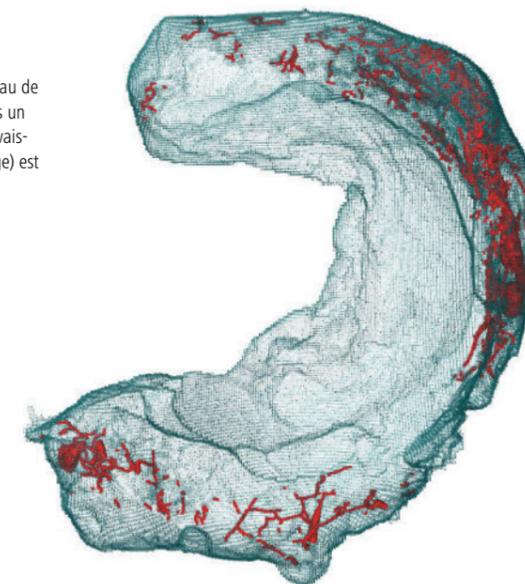


**VIE INTÉRIEURE**  
La chercheuse de l'Empa Federica Orellana travaille avec un microtomographe pour analyser des échantillons de tissus du ménisque.



## FILIGRANE

Le ménisque et son réseau de vaisseaux sanguins dans un rendu 3D. Le trajet des vaisseaux sanguins (en rouge) est clairement visible.



du genou concernent le ménisque. Selon l'assurance accidents Suva, ces accidents entraînent à eux seuls des coûts de santé de plus de 65 millions de francs par an en Suisse.

Si une intervention chirurgicale doit être effectuée sur le genou, le ménisque n'est pas un candidat idéal, car son tissu n'est alimenté en sang que dans certaines parties. Pour avoir de bonnes chances de guérison, il est utile de connaître précisément ce précieux réseau de vaisseaux. Jusqu'à présent, les informations se basent toutefois sur des images bidimensionnelles de coupes de tissus. On perd ainsi de précieuses données, par exemple sur la déformabilité du cartilage ou sur l'interconnexion des vaisseaux.

« Nous voulons établir une « carte » tridimensionnelle du ménisque avec une grande précision », explique Federica Orellana du « Center for X-ray Analytics » de l'Empa à Dübendorf. Selon la biophysicienne, cela pourrait optimiser le traitement et permettre des thérapies sur mesure dans le sens d'une médecine personnalisée.

## DES VEINES RAMIFIÉES

L'équipe de Federica Orellana et de la cheffe de projet Annapaola Parrilli vise une précision qui ne peut être atteinte avec des appareils utilisés dans les hôpitaux. Par rapport à une résolution de l'ordre du millimètre pour une tomodensitométrie (TDM) clinique, les micro et nanotomographes des laboratoires de l'Empa peuvent même descendre en dessous de la limite du micromètre. A partir de ces clichés radiologiques, les chercheurs élaborent des modèles mathématiques qui permettent de saisir et de cartographier dans l'espace la densité, la structure, la déformabilité biomécanique et le réseau vasculaire du cartilage.

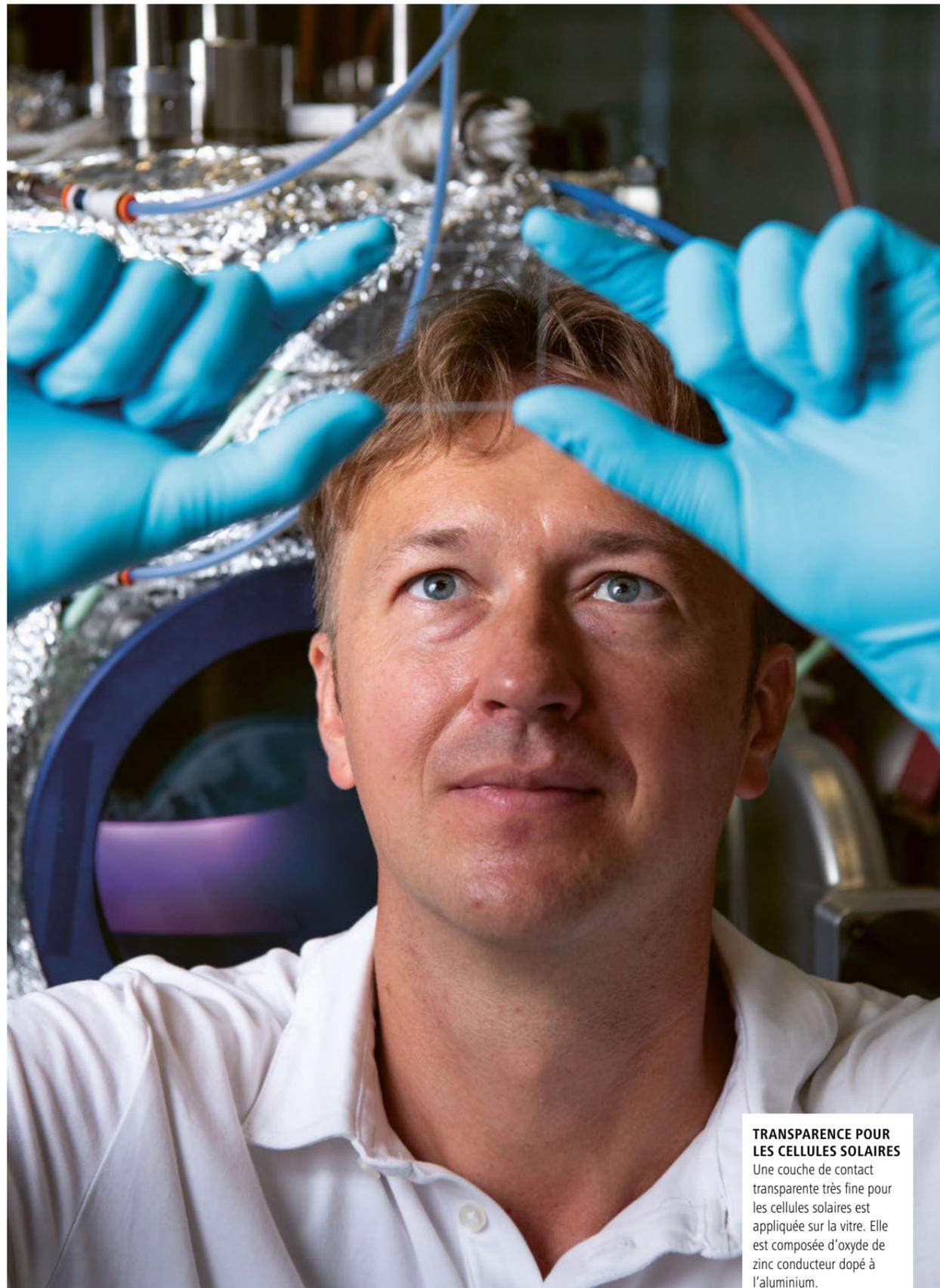
Avec le soutien du Fonds national suisse (FNS) et en collaboration avec les partenaires cliniques de l'« Istituto Ortopedico Rizzoli » de Bologne, de l'Hôpital cantonal de Winterthur et de l'Université de Zurich, les chercheurs travaillent actuellement avec un grand nombre d'échantillons de laboratoire afin de constituer une base de données aussi pertinente que possible. Les premières simulations informatiques montrent déjà les veines ramifiées du ménisque avec

une précision prometteuse. Les images micro-TDM transmettent la complexité structurelle du tissu et permettent d'obtenir d'autres informations dans les modélisations mathématiques, telles que la porosité ou le degré d'enroulement des vaisseaux sanguins.

## TRAITEMENT SUR MESURE DU MÉNISQUE

Actuellement, Federica Orellana travaille sur un atlas 3D d'échantillons de tissus méniscaux sains. Dans une prochaine étape, des clichés TDM de blessures et d'usures de toutes sortes seront intégrés dans les modèles. Les personnes concernées pourraient ainsi obtenir des informations essentielles sur le potentiel d'autoguérison des tissus directement pendant l'examen et les stratégies de traitement individuel pourraient être optimisées. Comme le souligne la biophysicienne, la carte en 3D devrait pouvoir être utilisée aussi bien pour les patients victimes d'accidents que pour les processus d'usure liés à l'âge.

Plus d'informations : [www.empa.ch/web/s499](http://www.empa.ch/web/s499)



**TRANSPARENCE POUR LES CELLULES SOLAIRES**  
Une couche de contact transparente très fine pour les cellules solaires est appliquée sur la vitre. Elle est composée d'oxyde de zinc conducteur dopé à l'aluminium.

Photo: Marion Nitsch

# DES COUCHES MINCES, DES OBJECTIFS ÉLEVÉS

Yaroslav Romanyuk travaille depuis une quinzaine d'années à l'Empa sur des technologies complexes à base de couches minces pour les cellules solaires, les circuits imprimés, les nouvelles batteries à l'état solide et d'autres applications. Depuis début juillet, il dirige le « Laboratoire des couches minces et du photovoltaïque » et poursuit avec son équipe des objectifs ambitieux – des matériaux innovants à l'intelligence artificielle pour de futures expériences en passant par une start-up.

