

# Empa Quarterly

RECHERCHE & INNOVATION II #78 II DÉCEMBRE 2022

FOCUS

## SORTIR DE LA CRISE ÉNERGÉTIQUE

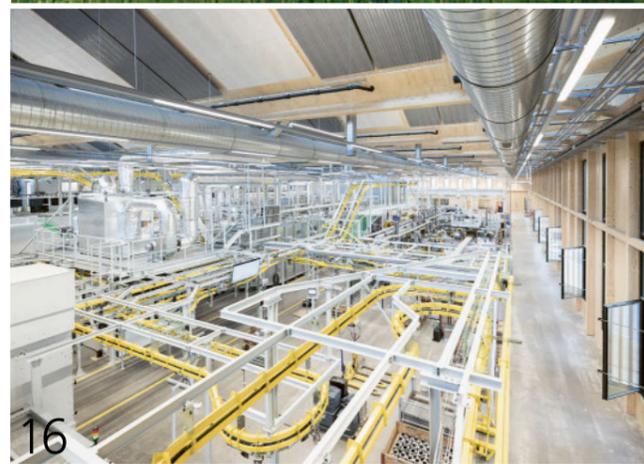
RÉUSSIR SON SPIN-OFF : ASTUCES ET VERTUS  
DES PLATINES VERTES : MATIÈRES PREMIÈRES RENOUVELABLES  
MINIATURISATION : ASSEMBLAGE AVEC DES NANOPÂTES

# [ CONTENT ]

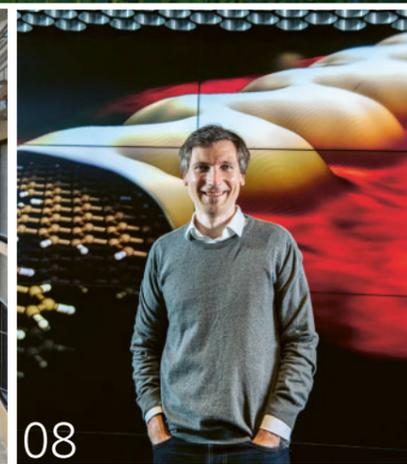
[ FOCUS : SORTIR DE LA CRISE ÉNERGÉTIQUE ]



13



16



08



28



24

[ FOCUS ]

**13** ESSAY  
Sur la transformation du système énergétique : Peter Richner, vice-directeur de l'Empa

**16** DÉCARBONISATION  
Une industrie sans émissions de CO<sub>2</sub> ?

**19** SYNFUELS  
Un nouveau réacteur pour la production de gaz synthétique

**22** CONTRÔLE INTELLIGENT  
L'algorithme « Viboo » économise de l'énergie de chauffage

[ THÈMES ]

**08** INTERVIEW  
Nouveau chef de département : perspectives avec le chercheur en matériaux Lorenz Herrmann

**11** ÉLECTRONIQUE VERTE  
Des matières premières renouvelables pour les platines

**24** SPIN-OFF  
Le fondateur de CTsystems, Gabor Kovacs, parle d'astuces et de vertus

**28** MINIATURISATION  
Assembler les plus petits composants avec des nanopâtes

[ RUBITS ]

**04** LA PHOTO

**06** BRIÈVEMENT

**30** EN ROUTE

[ COUVERTURE ]



La crise énergétique va nous tenir en haleine pendant des mois. Mais les chercheurs ne se lamentent pas, ils cherchent des solutions. Vous trouverez dans ce numéro quelques approches utiles sur le chemin escarpé qui mène au but.  
P.-S. : la photo de couverture montre le phare de Formentor, tout au nord de Majorque.  
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**

norbert.raabe@empa.ch

ISSN 2673-1746

Empa Quarterly (édition française)



## IL EST TEMPS D'ACCÉLÉRER!

Chère lectrice, cher lecteur,



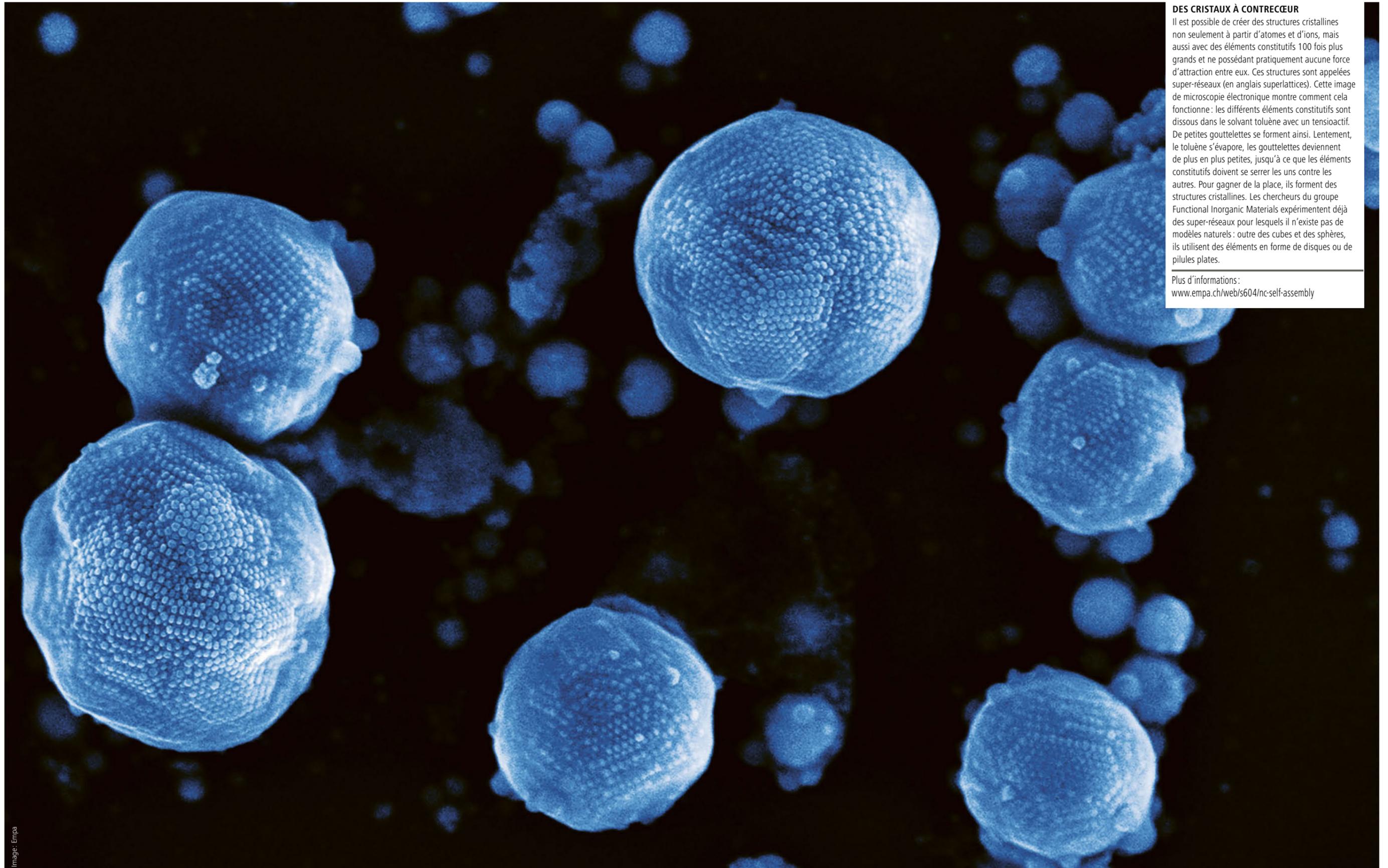
Les problèmes mondiaux appellent des solutions mondiales. Car ils nous concernent tous. Seulement, dans un système où tout le monde est responsable, en général... personne ne commence à chercher des solutions. On attend plutôt que les autres fassent quelque chose. Mais pour les « gros morceaux », le temps est compté. Attendre est donc la pire option – surtout lorsque des technologies qui pourraient réduire considérablement notre empreinte carbone sont prêtes, comme l'explique Peter Richner, directeur adjoint de l'Empa, à partir de la page 13.

Il existe des idées astucieuses sur la manière dont nous pourrions récolter suffisamment d'énergie dans la « ceinture solaire » de la Terre et la stocker – après l'avoir transformée en vecteurs d'énergie chimique comme le méthane synthétique (p. 19) – pour la distribuer et l'utiliser partout. Et si nous procédons de la manière décrite à partir de la page 16, il pourrait même en résulter des émissions négatives de CO<sub>2</sub> ; l'atmosphère en serait même délestée. Mais, comme nous l'avons dit, cela ne peut pas être réalisé sans coopération internationale.