Texte: Norbert Raabe

Il aurait pu vivre en Allemagne, aux États-Unis, en Pologne peut-être ou chez lui en Ukraine. Mais Yaroslav Romanyuk a vécu un moment de carte postale. En 2002, il s'est rendu à Lausanne pour un entretien d'embauche en vue d'un doctorat à l'EPFL: de Luzk en Ukraine, il a pris le bus jusqu'à Zurich en passant par la Pologne; de là, il a pris le train pour Lausanne, s'est engouffré dans le tunnel derrière Puidoux – et s'est retrouvé face à une vue imprenable sur les vignobles et le lac Léman. Cet endroit pittoresque dont on dit que les Suisses allemands y déchirent leurs billets de retour et les jettent par la fenêtre.

Et c'est ainsi que la Suisse est devenue la destination de Yaroslav Romanyuk. La carrière de Romanyuk à l'Empa a commencé à Zurich, en 2008, lorsqu'il a quitté le Technopark zurichois pour s'installer à l'Empa avec le groupe de recherche sur les cellules solaires d'Ayodhya Tiwari, chef de département aujourd'hui à la retraite. Le chimiste est

lié à ce dernier par de précieuses expériences et réussites, comme plusieurs records du monde de rendement de cellules solaires souples à couche mince, une douzaine de thèses de doctorat réussies et dirigées conjointement, et bien d'autres choses encore. « Nous avons ouvert ensemble des voies de recherche auxquelles nous n'aurions jamais pensé au départ! », déclare Romanyuk.

C'est ainsi que cela doit continuer: de grands objectifs avec des couches minces et des combinaisons de matériaux inédites, qui le fascinent depuis qu'il fait de la recherche. Comme lorsqu'il était postdoctorant à l'Université de Californie à Berkeley, où il travaillait sur des semi-conducteurs à base de nitride de gallium et de combinaisons similaires, dopés aux terres rares – pour des émissions de lumière, donc des applications optiques ou de futurs lasers. Mais au final, cela n'a pas fonctionné. « Les obstacles ont malheureusement été plus forts que moi », avoue Yaroslav

lav Romanyuk sans ambages, « c'était aussi vraiment une idée ambitieuse! Et à l'époque, je voulais absolument essayer quelque chose de nouveau ».

## PLAISIR À TRAVAILLER AVEC DES TALENTS

L'expérimentation prime sur l'étude – même dans ses domaines de recherche actuels. Outre les projets très ciblés menés avec ses collaborateurs, tels que les nouvelles batteries à l'état solide fabriquées par « Physical Vapor Deposition » (dépôt en phase vapeur) ou l'électronique imprimée à l'aide de procédés d'impression numériques, certains résultats sont apparus de manière inattendue, par exemple des films de sécurité transparents pour des « serrures » invisibles. Selon Romanyuk, tout ne peut pas être planifié: « Certaines découvertes se produisent tout simplement, de manière soudaine et surprenante, lorsque les équipes travaillent avec enthousiasme. »

Il a déjà encadré et encouragé de nombreux talents, avec grand plaisir. ►

Plus de 40 travaux de diplôme, les thèses de doctorat achevées – et de nombreux diplômés occupent aujourd’hui des postes de direction dans des entreprises high-tech renommées de Suisse, raconte le chef. « C’est ce qu’il y a de

## YAROSLAV ROMANYUK

**LA CARRIÈRE :** Le chercheur a étudié la chimie à la « Volyn National University » de Luzk, en Ukraine, et a obtenu un master summa cum laude en 2002. Il a ensuite effectué son doctorat à l’EPFL, suivi d’un séjour de recherche de deux ans à l’« University of California » à Berkeley, financé par le Fonds national suisse (FNS). Yaroslav Romanyuk travaille à l’Empa depuis 2008 ; à partir de 2012, il a remplacé le chef de laboratoire en tant que chef de groupe et a été responsable de la sécurité chimique du laboratoire. En outre, il a coordonné pendant plus de dix ans l’action « Bike to work » à l’Empa.

mieux ! », dit-il, « les regarder évoluer et devenir toujours meilleurs ! » Pas sous la pression, non, parce que la créativité ne peut pas naître ainsi – mais avec une grande confiance, de la patience et en sachant que même les essais infructueux conduisent souvent, en fin de compte, à des progrès importants.

### L’EMPILEMENT DE PILES, UN ESPOIR

Yaroslav Romanyuk est également fier de ses collaborateurs Moritz Futscher et Abdesslem Aribia, qui ont récemment fondé la start-up « BTRY AG » – dans le but de développer une batterie lithium-ion à l’état solide prête à être commercialisée, qui tire profit du transport rapide de la charge dans les batteries à couches minces. « Le problème est que de telles batteries n’ont qu’une faible capacité », explique Yaroslav Romanyuk, « notre idée est maintenant la suivante : nous empilons au moins dix cellules indivi-

duelles les unes sur les autres et obtenons ainsi des batteries performantes qui peuvent être chargées et déchargées en un temps extrêmement court ! » De plus, de tels éléments sont plus robustes que les produits courants et plus sûrs, car ininflammables (voir infographie).

Certes, de nombreuses étapes sont encore nécessaires pour développer cette technologie, qui est déjà brevetée, jusqu’à ce qu’elle soit prête à être utilisée. Actuellement, les spécialistes travaillent sur un prototype à l’échelle du laboratoire et cherchent déjà des investisseurs pour le développement ultérieur, qui pourrait un jour être rentable pour des applications dans des technologies exigeantes comme l’aéronautique. Certes, les coûts de telles batteries seront nettement supérieurs à ceux des produits courants en raison de la complexité de leur fabrication – mais Romanyuk y voit un grand potentiel. « Nous avons calculé une fois pour une iWatch que notre batterie augmenterait le prix total d’environ 5 % », explique-t-il, « mais pour un temps de charge de moins d’une minute, cela pourrait être intéressant, n’est-ce pas ? »

Des technologies variées, des projets passionnants, des objectifs ambitieux : Cela signifie beaucoup de coordination, une quantité de mails et de contacts, toujours de nouvelles demandes de recherche – plus de management qu’auparavant et un emploi du temps strict, physiquement aussi. L’endurance nécessaire lui a déjà été nécessaire lors de son tout premier emploi dans la recherche : un travail à 10 % en troisième année d’études à la « Volyn National University » en Ukraine.

« Ma tâche consistait à contrôler la nuit un four pour cristaux semi-conducteurs et à régler correctement la température », raconte Yaroslav Romanyuk, « donc à me réveiller toutes les heures,

### LE « COATING COMPETENCE CENTER » DE L’EMPA

Comblant le fossé entre la recherche en laboratoire et la production industrielle pour les revêtements : tel est l’objectif du « Coating Competence Center » (CCC) de l’Empa, qui a été mis en service en 2016. Pour fabriquer des composants électroniques imprimés, des cellules solaires, des batteries à couches minces et d’autres éléments, de nombreuses technologies y sont disponibles. Il s’agit notamment d’imprimantes 3D ultramodernes pour la fabrication additive (AM) et d’appareils permettant de durcir des couches sur des substrats à l’aide d’impulsions lumineuses émises par des lampes flash au xénon. Le « magnétron sputtering » est d’une grande importance. Dans ce cas, un plasma est généré dans des chambres à vide à l’aide d’un gaz rare, l’argon, qui détache des atomes d’une « cible », lesquels se déposent ensuite de manière ciblée sur le substrat souhaité. De telles couches atteignent généralement une épaisseur comprise entre 10 nanomètres et 10 micromètres. Avec ses multiples possibilités, le CCC est conçu comme un « partenariat privé-public » : l’idée est que les partenaires impliqués travaillent ensemble tout au long de la chaîne de valeur, de la science à l’industrie, afin de développer de nouvelles technologies et de finaliser des solutions créatives.

toute la nuit, seul dans cet immense bâtiment ! » Des conditions qui seraient impensables aujourd’hui – grâce à des équipements modernes, comme au « Coating Competence Center » de l’Empa (voir encadré), où de fines couches, par exemple pour les contacts de cellules solaires ou de batteries à couches minces, sont produites 24 heures sur 24, tous les jours. C’est aussi un facteur de coûts en raison du temps et de l’énergie dépensés.

« C’est ce qu’il y a de mieux : regarder les jeunes talents évoluer et devenir toujours meilleurs ! »

### DES JUMEAUX NUMÉRIQUES POUR AIDER

A l’avenir, ce travail devrait devenir plus efficace : « Nous allons utiliser l’apprentissage automatique et l’intelligence artificielle », explique Romanyuk. Un exemple ? Le développement de jumeaux numériques de batteries ou de cellules solaires, avant même qu’elles ne soient réellement fabriquées. De tels modèles virtuels pourraient être utilisés pour prédire les propriétés des matériaux, ce qui permettrait de réduire le nombre de cycles de production sous vide nécessaires, et donc d’économiser du temps et de l’énergie. « Aujourd’hui, la fabrication d’un lot de batteries à couches minces peut prendre jusqu’à une semaine », explique Romanyuk, « à l’Empa, nous sommes pour ainsi dire les recordmen du vide ! »

Sa compensation ? Le grand air ! En nageant, en courant ou en parcourant les 6 kilomètres à vélo qui le séparent de son travail. Et à l’association de protection de la nature chez lui à Fällanden : observer et compter les oiseaux, construire des nids de cigognes et des nichoirs ; également avec ses deux fils, Marco et Taras, âgés de 3 et 14 ans. Romanyuk montre le plus jeune sur une photo joyeuse dans le jardin – mais peu après le cliché, ce dernier mis la main dans un nid de guêpes et a été puni par une piqûre. « Une piqûre, pas un drame – et une première expérience de grande curiosité, alias l’esprit de recherche. »

Plus d’informations : [www.empa.ch/web/s207](http://www.empa.ch/web/s207)



**MINUSCULE**  
Des cathodes à deux couches pour les batteries à l’état solide à couches minces sont appliquées sur le support. Le design en forme d’œuf permet de mieux placer les contacts.