Les cycles de matières fermés ne sont pas seulement une bonne idée pour le carbone, souligne le nouveau chef de département Lorenz Herrmann dans une interview (p. 8). En suivant cette idée de cycle, les chercheurs de l'Empa travaillent entre autres au développement de platines pour l'industrie électronique à partir de matières premières renouvelables.

Bonne lecture !

Votre MICHAEL HAGMANN



**DES CRISTAUX À CONTRECŒUR**  
Il est possible de créer des structures cristallines non seulement à partir d'atomes et d'ions, mais aussi avec des éléments constitutifs 100 fois plus grands et ne possédant pratiquement aucune force d'attraction entre eux. Ces structures sont appelées super-réseaux (en anglais superlattices). Cette image de microscopie électronique montre comment cela fonctionne : les différents éléments constitutifs sont dissous dans le solvant toluène avec un tensioactif. De petites gouttelettes se forment ainsi. Lentement, le toluène s'évapore, les gouttelettes deviennent de plus en plus petites, jusqu'à ce que les éléments constitutifs doivent se serrer les uns contre les autres. Pour gagner de la place, ils forment des structures cristallines. Les chercheurs du groupe Functional Inorganic Materials expérimentent déjà des super-réseaux pour lesquels il n'existe pas de modèles naturels : outre des cubes et des sphères, ils utilisent des éléments en forme de disques ou de pilules plates.

Plus d'informations :  
[www.empa.ch/web/s604/nc-self-assembly](http://www.empa.ch/web/s604/nc-self-assembly)

## COUP D'ENVOI DU VOYAGE VERS UN CIMENT AU BILAN CARBONE NÉGATIF



**LE BÉTON, FACTEUR ENVIRONNEMENTAL**  
Facteur environnemental du béton : la production de ciment doit générer moins d'émissions de CO<sub>2</sub>.

L'industrie du ciment émet de grandes quantités de dioxyde de carbone nuisibles au climat – mais des liants alternatifs à base de carbonate de magnésium pourraient même absorber le CO<sub>2</sub>. Le béton comme puits de carbone ? Les ciments qui ne sont pas à base de calcaire, alias carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>), mais de silicates de magnésium sont porteurs d'espoir. Un projet de recherche de la chercheuse de l'Empa Barbara Lothenbach, qui a récemment reçu pour cela l'un des premiers « Advanced Grants » du Fonds national suisse (FNS), doit en établir les bases dès l'année prochaine. Car contrairement aux ciments traditionnels, dont le durcissement a été étudié dans les moindres détails, ces matériaux soulèvent encore de nombreuses questions. Les spécialistes de l'Empa et leurs partenaires de l'université finlandaise d'Oulu vont donc

étudier ce qui se passe au niveau moléculaire dans sept domaines principaux. Comment durcissent de tels ciments et avec quelles formules ? Quels sont les effets de la température, du pH et d'autres facteurs tels que les accélérateurs de réaction ? Le volume d'un « béton de magnésium » reste-t-il stable à long terme ? Et quelle est sa résistance ? Au final, les résultats des essais en laboratoire et des modélisations thermodynamiques devraient être intégrés dans un « jumeau numérique » du ciment au carbonate de magnésium – une simulation des processus lors du durcissement et la base, espèrent les spécialistes de l'Empa, de formulations de bétons robustes qui fixent le plus de CO<sub>2</sub> possible.

[www.empa.ch/web/s308](http://www.empa.ch/web/s308)



**UNE TÂCHE PASSIONNANTE**  
Barbara Lothenbach, experte de l'Empa, dirigera ce projet de recherche stimulant.

Photo: istockphoto, Empa

Photos: Mairies Thurnheer, Empa

## SUCCÈS DU TOUR DE FINANCEMENT POUR LA SPIN-OFF DE L'EMPA

L'entreprise Nahtlos, une spin-off de l'Empa, a obtenu lors d'un premier tour de financement un million de francs d'un réseau de « business angels » de Suisse et du Liechtenstein ainsi que de la fondation Startfeld. Cette somme doit permettre d'accélérer l'entrée sur le marché d'une électrode innovante à base de textile destinée à des applications médicales. Au cours des deux dernières années, la jeune entreprise a développé de tels composants, notamment pour enregistrer l'activité cardiaque par électrocardiogramme – par exemple pour pouvoir détecter une fibrillation auriculaire. Les électrodes à base de textile permettent une utilisation douce et sans danger pour la peau, même si les électrodes doivent être portées pendant plusieurs jours, voire plusieurs semaines. Elles constituent donc une véritable alternative aux électrodes en gel, développées il y a 60 ans et qui sont encore aujourd'hui considérées comme la norme pour les applications médicales.

[www.nahtlos.com/](http://www.nahtlos.com/)



**OPTIMISTES**  
Les fondateurs de Nahtlos AG, José Näf et Michel Schmid, avec des prototypes (devant à gauche) d'électrodes à base de textile pour les ECG de longue durée dans leur laboratoire à Saint-Gall.

## UNE PILE EN PAPIER ACTIVÉE PAR L'EAU PARMIS LES MEILLEURES INVENTIONS DU MONDE



**EXCELLENT**  
La pile en papier est composée de deux cellules électrochimiques connectées en série aux deux extrémités de la bande de papier, séparées par une barrière d'eau (entre les lettres « m » et « p »).

L'équipe de Gustav Nyström du « Cellulose & Wood Materials Laboratory » de l'Empa a fait son entrée dans la liste des 200 inventions les plus importantes du magazine américain « Time » – avec sa pile jetable biodégradable dont le fonctionnement est déclenché par l'ajout d'eau. Le jury a décerné cette distinction à l'équipe dans la catégorie « Experimental » ; dans ce cadre, le jury évalue les inventions en fonction de leur originalité, de leur créativité, de leur efficacité, de leur impact et d'autres critères. La pile développée par le chercheur de l'Empa Gustav Nyström et son équipe se compose d'au moins une cellule électrochimique d'environ un centimètre carré. Sa particularité : le fait que tant le papier que le zinc et les autres composants soient biodégradables pourrait permettre de minimiser considérablement l'impact environnemental de l'électronique jetable à faible consommation d'énergie – un pas important vers l'électronique « verte ».

[www.empa.ch/web/s302](http://www.empa.ch/web/s302)

# « À L'EMPA, J'AI LE MEILLEUR DE DEUX MONDES »

Depuis environ six mois, Lorenz Herrmann dirige le département « Advanced Materials and Surfaces » de l'Empa. Dans cette interview, il explique dans quels domaines il souhaite réaliser des progrès avec de nouveaux matériaux, pourquoi la recherche fondamentale est essentielle pour le processus d'innovation – et en quoi la recherche à l'Empa se distingue de celle d'un centre de recherche industriel.

Interview: Michael Hagmann

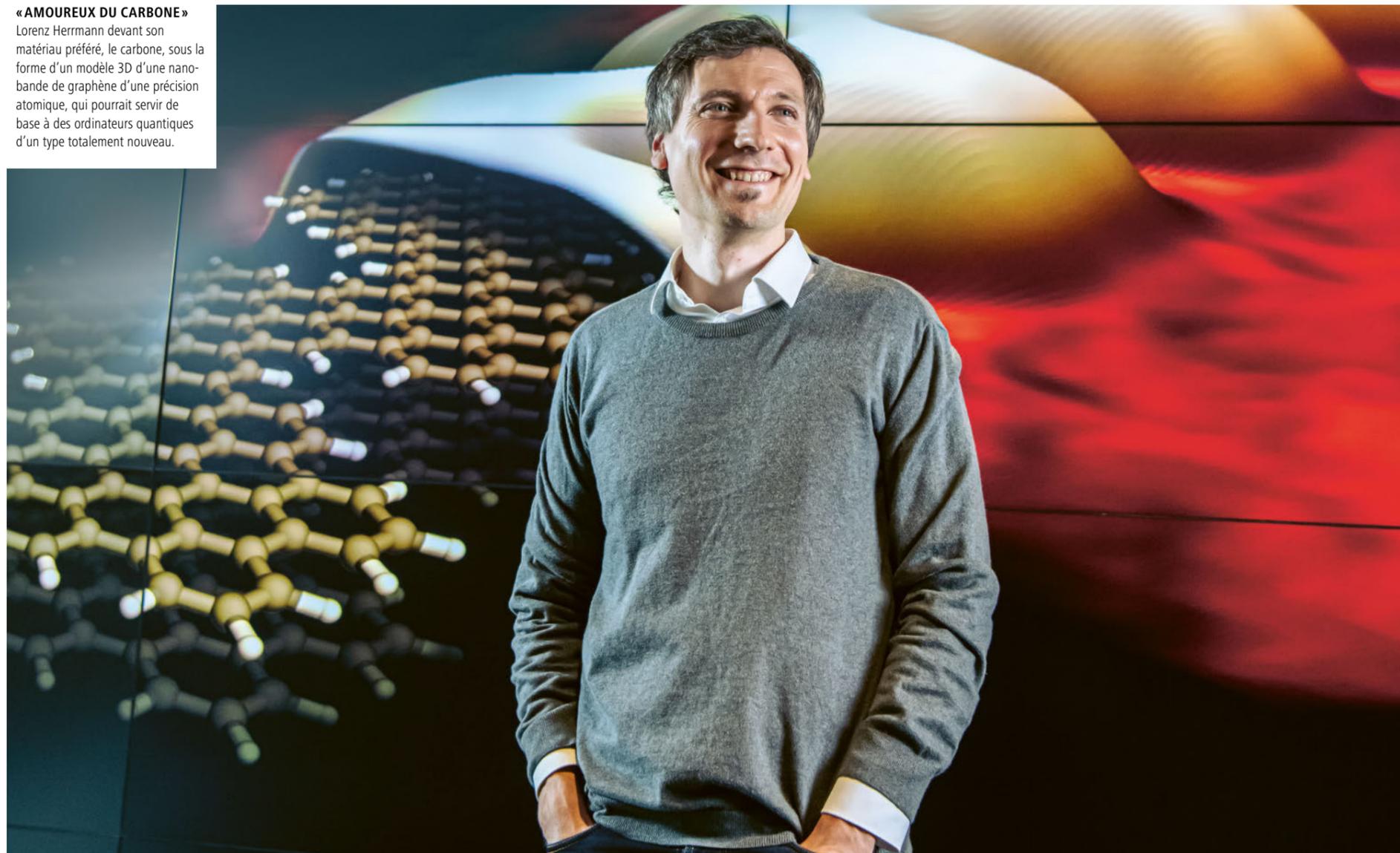
**Lorenz Herrmann, en tant que nouveau chef de département dans un institut de recherche sur les matériaux, une question simple: quel est votre matériau préféré?**

Clairement: le carbone.

**C'est venu rapidement – pourquoi cet élément en particulier?**

Le carbone m'a toujours accompagné jusqu'à présent: J'ai fait de la recherche en physique des solides sur les applications mécaniques et électroniques des

**« AMOUREUX DU CARBONE »**  
Lorenz Herrmann devant son matériau préféré, le carbone, sous la forme d'un modèle 3D d'une nanobande de graphène d'une précision atomique, qui pourrait servir de base à des ordinateurs quantiques d'un type totalement nouveau.



nanotubes de carbone. Ensuite, j'ai longtemps fait de la recherche industrielle dans le domaine de l'électrotechnique, où il était question de matériaux d'isolation polymères, également à base de carbone, ou d'électrodes en graphite pour les batteries. Le carbone est d'une part extrêmement polyvalent, il se prête donc à d'innombrables applications; mais d'autre part, il est aussi extrêmement important dans nos cycles de matériaux. Fermer le cycle du carbone est essentiel pour notre environnement et le climat.

**Comment un physicien des solides de**

**formation comme vous se retrouve-t-il dans la recherche sur les matériaux?**

Je venais de la recherche fondamentale et je voulais ouvrir une voie vers l'application pratique. À l'époque, j'étais fasciné par les techniques énergétiques – un sujet toujours d'actualité aujourd'hui. Le déclencheur a été le projet « DESERTEC », qui visait à produire de l'électricité solaire dans le désert et à l'amener en Europe. C'est ainsi que je suis arrivé au centre de recherche d'ABB, où j'ai travaillé sur les matériaux de transmission d'énergie.

**En quoi la recherche au centre de recherche ABB, où vous étiez également responsable d'un département de recherche, se distingue-t-elle de celle de l'Empa?**

Chez les chercheurs, il y a relativement peu de différences. L'enthousiasme, la passion pour la recherche, le contact avec les autres – tout cela est très similaire. Ici, à l'Empa, les thèmes sont toutefois plus larges et la recherche fondamentale est plus développée. Dans la recherche industrielle, en revanche, on se concentre nettement

plus sur la génération de produits qui suivra celle de sa propre entreprise.

**Qu'est-ce qui vous attire le plus dans votre nouveau rôle?**

Jusqu'à présent, j'ai évolué, si l'on peut dire, entre deux mondes – la recherche fondamentale académique et la recherche appliquée dans l'industrie. Ici, à l'Empa, je peux réunir les deux – j'ai pour ainsi dire « le meilleur des deux mondes ». Ce qui me fascine énormément dans le « modèle Empa », c'est d'une part l'exigence scienti-



**NOUVEAU À BORD**  
Lorenz Herrmann, nouveau directeur du département « Advanced Materials and Surfaces » de l'Empa depuis août 2022

## LORENZ HERRMANN

**CARRIÈRE:** Après des études de physique à l'Université de Regensburg et à l'École Normale Supérieure de Paris, Lorenz Herrmann a également passé sa thèse de doctorat dans ces deux établissements sur le thème des nanotubes de carbone et de leur application dans la nanoélectronique. En 2010, il a rejoint le centre de recherche ABB à Dättwil, où il a dirigé en dernier lieu le département « Energy Technologies ». Depuis août 2022, il dirige le département « Matériaux et surfaces modernes » de l'Empa.

fique élevée et d'autre part l'accent mis sur les applications pratiques.

**Quel est donc le rôle de la recherche fondamentale dans une institution de recherche qui se décrit elle-même comme « orientée vers l'application » et proche de l'industrie ?**

En fin de compte, il s'agit à l'Empa de créer une plus-value technologique pour l'industrie et la société : donc d'une part d'élaborer les bases pour des applications encore inconnues, mais d'autre part aussi de soutenir l'industrie suisse ici et maintenant. D'après mon expérience – en particulier dans l'industrie –, il faut être au top scientifiquement pour pouvoir vraiment aider les entreprises. Elles n'ont en effet pas besoin de nous pour des développements incrémentiels, elles peuvent même généralement faire mieux. Il ne faut donc pas simplement dupliquer le « développement » pour une entreprise, mais apporter des aspects vraiment nouveaux, c'est-à-dire ce que l'on pourrait qualifier d'innovation de rupture. Et c'est exactement ce que veulent les entreprises – quelque chose qu'elles n'ont pas ou ne peuvent pas faire elles-mêmes « en interne ».

On ne peut y parvenir que par une recherche de premier ordre. Notre travail se situe en quelque sorte en amont du processus de développement, mais il doit ensuite être transférable et applicable – c'est tout un art.

**Dans quels domaines d'application voyez-vous les plus grandes chances de faire la différence grâce à de nouveaux matériaux ?**

Dans le domaine de la numérisation, de nouvelles nanostructures de graphène pourraient servir de base à des dispositifs entièrement nouveaux, dont la fabrication industrielle serait envisagée dès le début. Il s'agit essentiellement de matériaux quantiques robustes pour des applications futures telles que les ordinateurs et les capteurs quantiques. Cela se distingue fondamentalement de nombreuses approches actuelles, dans lesquelles la fabrication et la robustesse des dispositifs sont plutôt à l'arrière-plan et où l'on étudie en premier lieu les effets de la physique quantique sur des systèmes modèles, souvent à des températures extrêmement basses. Dans le domaine des matériaux durables, nous devons mettre en œuvre l'idée

de cycle de manière plus conséquente ; je pense par exemple aux matériaux composites polymères, qui sont aujourd'hui difficilement recyclables. Et dans le domaine de l'énergie, je vois par exemple un grand potentiel dans la fabrication de cellules solaires d'un nouveau type et moins chères, par exemple grâce à des procédés d'impression simples. Je vois en outre des progrès dans le domaine du « power-to-gas » et dans la technique des batteries comme d'autres éléments essentiels.