**DANS LE DISCOURS DES SPÉCIALISTES**  
Au milieu : le docteur Joel Casella (à droite) avec Yaroslav Romanyuk. En bas : les « bras en caoutchouc » permettent de travailler dans des boîtes remplies d’argon, un gaz inerte.



Photos : Marion Nitsch

# QU'Y A-T-IL DANS LA BATTERIE DU FUTUR ?

Le groupe de recherche Empa de Maksym Kovalenko développe des matériaux innovants pour les accumulateurs de demain. Qu'il s'agisse de voitures électriques à recharge rapide ou d'accumulateurs d'électricité bon marché : pour chaque application, ils trouvent un matériau prometteur ou un procédé de fabrication inédit.

Texte : Anna Ettlin



**SOUS PRESSION**  
Kostiantyn Kravchyk étudie s'il est possible de réduire la croissance indésirable des dendrites par la pression. Le travail sur les nouvelles batteries se fait sous atmosphère protectrice.

Qu'est-ce qui fait une bonne batterie ? Est-ce sa capacité ? Sa vitesse de charge ? Ou bien son prix ? La réponse dépend de l'utilisation de la batterie, explique

Kostiantyn Kravchyk, chercheur à l'Empa. Dans le groupe « Functional Inorganic Materials », dirigé par Maksym Kovalenko et faisant partie du laboratoire « Thin Films and Photovoltaics » de l'Empa, le scientifique développe de

nouveaux matériaux afin de rendre les batteries de demain plus performantes et la vitesse de charge plus rapides, ou tout simplement moins chères.

Deux domaines d'application des batteries rechargeables sont déterminants pour le tournant énergétique : d'une part la mobilité électrique, d'autre part les accumulateurs dits stationnaires, qui stockent l'électricité produite par des sources d'énergie renouvelables comme le vent et le soleil. Les batteries

pour les voitures électriques doivent être compactes et légères, avoir une grande capacité et se recharger le plus rapidement possible. Les batteries stationnaires peuvent prendre plus de place. Mais elles ne sont rentables que si elles coûtent le moins cher possible.

## PAS UNE TÂCHE FACILE

En principe, chaque batterie se compose d'une cathode, d'une anode et d'un électrolyte. Dans les batteries lithium-ion traditionnelles, l'anode est

composée de graphite et la cathode d'un oxyde mixte de lithium et d'autres métaux, comme l'oxyde de lithium-cobalt (III). L'électrolyte conduit les ions de lithium de la cathode à l'anode et inversement, selon que la cellule est en cours de charge ou de décharge.

Lorsqu'il s'agit d'accumulateurs pour l'électromobilité, une densité énergétique aussi élevée que possible est souhaitable. « Avec une anode en lithium métallique pur au lieu du graphite, nous pourrions stocker plusieurs fois plus d'énergie dans une cellule de même taille », explique Kostiantyn Kravchyk. Cependant, le lithium n'est pas déposé et redéposé de manière uniforme lors de la charge et de la décharge de la cellule. Il se forme alors ce que l'on appelle des dendrites : des structures ramifiées de lithium métallique qui peuvent court-circuiter la batterie.

Une possibilité de ralentir la croissance des dendrites est l'utilisation d'électrolytes solides. Dans les batteries dites solides, au lieu d'un liquide, une couche de matériau solide conduit les ions de lithium de la cathode à l'anode et inversement.

Les exigences posées au matériau de l'électrolyte sont toutefois élevées. « On parle de recharger les batteries en dix à quinze minutes », explique Kostiantyn Kravchyk. « Cela nécessite une densité de courant très élevée, à laquelle des dendrites apparaissent même dans les batteries à l'état solide ». La densité de courant est le rapport entre l'intensité de courant et la surface à travers laquelle le courant circule. Autre danger : le dépôt et l'application irréguliers de lithium entraînent la formation de cavités à la limite entre l'électrode et l'électrolyte solide, ce qui réduit la surface disponible et augmente encore la densité de courant.

## UN MATÉRIAU, DEUX COUCHES

Dans le cadre de la ligne de promotion Fraunhofer ICON (« International Cooperation and Networking »), Kostiantyn Kravchyk et d'autres chercheurs de l'Empa ont maintenant poursuivi le développement d'un électrolyte solide très prometteur. Le matériau, l'oxyde de lithium-lanthane-zirconium, en abrégé LLZO, possède une conductivité ionique élevée et une stabilité chimique – des propriétés idéales pour l'utilisation dans les batteries.

« Nous avons transformé le LLZO en une membrane à deux couches, l'une dense et l'autre poreuse », explique Kostiantyn Kravchyk. Si l'on stocke du lithium dans les pores, on obtient une très grande surface de contact entre le lithium et l'électrolyte, et la densité de courant reste faible. La couche dense garantit qu'aucune dendrite ne puisse pousser vers l'autre électrode et provoquer un court-circuit. Et les chercheurs ont également pensé à la rentabilité : ils ont développé un procédé simple, peu coûteux et évolutif pour fabriquer les membranes à deux couches.

## DU FER PLUTÔT QUE DU COBALT CÔUTEUX

Les chercheurs ont suivi une toute autre approche dans le cadre d'un projet portant sur le stockage stationnaire des énergies renouvelables. « La métrique de loin la plus importante pour le stockage stationnaire est le prix », explique Kostiantyn Kravchyk. Les batteries utilisées aujourd'hui de manière isolée pour le stockage stationnaire sont basées sur la technologie lithium-ion et sont comparativement chères. « C'est pourquoi la majeure partie des besoins de stockage est encore couverte par des centrales de pompage-turbinage, bien qu'elles aient une densité énergétique très faible comparée aux batteries », poursuit le chercheur.

L'un des plus grands facteurs de coûts pour les batteries stationnaires sont les matériaux utilisés. Outre le lithium, il s'agit du cobalt et du nickel nécessaires à la fabrication de la cathode des batteries lithium-ion. La recherche de meilleurs matériaux pour la cathode a rapidement conduit les chercheurs à l'un des éléments les plus fréquents de la croûte terrestre : le fer.

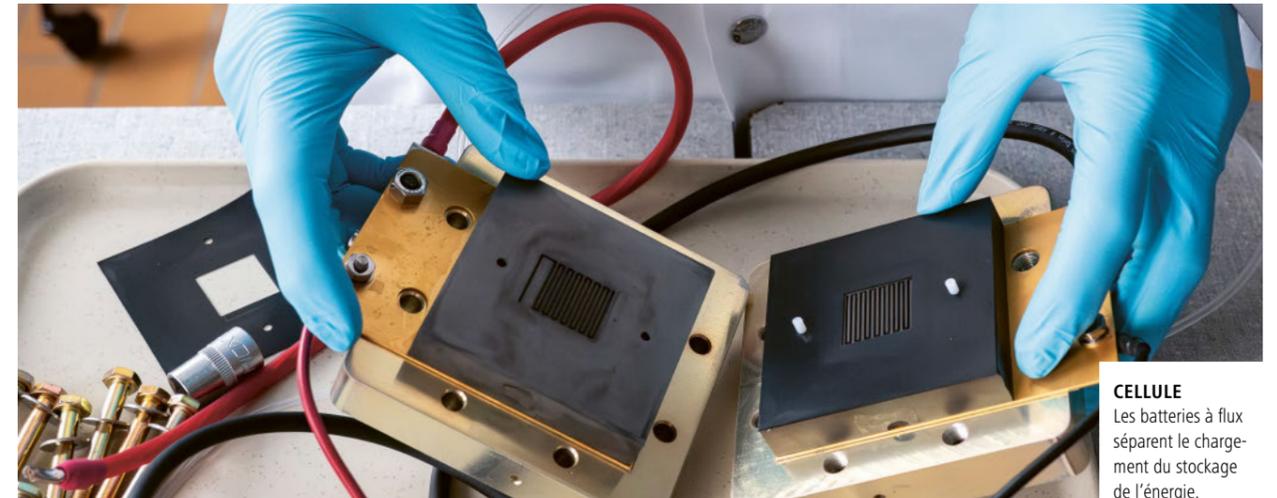
Pour leur cathode, les chercheurs ont combiné ce métal bon marché avec du fluorure. Plus précisément, ils ont utilisé de l'hydroxyfluorure de fer (III). « Jusqu'à présent, les approches visant à fabriquer une pile à base de fluorure de fer reposaient sur la conversion chimique », explique Kostiantyn Kravchyk. Dans ce cas, on transforme les ions de fer en fer métallique. « Ce processus n'est pas très stable », explique le chercheur. « Dans le cas idéal, les ions se déplacent simplement d'un pôle à l'autre, sans subir de grandes modifications structurales. » Un défi pour les chercheurs, car en réalité, les fluorures ont une mauvaise conductivité, aussi bien pour les électrons que pour les ions lithium. Mais l'équipe de Kostiantyn Kravchyk a la solution : au moyen d'un procédé simple et peu coûteux, ils ont transformé leur hydroxyfluorure de fer (III) en une structure cristalline spéciale. Cette structure, appelée pyrochlore, contient en son sein des canaux qui conduisent les ions de lithium.

« Notre batterie nous a permis d'obtenir des performances comparables à un prix nettement inférieur », explique Kostiantyn Kravchyk. « Nous sommes surpris de constater que jusqu'à présent, personne ou presque n'a étudié comment produire ce matériau prometteur à un coût raisonnable. » ■

Plus d'informations : [www.empa.ch/web/s207](http://www.empa.ch/web/s207)



**CHERCHEUR**  
David Reber veut développer un meilleur type de batterie de flux.



**CELLULE**  
Les batteries à flux séparent le chargement du stockage de l'énergie.

# CECI EST UNE BATTERIE

Les batteries à flux non toxiques et évolutives à base d'eau seraient une bonne solution pour stocker l'énergie renouvelable dans les zones urbaines – si ce n'est leur très faible densité énergétique. David Reber, chercheur à l'Empa, veut y remédier grâce à une conception intelligente des matériaux.

Texte : Anna Ettlin

Deux liquides colorés qui bouillonnent dans des tubes : est-ce à cela que ressemblera la pile du futur ? C'est la question à laquelle le chercheur de l'Empa David Reber veut répondre au cours des quatre prochaines années avec le soutien d'une bourse « Ambizione » du Fonds national suisse (FNS).

Les batteries dites à flux redox sont déjà connues depuis les années 1970. Contrairement aux batteries lithium-ion traditionnelles, elles ne stockent pas l'énergie dans des électrodes solides,

mais dans des réservoirs contenant des solutions d'électrolyte liquide. Le processus de charge et de décharge ne se fait pas dans les réservoirs eux-mêmes : pour cela, les électrolytes sont pompés à travers une cellule électrochimique.

Les piles liquides ne sont pas pratiques pour les téléphones portables, les ordinateurs portables ou les voitures. Elles sont en revanche très prometteuses pour les solutions de stockage stationnaires. Comme l'énergie est stockée à l'extérieur de la cellule proprement dite, les batteries à électrolyte liquide sont particulièrement faciles à

dimensionner de manière ciblée. Si la batterie doit se charger et se décharger plus rapidement, il faut une cellule électrochimique plus grande. Si elle doit avoir une plus grande capacité de stockage, il faut des réservoirs plus grands. « Avec l'utilisation croissante des énergies renouvelables, nous aurons besoin d'un stockage d'énergie à grande échelle, y compris dans les zones urbaines », explique David Reber. Les batteries flow présentent un autre avantage : si l'on utilise des électrolytes à base d'eau, elles ne sont en principe pas inflammables, contrairement aux batteries lithium-ion traditionnelles.

Photo : Empa

## DENSITÉ D'ÉNERGIE EXTERNALISÉE

Pourtant, cette technologie n'a pas encore réussi à s'imposer. David Reber connaît le problème principal : « Les batteries à flux ont une densité énergétique environ dix fois inférieure à celle des batteries à matériaux de stockage solides », explique-t-il. Plus la quantité de matériau de stockage pouvant être dissoute dans l'électrolyte est importante, plus la densité énergétique d'une batterie à flux est élevée. « Cependant, des concentrations élevées rendent la solution épaisse et il faut beaucoup plus d'énergie pour la pomper à travers la cellule », poursuit le chercheur.

C'est précisément ce problème que David Reber veut maintenant résoudre dans son travail au laboratoire « Materials for Energy Conversion » de l'Empa – avec une approche inhabituelle. Alors que la plupart des projets sur les batteries à flux se concentrent sur des matériaux de stockage plus solubles, il veut découpler complètement le stockage de l'énergie de la solution électrolytique. « Ma vision est de développer une sorte d'hybride entre une batterie à flux et une batterie lithium-ion », explique le chercheur. Pour cela, il veut ajouter des

Photo : Empa

matériaux de stockage solides, tels que ceux utilisés dans les batteries de téléphones portables, dans le réservoir de la batterie à flux. « Si le matériau dissous et le matériau de stockage solide sont parfaitement adaptés l'un à l'autre, ils peuvent transférer de l'énergie entre eux », explique David Reber. « Il est ainsi possible de combiner l'évolutivité des batteries à flux avec la densité énergétique élevée des batteries à matériaux de stockage solides. »

## MATÉRIAUX RECHERCHÉS

Mais le chercheur doit d'abord trouver des paires de matériaux appropriés qui permettent l'échange d'énergie et qui restent stables sur une longue période. « Idéalement, une batterie à flux redox devrait pouvoir fonctionner pendant environ 20 ans », explique-t-il.

La compatibilité d'une paire de matériaux dépend de ce que l'on appelle le potentiel redox des substances : à quelle tension elles cèdent ou absorbent des électrons. « J'ai déjà quelques paires possibles en tête », explique David Reber. Et si une paire prometteuse ne correspond pas exactement, ses potentiels redox peuvent être manipulés par certaines opérations chimiques. L'une

des idées de David Reber est d'utiliser un chélate comme matériau de stockage dissous : une molécule organique à plusieurs bras qui « s'enroule » autour d'un ion métallique. Le potentiel redox varie en fonction du nombre de bras de la molécule organique – le ligand. David Reber a déjà mené des recherches sur les batteries redox à base de chélate pendant son postdoctorat à l'Université du Colorado à Boulder ; il recevra pour cela le prestigieux « Battery Division Postdoc Award » lors de la réunion annuelle de l'« Electrochemical Society » à Göteborg en octobre.

A la fin de sa période de financement « Ambizione » de quatre ans, David Reber espère avoir une batterie qui fonctionne bien avec un stockage fixe supplémentaire. « Si cette approche fonctionne, les possibilités d'utilisation seront très variées », dit-il. Ainsi, les batteries Flow compactes avec un facteur de forme flexible pourraient être intégrées beaucoup plus facilement dans les zones urbaines. « Tout ce qu'il faudrait pour cela, ce serait des pompes et quelques tuyaux », ajoute le chercheur. ■

Plus d'informations : [www.empa.ch/web/s501](http://www.empa.ch/web/s501)

# UN TREMPLIN POUR LA RECHERCHE SUR LES PILES

Des chercheurs de l'Empa veulent accélérer le développement de nouveaux accumulateurs d'énergie dont le besoin est urgent, à l'aide du robot-batterie « Aurora ». Le projet fait partie de l'initiative de recherche européenne « Battery2030+ », récemment financée par l'UE à hauteur de plus de 150 millions d'euros. En outre, le projet fait partie de l'initiative « Open Research Data » du Conseil des EPF, qui promeut la numérisation et le libre accès aux données de recherche.

Texte: Andrea Six

Le monde a un besoin urgent de nouveaux types de stockage d'énergie. Mais développer des concepts de batteries entièrement nouveaux et explorer leur potentiel est actuellement un processus de longue haleine, comme le souligne Corsin Battaglia, directeur du laboratoire « Materials for Energy Conversion » de l'Empa à Dübendorf et professeur à l'ETH Zurich: « Notre objectif est d'accélérer ce processus », explique Corsin Battaglia. Cette accélération se manifeste actuellement sous la forme de la plate-forme robotisée « Aurora », qui doit prendre en charge de manière entièrement automatisée et à l'avenir également autonome la sélection des matériaux, l'assemblage et l'analyse des cellules de batteries en laboratoire. Faisant partie de la « Materials Acceleration Platform » européenne, qui est mise en place dans le cadre du projet européen « Battery2030+ » « BIG-MAP », les processus de développement actuels doivent se dérouler environ dix fois plus rapidement. Pour une recherche et un développement de batteries compétitifs au niveau international, des

étapes de travail longues et sujettes à des erreurs dans le processus d'innovation sont désormais automatisées au moyen d'« Aurora ». La plate-forme robotique est actuellement en cours de développement dans les laboratoires de l'Empa, en collaboration avec la société Chemspeed Technologies AG. Actuellement, le chercheur de l'Empa Enea Svaluto-Ferro met en œuvre les étapes de travail et « entraîne » « Aurora ». « Pendant que le robot pèse, dose et assemble les différents composants de la batterie avec une haute précision, qu'il initie et termine les cycles de charge avec précision ou qu'il effectue d'autres étapes répétitives, les chercheurs peuvent faire avancer le processus d'innovation sur la base des données générées », explique Enea Svaluto-Ferro.

**SMART, AUTONOME ET CHIMIO-AGNOSTIQUE**  
A l'avenir, « Aurora » devrait également apprendre à travailler de manière autonome. Grâce à l'intelligence artificielle, « Aurora » pourrait ainsi créer des modèles mathématiques et décider quelles expériences doivent être réalisées dans

## L'UE INVESTIT 150 MILLIONS DANS LES BATTERIES DURABLES

« Battery 2030+ » est une initiative de recherche européenne qui vise à développer les batteries du futur. Elle se concentre sur les batteries respectueuses de l'environnement, performantes et durables, qui sont essentielles pour la transition vers une société neutre en termes de climat. Dans le cadre du programme de recherche européen « Horizon Europe », l'UE a récemment attribué plus de 150 millions d'euros à des projets de recherche coordonnés par « Battery 2030+ ». « Battery 2030+ » a pour objectif de faire de l'Europe le leader mondial en matière de développement et de production de batteries respectueuses de l'environnement.

une prochaine étape et quels matériaux et composants sont des candidats particulièrement prometteurs pour l'application de batterie souhaitée. En effet, la recherche de nouveaux matériaux de batterie peu coûteux, facilement disponibles et ne présentant pas



### ATMOSPHÈRE PROTECTRICE

Dans la boîte à gants, Enea Svaluto-Ferro contrôle les étapes du processus.

Photo: Empa

d'inconvénients techniques est actuellement en cours dans le monde entier.