**Quel est le premier point à l'ordre du jour ?**

J'ai été extrêmement bien accueillie ici, ce qui m'a fait très plaisir. Dans un premier temps, je me suis concentrée sur la création d'un réseau interne et sur la connaissance de tous les sujets. Maintenant, je me concentre sur la mise en réseau avec l'extérieur, avec nos parties prenantes dans l'industrie, la recherche et la politique. Et puis, j'aimerais bien sûr donner les premières impulsions stratégiques et contribuer à faire avancer d'un pas les thèmes susmentionnés. ■

Plus d'informations : [www.empa.ch/web/s200](http://www.empa.ch/web/s200)

Photo : Marion Nitsch / Empa

# CIRCUITS IMPRIMÉS MONTÉS SUR BOIS

Est-il possible de fabriquer des platines écologiquement durables pour l'industrie électronique à partir de fibres de cellulose ? Thomas Geiger, chercheur à l'Empa, s'est penché sur cette question. Entre-temps, il fait partie d'un projet multinational de l'UE appelé « Hypelignum ». Son objectif : une électronique biodégradable.

Texte : Rainer Klose

**D**epuis de nombreuses années, Thomas Geiger fait de la recherche dans le domaine des fibrilles de cellulose – des fibres fines qui peuvent être produites à partir de coupes de bois ou de déchets agricoles. Les fibres de cellulose recèlent un potentiel élevé pour une production durable et une décarbonisation de l'industrie : elles poussent dans la nature sans émettre de CO<sub>2</sub>, brûlent sans laisser de résidus et sont même compostables. Elles peuvent être utilisées à de nombreuses fins, par exemple comme renfort de fibres dans les produits techniques en caoutchouc tels que les membranes de pompes.

Mais est-il possible de fabriquer des circuits imprimés à partir de fibres de cellulose, ce qui permettrait de réduire l'empreinte écologique des ordinateurs ? Les circuits imprimés, également appelés platines ou PCB (« printed circuit boards »), sont justement tout sauf innocents sur le plan écologique : ils sont généralement composés de fibres de verre imprégnées de résine époxy. Un tel matériau composite n'est pas recyclable et ne peut jusqu'à présent être éliminé de manière appropriée que dans des installations de pyrolyse spéciales.

Photo : Gian Vèthli / Empa



**IVOIRE**  
À titre expérimental, Geiger a fabriqué des pièces de boîtier pour souris d'ordinateur en fibres de cellulose. Les surfaces brillent comme de l'ivoire noble ; les composants sont entièrement compostables.

**SOURIS D'ORDINATEUR AU LOOK IVOIRE**

Geiger avait déjà fabriqué des cartes informatiques en fibres de cellulose et étudié leur biodégradation. Mélangées à de l'eau, les fibres biologiques donnent une boue épaisse qui peut être déshydratée et compactée dans une presse spéciale. Avec un collègue, il a fabriqué 20 platines d'essai qui ont été soumises à divers tests mécaniques et finalement équipées de composants électroniques. L'essai a été concluant et la carte de cellulose a libéré les composants soudés après quelques semaines dans la terre naturelle.

Auparavant, Thomas Geiger avait déjà participé à un projet Innosuisse en collaboration avec la haute école spécialisée OST de Rapperswil, qui avait

donné naissance à des pièces de boîtier pour souris d'ordinateur. Les pièces de boîtier fabriquées ont un aspect soyeux et ressemblent, par leur couleur et leur toucher, à des pièces en ivoire. Mais aucun fabricant n'a voulu adopter cette méthode. La concurrence des prix dans le domaine de la petite électronique est encore trop forte pour cela – et les procédés traditionnels de moulage par injection de plastique ont un net avantage.

**PLATINES EN LAINE DE BOIS OU EN FIBRES DE CELLULOSE**

Maintenant, l'occasion se présente de construire sur les connaissances existantes : Claudia Som, spécialiste du développement durable à l'Empa, a été contactée pour collaborer au projet de recherche européen « Hypelignum ». ▶

**DÉCHETS BIOLOGIQUES**

Platine d'essai après compostage.

Celui-ci est dirigé par l'institut suédois de recherche sur les matériaux RISE et cherche de nouvelles voies pour une électronique produite de manière durable. Claudia Som a fait appel à son collègue Thomas Geiger.

Le projet a démarré en octobre 2022. Le consortium de chercheurs, avec la participation de l'Autriche, de la Slovaquie, de l'Espagne, des Pays-Bas, de la Suède et de la Suisse, prévoit de

fabriquer et d'évaluer des éco-circuits imprimés à partir de différents matériaux : Outre la cellulose nanofibrillée (CNF), la laine de bois et la cellulose de bois de peuplier sont étudiées comme base ; le placage de bois est également utilisé comme base pour les circuits imprimés. Deux départements de recherche de l'Empa collaborent au projet : d'une part, les spécialistes de la durabilité autour de Claudia Som du laboratoire « Technologie et société ». Claudia Som calculera l'empreinte écologique des éco-circuits à l'aide de bases de données sur les matériaux et comparera les différents concepts entre eux.

Thomas Geiger, du laboratoire « Cellulose & Wood Materials » de l'Empa, fabriquera les circuits imprimés à partir de matières premières renouvelables. L'électronique « verte » est depuis longtemps une priorité de recherche du laboratoire dirigé par Gustav Nyström ; l'équipe de Gustav Nyström a déjà développé divers composants électroniques imprimés à partir de matériaux biodégradables, comme des batteries et des écrans (voir encadré). Les exigences posées aux platines informatiques fabriquées industriellement ne sont toutefois pas triviales : les platines doivent non seule-

ment présenter une grande résistance mécanique, mais aussi ne pas gonfler dans des conditions humides ou se fissurer en cas de très faible humidité de l'air.

« Les fibres de cellulose peuvent être une très bonne alternative aux matériaux composites à base de fibres de verre », explique Thomas Geiger. « Nous déshydratons le matériau dans une presse spéciale avec une pression de 150 tonnes. Ensuite, les fibres de cellulose se collent d'elles-mêmes sans aucun autre adjuvant. Nous appelons cela la « cornification ». L'essentiel est de savoir à quelle pression, à quelle température et pendant combien de temps le processus de pressage doit avoir lieu pour produire des résultats optimaux.

**QUATRE DÉMONSTRATEURS PRÉVUS**

Le projet européen Hypelignum a des objectifs très ambitieux : il doit non seulement étudier les circuits imprimés fabriqués à partir de matières premières renouvelables et compostables, mais aussi développer des encres conductrices pour les connexions électriques entre les composants. Ces encres sont souvent fabriquées à base de nanoparticules d'argent. Les chercheurs sont à la recherche de matériaux de substitution moins chers et moins rares, ainsi que d'une méthode de production écologique pour ces nanoparticules.

Au terme du projet, quatre démonstrateurs devraient rendre visibles les résultats de recherche obtenus : un circuit imprimé écologiquement exemplaire, un grand élément de construction en bois équipé de capteurs et d'actionneurs, des meubles équipés de capteurs dans une chaîne de production automatisée et, enfin, un démonstrateur prouvant la recyclabilité de tous ces composants. ■

Plus d'informations : [www.empa.ch/web/s302](http://www.empa.ch/web/s302)

Photo: Empa

# TRANSFORMATION DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE

Crise climatique, pénurie d'énergie, sortie du nucléaire. Nous devons changer notre système énergétique. C'est une évidence. Que cela soit compliqué et coûteux aussi. Mais beaucoup de choses dépendent de nous, explique Peter Richner, expert en énergie et directeur adjoint de l'Empa. En effet, de nombreuses technologies sont déjà disponibles, mais elles sont jusqu'à présent (trop) peu utilisées.

Texte : Peter Richner

**INVENTAIRE DE L'EXPERT**

Peter Richner, directeur adjoint de l'Empa, devant le « NEST », où de nombreuses technologies de construction et d'énergie respectueuses de l'environnement sont réalisées et testées pour l'avenir.

**A**u cours des dernières décennies, la disponibilité permanente d'une énergie bon marché était une évidence qui n'a guère été sérieusement remise en question. Le changement climatique, d'une part, et l'abandon programmé de l'énergie nucléaire, d'autre part, ont certes suscité des discussions sur une transformation de notre système énergétique, mais les mesures nécessaires à cet effet n'ont été mises en œuvre que de manière hésitante jusqu'à présent. En 2022, cette situation a radicalement changé.

L'Europe en particulier – et donc la Suisse – a connu une pénurie massive d'énergie disponible. Suite à l'attaque russe contre l'Ukraine, les livraisons de gaz en provenance de Russie, qui couvraient jusqu'à présent plus de 30 % des besoins européens, se sont presque totalement tariées. Parallèlement, seuls 50 % environ des centrales nucléaires françaises sont actuellement raccordées au réseau, car les travaux de révision ont pris du retard pendant la pandémie et des problèmes de corrosion sont en outre apparus sur les conduites, ce qui a entraîné des investigations plus longues.

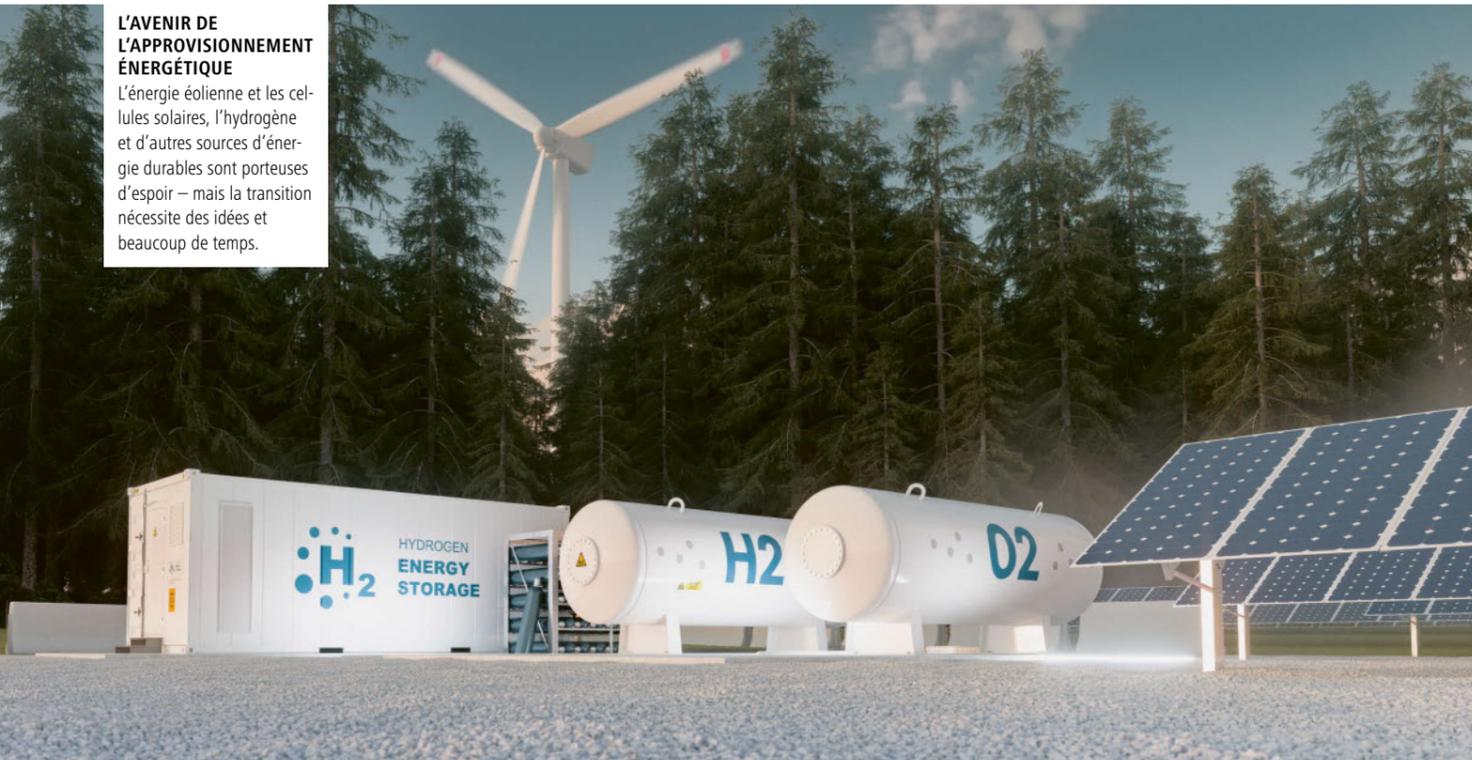
**DÉCUPLEMENT DU PRIX DE L'ÉLECTRICITÉ**

La raréfaction de l'offre énergétique qui en a résulté a entraîné une hausse massive des prix sur un large front, surtout pour le gaz et l'électricité. Pendant une courte période, les prix de l'électricité sur les marchés à terme ont atteint plus de 1000 € par MWh pour le premier trimestre 2023, soit une multiplication par dix en l'espace d'un an ! Afin de rétablir un certain équilibre entre l'offre et la demande, la priorité à court terme est donnée aux mesures d'efficacité et d'économie. À moyen et long terme, il s'agit de rendre l'énergie ►

Photo: Felix Wey / Empa

**L'AVENIR DE L'APPROVISIONNEMENT ÉNERGÉTIQUE**

L'énergie éolienne et les cellules solaires, l'hydrogène et d'autres sources d'énergie durables sont porteuses d'espoir – mais la transition nécessite des idées et beaucoup de temps.



disponible à partir d'autres sources, qui doivent en outre être renouvelables et présenter de faibles émissions de CO<sub>2</sub>. La recherche axée sur les matériaux et la technologie, telle qu'elle est menée à l'Empa, constitue la base sur laquelle des réponses pratiques à ces défis peuvent être développées.

Une transformation massive de notre système énergétique en l'espace de quelques mois ou années est impossible, même si beaucoup le souhaitent actuellement. La construction d'installations solaires alpines et les adaptations correspondantes du réseau électrique, le rehaussement des barrages des centrales à accumulation et le passage à l'hydrogène produit de manière renouvelable pour des applications industrielles à haute température sont liés à des investissements énormes et ne peuvent pas être réalisés du jour au lendemain. C'est pourquoi nous devrions actuellement nous concentrer en premier lieu sur les mesures d'efficacité et d'économie. Les

changements de comportement sont les plus rapides et les plus simples à mettre en œuvre – du moins en théorie – et sont souvent une simple question de volonté. L'exemple le plus évident est celui de la baisse de la température intérieure en hiver, qui permet d'économiser environ 6 à 7 % d'énergie par degré.

**ÉCONOMISER PRÈS D'UN QUART DE L'ÉNERGIE DE CHAUFFAGE**

Il est toutefois difficile de renoncer complètement au chauffage, mais il est tout à fait possible de réduire de manière significative les besoins en énergie sans perte notable de confort ou de performance. La numérisation, en particulier, offre de toutes nouvelles possibilités. Felix Bünning et Benjamin Huber du département « Urban Energy Systems » ont développé un algorithme de contrôle basé sur des données pour la régulation de la température ambiante et l'ont testé sous toutes les coutures dans le NEST. À l'aide d'un capteur de température, il est possible

de créer en deux semaines un modèle spécifique à la pièce qui, combiné aux prévisions météorologiques, est utilisé pour contrôler le chauffage et la climatisation. Cela se fait de manière entièrement automatique via l'apprentissage automatique (machine learning en anglais), sans qu'il soit nécessaire de connaître les caractéristiques physiques d'un bâtiment. Cette technologie peut ainsi être mise en œuvre facilement, rapidement et sans adaptations techniques dans de nombreux bâtiments. Par rapport à une commande de chauffage traditionnelle, la consommation d'énergie peut être réduite de 20 à 30 %, comme l'a montré un essai à grande échelle dans le bâtiment administratif de l'Empa à Dübendorf durant l'hiver 2021/2022. De plus, près de 90 % des collaborateurs ont déclaré n'avoir constaté aucune perte de confort. Entre-temps, les deux chercheurs ont fondé la start-up « Viboo » et sont pleins d'élan pour prouver

une fois de plus que « Empa – The Place where Innovation Starts » est bien plus qu'un simple slogan.

**QUAND C'EST RENTABLE, C'EST UTILISÉ**

De nombreuses autres solutions existent, dont le potentiel et la faisabilité ont été démontrés en laboratoire et dans les premiers projets de démonstration au cours des dernières années. Mais elles n'ont pas encore trouvé leur place sur le marché, tout simplement parce qu'elles n'étaient pas rentables aux prix de l'énergie et du CO<sub>2</sub>. L'unité NEST « Solare Fitness and Wellness », par exemple, présente un concept énergétique innovant qui permet de réduire d'un facteur trois la consommation d'énergie des saunas et des hammams ; elle permet en outre une alimentation presque exclusive en énergie solaire associée à des technologies de stockage. Ce n'est que maintenant, alors que les hôtels sont soudainement confrontés à des prix de l'électricité dix fois plus élevés, que l'intérêt pour cette technologie fait un bond en avant et qu'il y a de bonnes chances qu'une mise en pratique avec des partenaires de l'industrie devienne réaliste.