« Comme la plateforme est utilisable indépendamment des matériaux, de la chimie des batteries et de leur génération, elle pourrait donc non seulement

servir à étudier les batteries lithium-ion, mais aussi à tester à l'avenir des batteries sodium-ion alternatives ou des batteries dotées d'un mécanisme d'auto-régénération », explique Enea Svaluto-Ferro. « Grâce à l'agnosticité chimique « Aurora », nous pouvons en

outre amener plus efficacement et plus rapidement des prototypes issus de nos laboratoires, comme les batteries à l'eau salée ou les batteries à l'état solide, à la viabilité commerciale », explique le directeur du laboratoire, Corsin Battaglia.

« Aurora » n'est pas seule dans ce cas. La plate-forme robotique est intégrée dans l'initiative « Open Research Data » du Conseil des EPF, qui a pour objectif de faire progresser la numérisation dans la recherche et de mettre les données à la disposition de la communauté scientifique. On utilise entre autres « AiiDA », un système de « gestion de flux de travail open source » développé dans le cadre du Pôle de recherche national MARVEL. Pour la communication entre l'IA « Aurora » et la plate-forme « AiiDA », les chercheurs de l'Empa développent actuellement le logiciel adéquat en collaboration avec des chercheurs de l'EPFL et du PSI. « Aurora » est ainsi la première plate-forme robotique à être couplée au système « AiiDA » existant. Les données sont finalement transmises au système de gestion des données openBIS, qui est développé à l'ETH Zurich.

Pour la recherche sur les batteries, cela signifie que les différentes étapes du processus par lesquelles passent les nombreuses cellules de la batterie sont surveillées et évaluées efficacement et que les données peuvent être retracées à tout moment jusqu'à leur origine. « Cela accélère énormément les processus d'innovation et place « l'industrie 4.0 » à côté d'une numérisation complète dans le domaine de la recherche et du développement », explique Corsin Battaglia, chercheur à l'Empa. ■

Plus d'informations:  
[www.empa.ch/web/s501/research](http://www.empa.ch/web/s501/research)

# CHASSE AUX MÉTAUX LOURDS

Bien qu'il existe des valeurs limites strictes, les batteries des anciens types peuvent encore contenir des substances nocives comme le mercure, le cadmium et le plomb. L'Office fédéral de l'environnement (OFEV) a donc mis en place une campagne de contrôle. Avec une méthode d'analyse des métaux lourds spécialement développée à cet effet, l'Empa a établi les bases de cette campagne.

Texte: Rémy Nideröst

## RISQUE

Les anciens types de piles peuvent contenir des métaux lourds.



Difficile d'imaginer notre vie sans batteries, qui servent à stocker l'énergie. Elles sont pratiquement omniprésentes et sont utilisées comme batteries de démarrage, dans les installations industrielles, mais aussi dans des objets quotidiens tels que les jouets, les montres, les radios, les ordinateurs portables, les téléphones mobiles, les lampes de poche, les appareils auditifs, etc. La demande en batteries – dont font également partie les accumulateurs – est énorme. Utilisées de plus en plus dans les accumulateurs, les matières premières se font déjà partiellement rares et leur prix augmente en conséquence. C'est pourquoi des recherches intensives sont menées pour remplacer les matières premières rares ou même très rares par d'autres plus abondantes.

De plus, certaines substances, comme le cadmium ou le plomb, contenues dans certaines batteries sont nocives, voire toxiques. Là aussi, la science cherche des substituts non problématiques. Et il existe effectivement des pistes de

recherche prometteuses pour améliorer encore la durabilité des batteries.

## QU'Y A-T-IL DANS UNE BATTERIE?

Bien que de nombreux types de piles largement répandus sur le marché – comme les piles lithium-ion – ne contiennent pas de métaux lourds, il existe encore d'anciens types de piles contenant des métaux lourds. En Suisse, divers types de batteries sont vendus, principalement par les grands distributeurs. Ils se distinguent notamment par les matériaux utilisés. Beaucoup fonctionnent à base de zinc-manganèse ou de lithium-ion, tous deux sans métaux lourds. En Suisse comme dans l'UE, le commerce et la vente de batteries contenant du mercure (symbole chimique: Hg) ou du cadmium (Cd) sont fortement limités. La valeur limite pour le mercure dans toutes les batteries est de 5 mg/kg et celle pour le cadmium de 20 mg/kg dans les batteries portables. Pour le plomb, une déclaration sur la batterie ou sur l'emballage est obligatoire à partir d'un taux massique de plus de 40 mg/kg.

Mais à quoi servent les prescriptions s'il n'est pas possible de contrôler si elles sont respectées? En effet, jusqu'à récemment, il n'existait pratiquement aucun moyen de vérifier leur respect en Suisse; il n'y avait tout simplement pas de méthode fiable et reconnue pour déterminer avec précision la teneur des substances citées plus haut dans les batteries.

## DE NOMBREUSES DÉCOUVERTES SUR LES BATTERIES

Une équipe de la section «Advanced Analytical Technologies» de l'Empa, dirigée par le chimiste Renato Figi, s'est donc attelée, sur mandat de l'OFEV, au développement d'une méthode permettant d'effectuer des analyses des métaux lourds que sont le mercure, le plomb et le cadmium dans divers types de batteries. Une tâche qui ne s'avérait

pas si simple. En effet, contrairement à de nombreux objets qui peuvent être simplement broyés pour analyser leurs composants et dont les éléments chimiques peuvent ensuite être analysés en solution par divers spectromètres, les batteries ne peuvent pas être simplement broyées. Le simple fait d'essayer d'ouvrir un accumulateur peut s'avérer dangereux. Il y a régulièrement des accidents au cours desquels des batteries ont explosé suite à de telles manipulations.

Claudia Schreiner ne pouvait pas s'exposer à ce danger dans le laboratoire de l'Empa. Elle s'est donc adressée à un collègue de l'Empa, spécialiste des batteries et de leurs dangers. Marcel Held, de la section «Transport at Nanoscale Interfaces», lui a conseillé de commencer par décharger soigneusement toutes les batteries à examiner. Ce n'est qu'ensuite qu'il est possible de s'aventurer dans la «vie intérieure» des batteries.

Mais toutes les batteries ne se ressemblent pas. Il existe d'innombrables types de construction. Même si de l'extérieur deux batteries peuvent sembler totalement similaires, la structure interne peut être très différente!

Une autre chose est apparue au cours des travaux: Les substances potentiellement dangereuses ne se trouvent pas toujours là où on les attendrait. Elles peuvent aussi se trouver dans l'enveloppe qui pourrait a priori paraître comme non problématique.

## UN LONG CHEMIN VERS UNE MÉTHODE INNOVANTE

Mais le travail laborieux en laboratoire a porté ses fruits: grâce à la méthode innovante de l'Empa, les substances contenues dans les batteries courantes peuvent désormais être déterminées de manière fiable et même à l'état de traces. Pour l'analyse, les batteries



## À L'INTÉRIEUR

Seules les petites piles-boutons sont analysées dans leur ensemble, les batteries plus grosses sont démontées.

doivent d'abord être déchargées puis séparées. Les divers composants des différents types de batteries sont triés puis dissous sous pression à l'aide d'un mélange d'acides. Les métaux lourds se retrouvent ainsi en solution et peuvent être déterminés par spectroscopie.

Cette méthode permet désormais de contrôler le respect des réglementations existantes. Elle est utilisée dans le cadre d'une vaste campagne de l'OFEV. Afin que les échantillons des différents types de batteries fournissent une image aussi représentative que possible, environ 80 batteries différentes ont été sélectionnées au cours de l'année et analysées ensuite par l'Empa.

La direction de la campagne est assurée par le laboratoire cantonal de Zurich. Les résultats sont attendus pour 2024.

Plus d'informations: [www.empa.ch/web/s502](http://www.empa.ch/web/s502)

Photo: Empa

Photo: Empa



**PROTOTYPE**  
Ici, les batteries usagées sont démontées en éléments individuels.

## LOIN D'ÊTRE LA FIN

L'Empa et Kyburz Switzerland AG cherchent ensemble des moyens de recycler les batteries lithium-ion usagées de manière efficace et en ménageant les ressources. Une installation-pilote spécialement conçue à cet effet sépare les anciennes batteries en leurs composants afin de pouvoir récupérer les matériaux de la manière la plus pure possible.

Texte: Anna Ettlin

Photo: Kyburz Switzerland AG

**T**out le monde connaît ce phénomène avec son téléphone portable ou son ordinateur portable: avec le temps, la capacité de la batterie diminue, de sorte que l'on doit recourir de plus en plus souvent au câble de recharge. Il en va de même pour les batteries beaucoup plus grandes des véhicules électriques: bien que les constructeurs automobiles puissent désormais garantir une durée de vie de huit à dix ans pour les batteries lithium-ion des véhicules électriques, celles-ci doivent également être recyclées tôt ou tard.

Dans le cadre d'un projet soutenu par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), le constructeur suisse de véhicules électriques Kyburz Switzerland AG et l'Empa se sont fixé pour objectif de recycler les batteries hors d'usage des véhicules électriques. Pour ce faire, Kyburz a développé, avec le soutien de l'Empa, une installation de recyclage qui sépare les vieilles batteries en leurs composants. Avant qu'une batterie n'atterrisse dans l'installation de recyclage, elle peut encore avoir une deuxième, voire une troisième vie. Après sa première utilisation dans les scooters électriques jaunes à trois roues, connus dans toute la Suisse, que Kyburz fabrique pour la Poste Suisse SA, elle peut par exemple encore être utilisée dans des véhicules de « seconde vie », alimentés par des batteries déjà utilisées. Si la capacité de la batterie diminue encore, ce n'est pas forcément la fin. Les batteries à capacité réduite pourraient par exemple être utilisées dans des applications stationnaires pour le stockage de l'énergie solaire. Ce concept « multi-life » devrait permettre de réduire significativement la demande en matières premières primaires à l'avenir.