Il en va de même pour le déploiement à grande échelle des « compteurs intelligents ». Bien que la technologie soit suffisamment connue et que les appareils correspondants soient disponibles, la Suisse prend son temps pour la mettre en œuvre ; d'ici 2027, 80 % de tous les compteurs électriques devraient être remplacés par des « smart meters ». Ceux-ci sont une condition de base pour l'intégration de l'énergie renouvelable produite de manière décentralisée et pour l'équilibrage de la charge aux niveaux inférieurs du réseau. Cela permet des gains d'efficacité considérables au niveau des quartiers, comme l'ont montré les travaux de recherche de l'Empa et de ses parte-

**COMPTEUR ÉLECTRIQUE INTELLIGENT**

Un « compteur intelligent » permet une exploitation flexible des réseaux électriques – mais l'implantation de tels appareils ne progresse que lentement.

naires au cours des dernières années. Dans la situation actuelle où l'approvisionnement en électricité est incertain, l'installation généralisée de « compteurs intelligents » serait la condition préalable pour pouvoir gérer la demande de manière ciblée en cas de pénurie, en contrôlant de manière centralisée les appareils dont le fonctionnement n'est pas critique en termes de temps, comme le chauffage ou le chauffe-eau.

Il existe donc de nombreuses solutions qui n'attendent que d'être mises en œuvre et de contribuer ainsi de manière déterminante à un approvisionnement en énergie climatiquement neutre, fiable et abordable. Toutefois, des efforts supplémentaires sont nécessaires pour aller jusqu'au bout de la démarche. L'accent est mis sur des solutions permettant de stocker l'énergie sur différentes périodes et de transporter sur de longues distances. De nouveaux concepts de batteries basés sur des matériaux de base non critiques et des concepts de recyclage pour les batteries haute performance indispensables à la mobilité sont au centre de divers travaux de recherche à l'Empa.

**UNE QUESTION DE PRIX**

Une autosuffisance énergétique totale pour la Suisse n'est ni économiquement ni techniquement raisonnable. Outre le

développement des énergies renouvelables en Suisse, il faut donc trouver des moyens d'importer de l'énergie renouvelable, notamment en hiver. On peut douter que cela soit possible depuis des pays proches, car les systèmes énergétiques de nos pays voisins devraient se développer de manière très similaire. En revanche, le potentiel de production d'énergie renouvelable est énorme ailleurs dans le monde, par exemple dans les régions désertiques d'Afrique du Nord, du Proche-Orient ou en Patagonie et en Australie. Toutefois, le transport sur de si grandes distances sous forme d'électricité n'est pas réalisable. L'électricité produite par le vent ou le soleil doit d'abord être transformée en vecteurs d'énergie chimique tels que l'hydrogène, l'ammoniac ou les hydrocarbures synthétiques. Ainsi, l'énergie peut être à la fois stockée et transportée. De nouveaux catalyseurs et procédés catalytiques sont essentiels pour rendre les processus de transformation chimique aussi efficaces que possible et pour produire des vecteurs d'énergie qui offrent un maximum d'avantages, par exemple pour remplacer le kérosène (fossile). Pour toutes ces approches innovantes, le bilan des gaz à effet de serre est essentiel. Celui-ci devrait être « net zéro » ou – idéalement – même négatif, c'est-à-dire réduire la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Grâce à ses connaissances en sciences des matériaux et en développement technologique, l'Empa continuera à développer de nouvelles solutions qui permettront de placer notre système énergétique sur une base durable. En tant que société, nous devons toutefois faire preuve de la volonté et du sérieux nécessaires pour réussir ensemble sur cette voie exigeante. ■

Plus d'informations : [www.empa.ch/de/web/empa/engineering-sciences](http://www.empa.ch/de/web/empa/engineering-sciences)

# ENSEMBLE VERS DES ÉMISSIONS NÉGATIVES

L'Association pour la décarbonisation de l'industrie (ApDI) s'est fixé pour objectif de développer des approches globales et rapidement réalisables pour la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'environnement industriel. L'accent est mis sur les applications industrielles à haute température. Des idées d'une approche globale avec des émissions de CO<sub>2</sub> globalement négatives sont également poursuivies. Christian Bach, chercheur à l'Empa, représente l'Empa en tant que membre fondateur de l'association. Avec Andreas Bittig, le chef de projet de l'ApDI, il donne un aperçu des idées visionnaires et de leur mise en œuvre concrète.

Interview : Stephan Kälin

## Par quelles mesures l'ApDI veut-elle parvenir à une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans l'environnement industriel ?

Andreas Bittig : Alors que de nombreux projets et activités sont en cours pour le chauffage et la mobilité, la décarbonisation des processus industriels à haute température, qui reposent souvent sur le gaz naturel, occupe encore une niche. Avec la pyrolyse du méthane, l'ApDI a l'intention d'utiliser et de développer une nouvelle technologie intéressante pour de telles applications. Ce qui est passionnant, c'est que cette technologie permet de décarboniser le gaz naturel fossile, ce qui permet une réduction rapide des émissions de CO<sub>2</sub>, et qu'elle entraîne même des émissions négatives si l'on utilise du méthane renouvelable.

## Comment le méthane synthétique peut-il permettre des émissions négatives de CO<sub>2</sub> ?

Christian Bach : Le méthane synthétique est produit à partir d'hydrogène renouvelable et de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et peut être transporté à bas prix dans le monde entier. Afin d'empêcher la formation de CO<sub>2</sub> lors



**CHRISTIAN BACH**  
Chef du laboratoire « Automotive Powertrain Technologies » Empa

de l'utilisation du méthane, le carbone est préalablement séparé – sous forme solide ! – de la molécule de CH<sub>4</sub> à l'aide de ce que l'on appelle la pyrolyse. Celui-ci peut alors être utilisé comme nouvelle matière première dans la construction et l'agriculture. Ainsi, nous n'utilisons que la partie hydrogène du méthane synthétique à des fins énergétiques. Au total, du CO<sub>2</sub> est donc prélevé dans l'atmosphère pour la production de méthane synthétique, qui est ensuite stocké sous forme de carbone solide dans la construction ou l'agriculture – et n'a donc plus d'impact sur le climat.

## La production de méthane synthétique, le transport et la pyrolyse entraînent des pertes d'efficacité. Comment les gérer ?

Christian Bach : Lors de la production de méthane synthétique, près de la moitié de l'énergie est perdue, et encore un tiers à cause de la séparation du carbone. Ce qui semble être une catastrophe du point de vue de l'efficacité fait quand même sens, notamment lorsque la production de méthane a lieu dans des régions où l'énergie est disponible en abondance. C'est le cas dans la Sun Belt qui entoure le globe. Le rayonnement solaire y est