### SÉPARER SOIGNEUSEMENT

Lorsque la capacité de la batterie ne suffit plus pour cette réutilisation, elle

est finalement envoyée dans une usine de recyclage. « Dans ce type de pile, la cathode, le séparateur et l'anode sont assemblés en plusieurs couches dans un boîtier en plastique », explique Andrin Büchel, chercheur à l'Empa au département « Technologie et société ». En déroulant habilement le séparateur, les cathodes et les anodes – des feuilles de métal recouvertes de particules pour pouvoir stocker les ions lithium – sont triées dans deux conteneurs séparés.

Ensuite, on passe à la récupération des matériaux des électrodes. La cathode, une feuille d'aluminium recouverte de particules de lithium, de fer et de phosphate, est placée dans un bain d'eau, où les particules se détachent de la feuille et sont récupérées sous forme de poudre après décantation et séchage. On procède exactement de la même manière avec l'anode, qui est constituée d'une feuille de cuivre recouverte de particules de graphite. Mais dans ce cas, on obtient une suspension homogène, ce qui nécessite une étape supplémentaire dans une centrifugeuse pour séparer les particules.

« À la fin du processus de recyclage, nous récupérons le boîtier, le séparateur, les feuilles d'aluminium et de cuivre ainsi que les matériaux des électrodes, tous triés », explique Andrin Büchel. Ce type de processus de recyclage est appelé recyclage direct. « Lors du recyclage direct, la batterie n'est démontée que dans la mesure nécessaire pour conserver les propriétés fonctionnelles des matériaux. Cela nous permet de réduire au maximum le nombre d'étapes nécessaires, y compris pour le traitement ultérieur », explique Andrin Büchel.

### ANALYSER PRÉCISÉMENT

Mais le travail ne s'arrête pas à la récupération des matériaux. Pour pouvoir les réutiliser dans une nouvelle batterie, ils doivent être régénérés.

C'est précisément ce à quoi Andrin Büchel travaille actuellement avec son collègue de l'Empa, Edouard Quérel. Dans le laboratoire de batteries du département « Materials for Energy Conversion », ils ont déjà découvert le mécanisme qui se cache derrière le vieillissement du matériau de la cathode. « Le phosphate de fer et de lithium a une structure cristalline qui libère et réabsorbe des ions de lithium à chaque cycle de charge et de décharge », explique Andrin Büchel. « Cette structure est conservée, mais la quantité d'ions de lithium actifs diminue avec le temps. » Actuellement, les chercheurs travaillent à « rafraîchir » le matériau de la cathode en y ajoutant du lithium de manière ciblée. L'objectif final: construire de nouvelles batteries aussi performantes que possible à partir du matériau recyclé et boucler la boucle.

Dans les procédés de recyclage traditionnels, les piles sont broyées et les matériaux de valeur sont séparés par des procédés thermiques et chimiques par voie humide. En comparaison, le recyclage direct est censé être plus respectueux des ressources en ce sens qu'il consomme moins d'énergie et n'utilise pas de produits chimiques. Toutefois, le procédé développé par Kyburz et l'Empa ne convient pour l'instant qu'à la construction spécifique et à la chimie des cellules des batteries telles qu'elles sont utilisées entre autres dans les véhicules Kyburz. « Nous étudions actuellement si et comment ce procédé peut être appliqué à d'autres types de cellules dans le cadre du projet Innosuisse 'CircuBAT', auquel participent, outre Kyburz, 23 autres entreprises partenaires ainsi que onze partenaires de recherche », explique Andrin Büchel. ■

Plus d'informations: [www.empa.ch/web/s506](http://www.empa.ch/web/s506)

# UNE VISION À LONG TERME

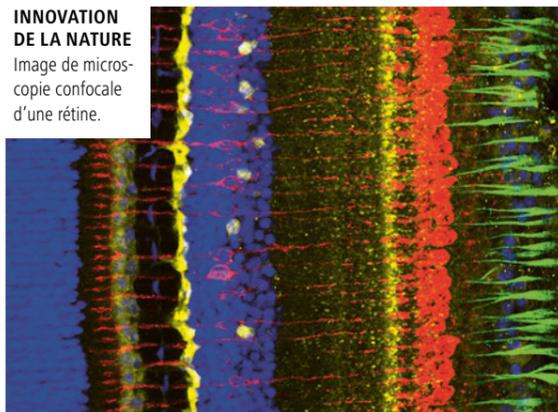
Fabricant d'instruments innovants pour la chirurgie, Heinz A. Oertli a fondé très jeune la société Oertli Instrumente AG. Aujourd'hui, il encourage des projets innovants à l'Empa avec un fonds du même nom dans le cadre du Zukunftsfonds.

Texte : Andrea Six

Il n'a jamais manqué d'idées – Heinz A. Oertli s'est mis à son compte à l'âge de 24 ans en tant que fabricant d'instruments pour la chirurgie ophtalmique, avec sa richesse d'idées. Grâce à ses innovations très recherchées, l'entreprise unipersonnelle d'origine s'est rapidement développée pour devenir une usine de qualité dans la vallée du Rhin saint-galloise, employant aujourd'hui près de 220 personnes, qu'il a toutefois transmise à d'autres personnes il y a environ 30 ans. L'idée la plus récente de l'inventeur, aujourd'hui âgé de plus de 90 ans, lui est venue il y a quelque temps lors d'une visite de l'Empa à Saint-Gall : On pourrait faire avancer la recherche à l'Empa, le creuset de l'innovation, en particulier dans le domaine du développement d'instruments, avec des fonds privés.

Le point commun entre l'ancien fabricant d'instruments et les chercheurs en matériaux de l'Empa va au-delà de l'esprit d'innovation : dès le début de son activité d'entrepreneur, Heinz A. Oertli était fasciné par les matériaux et les technologies innovants. Pionnier dans son domaine, il a cherché de nouveaux matériaux pour des instruments de précision inoxydables et antimagnétiques destinés à la chirurgie ophtalmique. Il a trouvé ce qu'il cherchait dans l'industrie horlogère, qui a des exigences comparables pour ses outils. Ce sens de l'invention qui lui est propre, Heinz A. Oertli l'encourage désormais en créant un fonds du même nom dans le cadre du l'Empa Zukunftsfonds.

**INNOVATION DE LA NATURE**  
Image de microscopie confocale d'une rétine.



## CAPTEUR DE PRESSION

Désormais, le «Heinz A. Oertli Fonds», créé en 2022, soutient les deux premiers projets. L'un d'eux porte sur de nouvelles possibilités de traitement du glaucome. L'objectif est de permettre à l'œil de se traiter lui-même sans l'aide d'un médecin. Chez les personnes souffrant de glaucome, les cellules nerveuses de la rétine meurent avec le temps – jusqu'à la cécité. Chez une grande partie des personnes concernées, une pression interne élevée dans l'œil représente un risque de développement du glaucome. Yashoda Chandorkar et Markus Rottmar, chercheurs de l'Empa au laboratoire «Biointerfaces» de Saint-Gall, développent maintenant, en collaboration avec le département d'ophtalmologie de l'hôpital vétérinaire de Zurich, un système autorégulateur composé d'un minuscule capteur ultrasensible qui mesure la pression oculaire et normalise la pression du liquide de la chambre oculaire par le biais d'une valve en hydrogel biocompatible.

## SOUDER AU LIEU DE COUDRE

Un deuxième projet, également soutenu par le «Heinz A. Oertli Fonds», a pour objectif de ménager les tissus oculaires très sensibles lors des opérations grâce à un procédé de brasage basé sur le laser. Jusqu'à présent, l'utilisation d'une aiguille et d'un fil

était courante pour les interventions sur le cristallin en cas de cataracte ou pour les opérations de la cornée. Le travail au laser est certes utilisé actuellement, mais il repose sur un procédé de soudage à des températures élevées. Inge Herrmann, professeur à l'ETH et directrice du groupe «Nanoparticle Systems Engineering» à l'Empa à Saint-Gall, développe avec son équipe un procédé de brasage au laser peu invasif qui permet de refermer efficacement et en douceur les plaies de l'œil. Le matériau de brasage biologique avec ce que l'on appelle des nanoabsorbants doit améliorer les propriétés mécaniques dans les tissus, accélérer la guérison et réduire la formation de cicatrices. Le projet peut maintenant démarrer grâce au soutien du «Heinz A. Oertli Fonds», en collaboration avec l'Hôpital cantonal de Saint-Gall et l'Hôpital universitaire de Zurich.

Plus d'informations :  
[www.empa.ch/web/s404](http://www.empa.ch/web/s404) / [www.empa.ch/web/s403](http://www.empa.ch/web/s403)

# Rendre possible la médecine de demain.



Faites la différence!  
Soutenez le Zukunftsfonds  
«Médecine» de l'Empa.  
[empa.ch/zukunftsfonds](http://empa.ch/zukunftsfonds)

**Empa**  
Zukunftsfonds

# BRUIT FERROVIAIRE VIRTUEL

A l'Empa, des spécialistes de l'acoustique étudient depuis des années comment le bruit est généré par les trains de voyageurs et de marchandises – et quelles mesures techniques et architecturales sont particulièrement efficaces pour le combattre. Leurs connaissances théoriques et pratiques ont été intégrées dans le projet « SILVARSTAR ».