**ANDREAS BITTIG**  
Chef de projet de l'Association pour la décarbonisation de l'industrie Tech Cluster Zug AG

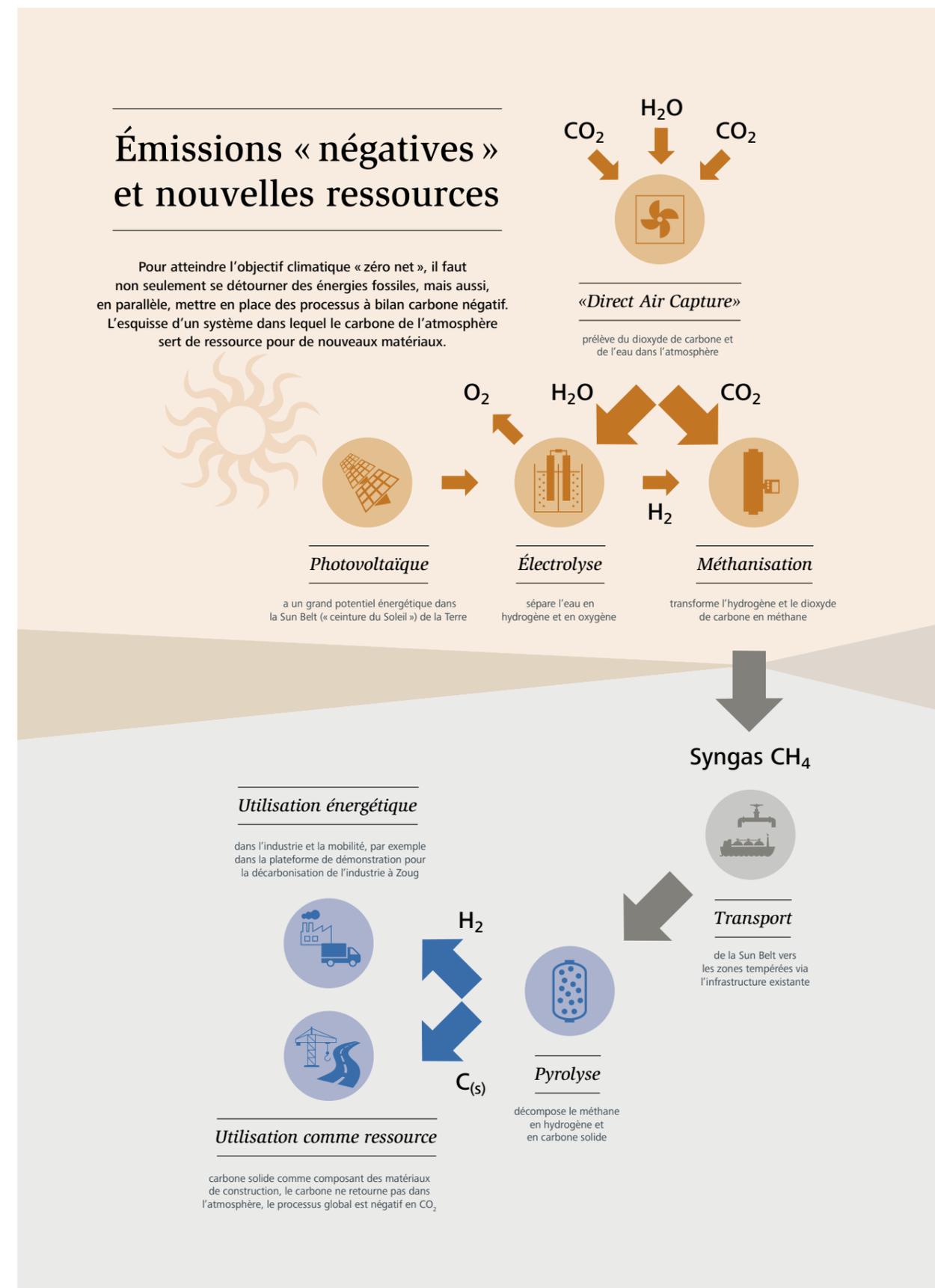
deux fois plus élevé que chez nous, et il y a d'immenses surfaces inhabitables et inutilisées. Pour le transport, il est en outre possible d'utiliser l'infrastructure déjà existante. Le doublement du rayonnement solaire dans la ceinture solaire de la Terre signifie un rendement nettement plus élevé par mètre carré de cellules photovoltaïques que chez nous. Cela relativise les pertes énergétiques élevées de cette approche.

## Que faut-il pour que ce système mondial devienne réel ?

Andreas Bittig : La pyrolyse du méthane est considérée comme l'un des procédés de production d'hydrogène les plus rentables. Cette technologie est sur le point d'être mise en œuvre à l'échelle industrielle. Pour que le système global devienne réel, il faut des installations de démonstration, comme celle prévue à Zoug, afin d'acquiescer des données et du savoir-faire. Tech Cluster Zug AG fournit l'écosystème pour la démonstration de l'approche. Nous voyons tout à fait le démonstrateur de Zoug comme le début d'une industrialisation de ce système, car nous sommes très bien placés grâce à une étroite collaboration entre l'industrie et la recherche.

Photos : Empa

Graphique : Empa





**PORTEUR D'ESPOIR**  
Les fours d'émaillage de V-ZUG SA devraient à l'avenir fonctionner sans gaz naturel fossile.

### UNE INSTALLATION DE DÉMONSTRATION AU TECH CLUSTER DE ZOUG

L'Association pour la décarbonisation de l'industrie (ApDI) a été fondée le 20 juin 2022. Parmi les membres de l'association figurent des représentants de l'industrie, de l'approvisionnement en énergie, du secteur financier et de la recherche. L'une des activités principales de l'association consiste à mettre en place dans les années à venir une installation de démonstration dans le Tech Cluster de Zoug, dans laquelle le méthane ( $\text{CH}_4$ ) est décomposé par pyrolyse en ses composants hydrogène ( $\text{H}_2$ ) et carbone solide ( $\text{C}_s$ ). L'hydrogène produit par pyrolyse doit remplacer le gaz naturel fossile dans les fours d'émaillage de V-ZUG SA. Pour le carbone solide ou en poudre, des applications sont développées et validées dans le domaine de la construction et de l'agriculture – par exemple en tant qu'additif dans les matériaux de construction ou pour enrichir l'humus. La particularité de cette nouvelle approche: si l'on utilise du méthane synthétique

à la place du gaz naturel fossile pour la pyrolyse, les émissions de  $\text{CO}_2$  sont globalement négatives (voir interview). Mais comme l'industrie suisse a à elle seule besoin d'environ 20 TWh d'énergie par an, le potentiel de production nationale d'hydrogène renouvelable ou de méthane synthétique n'est pas suffisant pour couvrir ces besoins. La situation est différente dans la Sun Belt de la Terre: des importations de sources d'énergie synthétiques en provenance de régions ensoleillées pourraient couvrir les besoins en énergie renouvelable et fournir de nouvelles ressources pour la construction et l'agriculture – et ce avec des émissions de  $\text{CO}_2$  négatives (voir graphique à la page 17). Dans le cadre d'ApDI, l'Empa contribue à la fois par son expertise orientée vers les applications dans le domaine des sources d'énergie synthétiques (par exemple dans le démonstrateur de mobilité «move») et par ses connaissances des matériaux dans les domaines du béton et de l'asphalte. Il s'agit ici de l'utilisation du carbone obtenu à partir du méthane synthétique.

Plus d'informations:  
[www.empa.ch/web/s604/decarb-industry](http://www.empa.ch/web/s604/decarb-industry)

Photo: V-ZUG AG

# PRODUCTION DE MÉTHANE SYNTHÉTIQUE DE MANIÈRE PLUS FLEXIBLE

Les sources d'énergie synthétiques respectent le cycle du  $\text{CO}_2$  et peuvent rendre l'énergie renouvelable transportable et stockable à long terme. Le méthane produit artificiellement est l'un d'entre eux. Le problème: sa production est liée à des pertes d'énergie relativement élevées; de plus, les procédés actuels nécessitent une purification du méthane. Pour y remédier, les chercheurs de l'Empa ont développé un nouveau concept de réacteur optimisé pour la méthanisation.

Texte: Annina Schneider

Le tournant énergétique exige des sources d'énergie respectueuses du climat, c'est-à-dire dont la production et l'utilisation génèrent le moins d'émissions de  $\text{CO}_2$  possible – dans l'idéal, pas du tout. Les sources d'énergie synthétiques, c'est-à-dire celles qui sont obtenues par des processus de transformation à partir d'énergie renouvelable, s'imposent en tant que solution entre autres pour cela. En effet, l'utilisation de telles sources d'énergie ne produit que la quantité de  $\text{CO}_2$  qui a été extraite de l'atmosphère pour leur production.

Le méthane produit artificiellement entre dans cette catégorie. «Le gaz synthétique offre un énorme potentiel lorsqu'il est produit à partir de  $\text{CO}_2$  atmosphérique et d'hydrogène produit de manière renouvelable», explique Christian Bach, directeur du département Systèmes de propulsion automobile de l'Empa. «Mais pour produire de l'hydrogène, il faut non seulement de l'électricité renou-

vable, mais aussi beaucoup d'eau. Dans notre démonstrateur de mobilité «move», nous voulons donc extraire de l'atmosphère non seulement le  $\text{CO}_2$ , mais aussi l'eau nécessaire à la production d'hydrogène à l'aide d'un collecteur de  $\text{CO}_2$  de la spin-off «Climeworks» de l'ETH Zurich, directement sur place.» De tels concepts pourraient alors être mis en œuvre à l'avenir dans des régions désertiques dépourvues de réserves d'eau liquide.