Le résultat est un outil de simulation du bruit ferroviaire qui peut également être utile dans la pratique.

Texte : Norbert Raabe



## ÉVALUER LE BRUIT

L'écran montre ce que l'utilisatrice voit en trois dimensions dans la réalité virtuelle – avec le bruit réaliste du train exactement dans sa position.

Pour les riverains des voies ferrées, il s'agit souvent d'une nuisance – et pour les professionnels qui souhaitent les aider, d'un défi si complexe qu'il devrait y avoir plus d'un seul mot pour désigner le « bruit ferroviaire ». Le bruit de roulement des roues en acier sur des rails rugueux ou plus lisses, les sons de freinage à différentes fréquences, le bruit des moteurs, les bruits aérodynamiques... – tout cela atténué ou influencé par les murs antibruit, les talus, la nature du sol sous les voies et également par l'environnement dans lequel les ondes sonores se propagent.

Les chercheurs de l'Empa réunis autour du chef de groupe Reto Pieren du département « Acoustique/Réduction du bruit » savent par expérience pratique et théorique à quel point ces conséquences acoustiques du trafic ferroviaire sont complexes. Depuis des années, ils étudient le phénomène par des mesures, des simulations et des validations : des connaissances qui ont débouché sur le projet européen de deux ans « SILVARSTAR » avec de nombreux partenaires (voir l'encadré).

## PROJET INTERNATIONAL SOUTENU PAR L'UE

Le projet de recherche européen « SILVARSTAR », qui a duré deux bonnes années, a été soutenu par « Europe's Rail » dans le cadre du programme européen « Horizon 2020 ». Outre l'Empa, des partenaires industriels et académiques de cinq pays européens ont participé au consortium du projet : Vibratex (France, coordination), Wölfel Engineering (Allemagne), l'« University of Southampton » (Angleterre), KU Leuven et UNIFE, l'« Union des Industries Ferroviaires Européennes » (toutes deux de Belgique). Outre la simulation du bruit ferroviaire, le projet a également développé des modèles pour les vibrations du sous-sol dues au trafic ferroviaire.

Photo : Empa

Les résultats ont été présentés par Reto Pieren lors du congrès « forum acusticum » à Turin : une simulation acoustique du bruit ferroviaire de différentes natures – audible et perceptible à l'aide de la réalité virtuelle. De tels outils pour l'« auralisation » existent sporadiquement sous forme de prototypes dans la recherche, mais ils ne sont pas encore disponibles dans la pratique de la planification et de la protection contre le bruit. Le « paquet complet » SILVARSTAR doit changer cela – grâce aux connaissances réunies de nombreux spécialistes. Alors que l'équipe de l'Empa, qui a dirigé le projet de simulation, a mis à profit son expertise acoustique issue de nombreux projets, des spécialistes de l'université de Southampton et de l'entreprise zurichoise Bandara VR GmbH ont apporté un précieux savoir-faire pour développer un système convivial. Le logiciel « Unity », largement utilisé par les développeurs de jeux professionnels, a notamment servi de base.

## DE NOMBREUX FACTEURS, ENCORE PLUS DE VARIATIONS

L'objectif était finalement de créer un outil que les non-spécialistes pourraient également utiliser. Par exemple, des politiciens des transports qui souhaitent évaluer l'impact d'un futur tracé ferroviaire. Une vidéo de passages, disponible sur le site Internet de SILVARSTAR de l'Empa, montre à titre d'exemple comment ils vivent de tels passages virtuels : pour une seule ligne, il est possible de comparer plusieurs scénarios, par exemple avec des types de trains allant du train de marchandises à l'ICE en passant par un train régional, avec des parois antibruit hautes ou basses, des types de roues et d'amortisseurs spécifiques qui ont également une influence audible sur le bruit des trains, et de nombreux autres facteurs. Et comme l'environnement joue également un rôle, les utilisateurs peuvent choisir entre « ville » ou « campagne » ou choisir une position de plain-pied ou surélevée, par exemple sur un balcon. Derrière ces

possibilités se cachent des algorithmes complexes dans un modèle de calcul basé sur la physique, qui ne produit pas de signaux acoustiques à partir de fichiers sonores archivés, mais les calcule et les génère tous individuellement – pour des centaines de sources de bruit et de facteurs d'influence, selon la complexité du scénario. Cela a également posé des défis à l'équipe de l'Empa. La grande diversité des influences permet certes des simulations proches de la réalité. Mais elle exigeait en même temps de réduire judicieusement l'enchevêtrement des algorithmes à l'essentiel – également en ce qui concerne le temps de calcul nécessaire : un PC moderne a besoin de jusqu'à trois heures pour faire passer un train de marchandises de 500 mètres, afin que ses émissions sonores puissent être rendues audibles dans différentes conditions.

## RÉACTIONS POSITIVES LORS DES DÉMONSTRATIONS

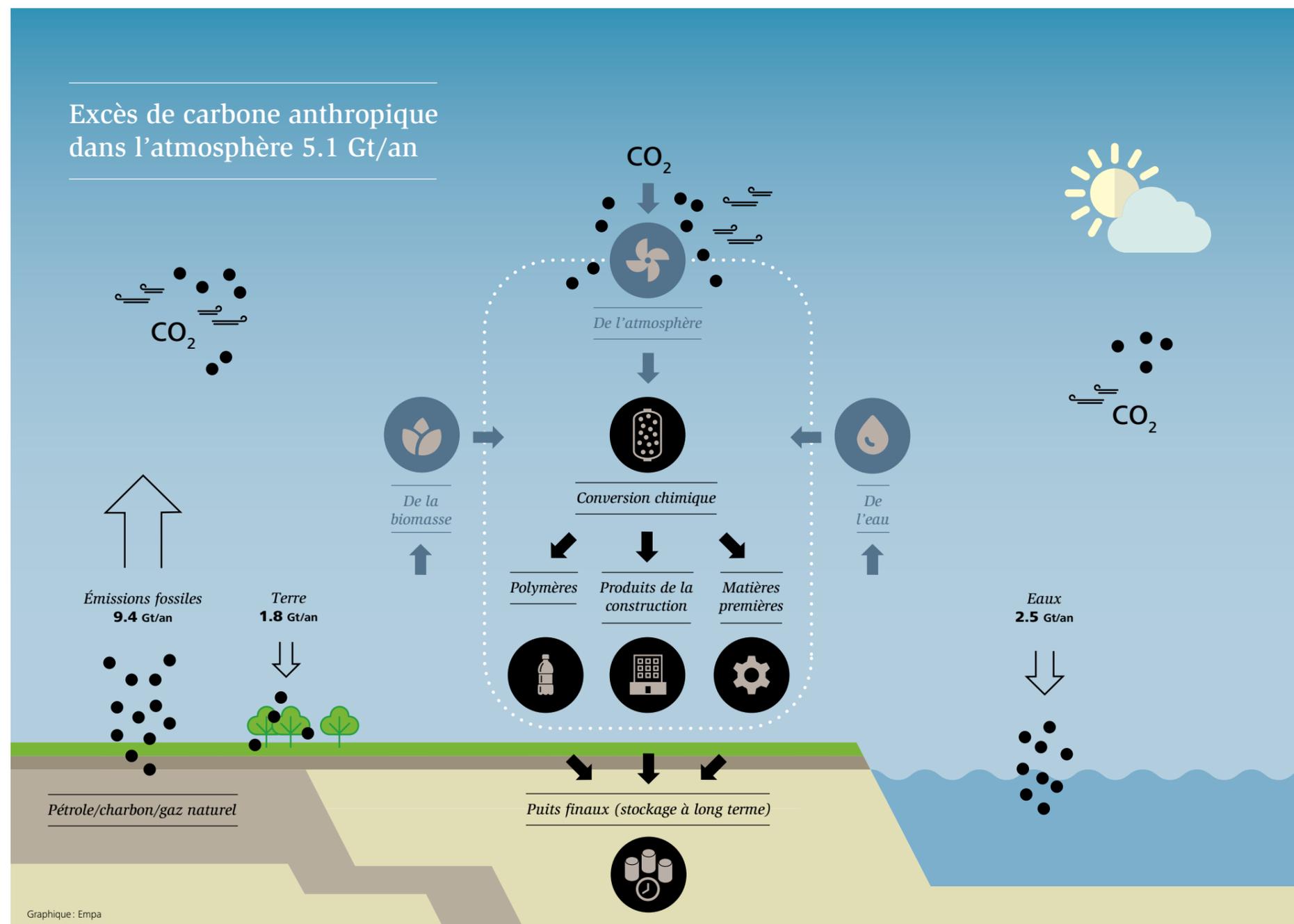
Mais l'effort en vaut la peine, comme l'a montré la validation du système. Les graphiques des courbes de bruit synthétisées sont très proches des valeurs comparatives mesurées et se recoupent même en partie. Des impressions subjectives ont été fournies par des démonstrations lors de salons de la technique des transports comme « InnoTrans » l'année dernière à Berlin : les visiteurs ont attesté d'une grande crédibilité de la simulation et ont montré un grand intérêt pour l'utilisation du « jeu de bruit ferroviaire » virtuel. Pour les personnes intéressées, le téléchargement des outils, y compris le contrat de licence à des fins non commerciales, est possible sur le site Internet SILVARSTAR de l'Empa. « Les premières utilisations de la simulation commencent déjà », déclare Reto Pieren, chercheur à l'Empa, « nous sommes très satisfaits des résultats et nous attendons de nombreuses applications dans le futur ».

Plus d'informations : [www.empa.ch/web/s509](http://www.empa.ch/web/s509)

# EN DEHORS DE L'AIR

Pour éviter des changements irréversibles du système climatique, nous devons extraire de l'atmosphère le CO<sub>2</sub> excédentaire produit par l'homme. C'est l'objectif d'une initiative de recherche à grande échelle de l'Empa : « Mining the Atmosphere ».

Texte : Michael Hagmann



## «WISSEN2GO»

CO<sub>2</sub> EINFANGEN, VERWERTEN UND SPEICHERN, UM NETTO-NULL ZU ERREICHEN



Mercredi 25 octobre 2023

Académie Empa et en ligne via Zoom, en allemand

Les énergies fossiles sont tout simplement... géniales : faciles à manipuler, haute densité énergétique, polyvalentes, disponibles en grandes quantités. Elles sont le fondement de notre progrès technologique et de notre prospérité des 200 dernières années. Nous en payons le prix fort : la Terre se dirige vers un effondrement climatique. Chaque année, nous « pompons » environ 9,4 milliards de tonnes nettes de carbone (sous forme de CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère. Les processus naturels, notamment par le biais de la végétation et des océans, permettent certes de compenser partiellement ces émissions gigantesques, mais il reste toutefois chaque année un « excédent » d'environ 5,1 milliards de tonnes de carbone atmosphérique. Depuis 1988 déjà, la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère est supérieure à 350 ppm (« parties par million »), valeur limite pour la stabilité du climat. Si celle-ci est dépassée pendant une période prolongée, le système climatique de la Terre risque de basculer – avec des conséquences parfois irréversibles.

Continuer comme avant n'est donc pas une option, et le zéro net n'est qu'un objectif intermédiaire. Il faut une solution globale qui soit techniquement et financièrement réalisable. Ce qui nous amène à « Mining the Atmosphere ». Contrairement à la simple capture du CO<sub>2</sub> et à son stockage dans le sol, l'approche « Mining » va beaucoup plus

loin : l'objectif est de développer un tout nouveau modèle économique mondial et le secteur industriel correspondant, qui transforme le CO<sub>2</sub>, matière première de l'avenir, en matériaux à valeur ajoutée pour remplacer les matériaux de construction et les produits pétrochimiques traditionnels. Cette approche postule donc un changement de perspective : la « mine » atmosphérique au lieu des mines souterraines. C'est un tournant d'une société émettrice de CO<sub>2</sub> en direction d'un zéro net et d'une société fixant le CO<sub>2</sub>, et cela en l'espace de 20 ans. Voilà pour l'idée – dont la mise en œuvre est une tâche du siècle, pour laquelle d'innombrables acteurs de la recherche et de l'économie doivent se mobiliser. Il s'agit en effet d'éliminer de l'atmosphère une quantité de carbone estimée à 400 milliards de tonnes (soit environ 1'500 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub>). Par la suite il s'agira de transformer ce carbone en matériaux à valeur ajoutée, polymères, matériaux de construction, etc. Le secteur de la construction, en particulier, a un rôle clé à jouer, car le béton et autres matériaux de ce type pourraient, en raison de leur masse, absorber une grande partie du carbone atmosphérique. Après avoir été recyclés plusieurs fois, les matériaux contenant du carbone pourraient être mis en décharge à la fin de leur « vie » en tant que puits de carbone final. ■

Apprenez-en plus sur ce sujet dans le numéro de décembre de l'Empa Quarterly.

## « MINING THE ATMOSPHERE » : CONSTRUIRE DE MANIÈRE PLUS DURABLE



**PENSÉE DE CO<sub>2</sub>**  
Un matériau isolant à base de matières premières végétales pourrait capter durablement le CO<sub>2</sub>.

Construons-nous à l'avenir avec du CO<sub>2</sub>? Le séminaire « RFA Built Environment » du 7 novembre présente un large éventail de recherches de l'Empa axées sur le concept « Mining the Atmosphere », c'est-à-dire sur l'extraction du CO<sub>2</sub> excédentaire de l'atmosphère et son utilisation comme ressource durable, par exemple dans l'industrie du bâtiment. Cette manifestation gratuite s'adresse aux parties prenantes, aux praticiens et aux chercheurs des secteurs de la construction, des bâtiments et des infrastructures, de l'énergie, de l'environnement et du développement durable.

Inscription jusqu'au 30 octobre sous : [www.empa-akademie.ch/rfa](http://www.empa-akademie.ch/rfa)

## L'ÉCONOMIE ET LA DURABILITÉ VONT DE PAIR



**EXPERTISE**  
La directrice de l'Empa Tanja Zimmermann (en haut à droite) et le directeur du laboratoire Mirko Kovac étaient parmi les orateurs.

Le « Swiss Green Economy Symposium » s'est déroulé du 5 au 7 septembre à Winterthur. La conférence sur l'économie et la durabilité en Suisse était placée sous le thème « Ensemble, produisons plus d'effets » et a montré, à l'aide d'exemples concrets, comment la collaboration entre l'économie, la politique, la science et les ONG contribue à une plus grande prospérité, à la protection de l'environnement et à une vie en commun plus durable. L'Empa était partenaire scientifique de l'événement. La directrice de l'Empa Tanja Zimmermann ainsi que Mirko Kovac, responsable du « Sustainability Robotics Lab » à l'Empa, faisaient partie des 250 intervenants. D'autres chercheurs de l'Empa ont participé à différents forums d'innovation.

[sges.ch](http://sges.ch)

Photos: Jannis Wernery/Empa, Adobe Stock

Photos: Empa

## SÉMINAIRES DE L'ACADÉMIE DE L'EMPA

(en allemand et en anglais)

24. – 25. OKTOBER 2023

**Konferenz:** Precision Photonic Systems '23  
**Zielpublikum:** Wissenschaft und Industrie  
[www.empa-akademie.ch/precision-photonic](http://www.empa-akademie.ch/precision-photonic)  
OST Campus Buchs, St. Gallen

25. OKTOBER 2023

**Wissen2go:** CO<sub>2</sub> einfangen, verwerten und speichern, um Netto-Null zu erreichen  
**Zielpublikum:** Öffentlichkeit  
[www.empa.ch/web/w2go/netto-null](http://www.empa.ch/web/w2go/netto-null)  
Empa, Dübendorf

07. NOVEMBER 2023

**Seminar RFA Built Environment:**  
Mining the Atmosphere  
**Zielpublikum:** Wissenschaft und Wirtschaft  
[www.empa-akademie.ch/rfa](http://www.empa-akademie.ch/rfa)  
Empa, Dübendorf

16. NOVEMBER 2023

**Kurs:** Metallische Gläser  
**Zielpublikum:** Industrie und Wirtschaft  
[www.empa-akademie.ch/metallglas](http://www.empa-akademie.ch/metallglas)  
Empa, Dübendorf

16. NOVEMBER 2023

**Technology Briefing:** Switzerland's Climate Neutrality 2050: The Journey through Energy Storage Technologies  
**Zielpublikum:** Industrie und Wirtschaft  
[www.empa.ch/web/tb/energy-storage](http://www.empa.ch/web/tb/energy-storage)  
EPFL Auditorium, Neuchâtel

Vous trouverez la liste complète des événements sur : [www.empa-akademie.ch](http://www.empa-akademie.ch).

## ABONNEMENT GRATUIT

## Lisez Empa Quarterly

Il suffit de remplir la carte postale – et notre magazine de recherche sera livré dans votre boîte aux lettres quatre fois par an en allemand, anglais ou français. Entièrement gratuit.

Ou en ligne sur : [www.empaquarterly.ch](http://www.empaquarterly.ch)



Empa  
Redaktion Empa Quarterly  
Überlandstrasse 129  
8600 Dübendorf  
Switzerland



Empa  
Redaktion Empa Quarterly  
Überlandstrasse 129  
8600 Dübendorf  
Switzerland

ABONNEZ-VOUS GRATUITEMENT

# Empa Quarterly

FORSCHUNG & INNOVATION



[www.empa.ch/web/s604/subscribenews](http://www.empa.ch/web/s604/subscribenews)

## ABONNEMENT CADEAU POUR:

Allemand

Anglais

Français

Adresse  Madame  Monsieur

Prénom, nom \_\_\_\_\_

Société, institut \_\_\_\_\_

Rue, n° \_\_\_\_\_

NPA, lieu \_\_\_\_\_

Pays \_\_\_\_\_

E-mail \_\_\_\_\_

Recommandation par \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ces données sont traitées confidentiellement et ne seront pas transmises à des tiers.

Oui, je souhaite m'abonner gratuitement à Empa Quarterly.

Allemand

Anglais

Français

J'ai changé d'adresse: Abonnement n° \_\_\_\_\_

Adresse  Madame  Monsieur

Prénom, nom \_\_\_\_\_

Société, institut \_\_\_\_\_

Rue, n° \_\_\_\_\_

Case postale \_\_\_\_\_

NAP, lieu \_\_\_\_\_

Pays \_\_\_\_\_

E-mail \_\_\_\_\_

Ces données sont traitées confidentiellement et ne seront pas transmises à des tiers.

THE PLACE WHERE INNOVATION STARTS.