La production de méthane synthétique à partir d'hydrogène et de  $\text{CO}_2$  – ce que l'on appelle la méthanisation – a toutefois ses inconvénients. En effet, le gaz produit par un procédé catalytique contient jusqu'à présent également de l'hydrogène, ce qui rend impossible une injection directe dans le réseau de gaz. Les chercheurs de l'Empa Florian Kiefer, Marin Nikolic, Andreas Borgschulte et Panayotis Dimopoulos Eggenschwiler ont donc développé un nouveau concept de réacteur dans lequel la formation d'hydrogène est empêchée du côté

du produit. Les chercheurs de l'Empa obtiennent ainsi une conduite plus simple du processus et une meilleure aptitude à l'exploitation dynamique, c'est-à-dire par exemple au couplage avec des énergies renouvelables disponibles de manière intermittente. Le projet est soutenu par le canton de Zurich, Avenergy Suisse, Migros, Lidl Suisse, Armasuisse, Swisspower ainsi que par le Conseil des ETH.

### INJECTION DIRECTE DANS LE RÉSEAU DE GAZ GRÂCE À L'ADSORPTION D'EAU

Le méthane sans hydrogène est produit dans le «move» par la méthanisation dite renforcée par sorption. L'idée est la suivante: l'eau produite par la réaction est adsorbée en permanence sur un support catalytique poreux pendant le processus de méthanisation. Cette élimination continue de l'eau a pour conséquence que le produit obtenu est uniquement du méthane – sous forme pure. Il n'est donc pas nécessaire de purifier le mélange de produits (comme ►



### ÉQUIPE DE PROJET

Le nouveau concept de réacteur fait partie d'un concept intégratif pour la méthanisation dans le « move » : l'équipe de projet de gauche à droite : Brigitte Buchmann (Empa), Beat Lehmann (Direction des travaux publics du canton de Zurich), Karin Schröter (Empa), Tobias Geisser (Fédération des coopératives Migros), Adrian Gonzalez (Empa), Daniel Stolz (Lidl Suisse), Hanspeter Kaufmann (Armasuisse), Florian Kiefer (Empa), Christian Bach (Empa), Mauro Montella (Swisspower); pas sur la photo : Roland Bilang (Avenergy Suisse), Fabian Nager (Glattwerk AG)



### HIGHTECH

L'accent a été mis sur l'« upscaling » du procédé, c'est-à-dire sur un concept permettant de mettre en œuvre ce procédé pour les grandes installations : Florian Kiefer, responsable du projet de méthanisation renforcée par sorption, à côté de l'installation expérimentale.

office de support de catalyseur poreux et qui adsorbent en même temps l'eau produite pendant la réaction de méthanisation. L'accent a été mis sur l'« upscaling » du procédé, c'est-à-dire sur un concept permettant de mettre en œuvre ce procédé pour les grandes installations. Pour ce faire, l'Empa a collaboré avec différents partenaires industriels. Le facteur décisif pour la conception du réacteur et la planification du processus est avant tout le temps de régénération, c'est-à-dire le temps nécessaire pour le séchage du réacteur. Pour garantir une production continue de méthane, il faut donc qu'au moins deux réacteurs fonctionnent en alternance. Pour le séchage des réacteurs, il est en outre essentiel de disposer d'une gestion thermique appropriée, soit par l'évacuation de la chaleur du réacteur, soit par le stockage interne de la chaleur dans le lit catalytique. Dans ce domaine, l'équipe de Florian Kiefer a déposé un brevet.

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

c'est le cas jusqu'à présent). À la fin de la réaction, le support de catalyseur est à nouveau séché par réduction de la pression – et est prêt pour le prochain cycle de réaction. « Ce processus est plus flexible et plus stable que les procédés précédents, mais il a aussi un certain potentiel d'économie d'énergie, car nous fonctionnons à une pression de réacteur plus basse et pouvons renoncer à la séparation et au recyclage de l'hydrogène. Une évaluation précise de l'efficacité

énergétique ne sera toutefois possible que lorsque le démonstrateur sera terminé », explique Florian Kiefer, responsable du projet de méthanisation renforcée par sorption au sein de « move ».

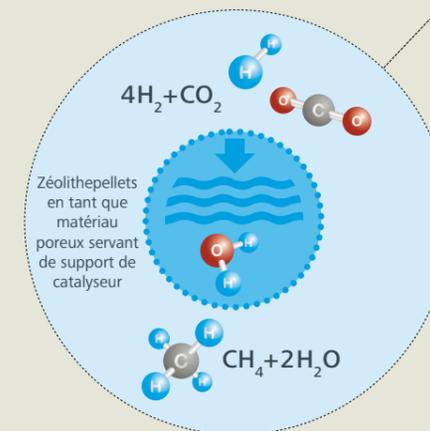
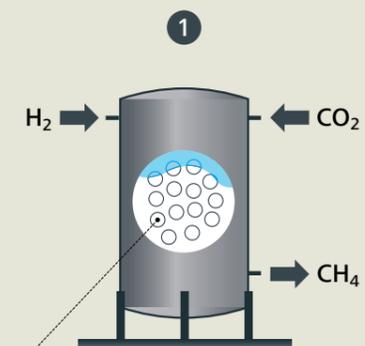
### DU LABORATOIRE À L'INSTALLATION INDUSTRIELLE

Florian Kiefer et son équipe ont mené pendant près de trois ans des recherches sur un nouveau concept de réacteur avec des pellets de zéolithe qui font

## Méthanisation renforcée par sorption

### Remplissage

Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et l'hydrogène (H<sub>2</sub>) s'écoulent dans la cuve du réacteur. Celui-ci est rempli de pellets de zéolithe qui contiennent le catalyseur.

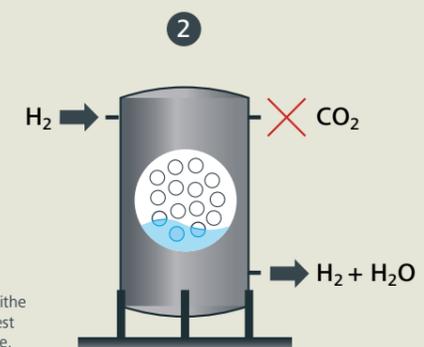


### Réaction chimique

Dans le réacteur à lit fixe, l'hydrogène et le dioxyde de carbone sont transformés catalytiquement en méthane (CH<sub>4</sub>) et en eau (H<sub>2</sub>O). L'eau adhère aux pellets de zéolithe et reste dans un premier temps dans le réacteur. Seul du méthane pur s'échappe du réacteur.

### Séchage et régénération

Pour éliminer à nouveau l'eau absorbée par les pellets de zéolithe du réacteur à lit fixe, l'alimentation en dioxyde de carbone est arrêtée et le réacteur est rincé à l'hydrogène pour le séchage. Après le séchage, le processus peut recommencer.



# ÉCONOMISER L'ÉNERGIE DE CHAUFFAGE

Avec la hausse des prix de l'énergie, les coûts de chauffage augmenteront inévitablement l'hiver prochain. Pour les atténuer, des solutions permettant d'exploiter plus efficacement les bâtiments sont nécessaires. Le spin-off de l'Empa « Viboo » a développé un algorithme qui permet d'exploiter facilement des bâtiments anciens avec environ un quart d'énergie en moins. Le confort des utilisateurs reste inchangé ou s'améliore même.

Texte : Loris Pandiani

Un thermostat qui règle à l'avance le climat intérieur et améliore ainsi l'efficacité énergétique et le confort – cette idée est venue aux chercheurs Felix Bünning et Benjamin Huber au cours de leur travail au « Urban Energy Systems Lab » de l'Empa. Ils ont développé un algorithme de régulation qui, sur la base des données météorologiques et des données du bâtiment, peut calculer plusieurs heures à l'avance la dépense énergétique idéale d'un bâtiment. Les premières expériences menées au NEST, le bâtiment de recherche et d'innovation de l'Empa et de l'Eawag, ont montré que cette approche permettait d'économiser environ un quart de l'énergie. En mars 2022, les deux chercheurs et Matthias Sulzer, Senior Researcher à l'Empa, ont officiellement fondé la spin-off « Viboo » afin de lancer la solution sur le marché. Pour faciliter l'entrée sur le marché, l'algorithme doit toutefois encore résister à quelques tests pratiques supplémentaires.

## PILOTE DANS UN BÂTIMENT ADMINISTRATIF DE L'EMPA

« Nous visons à intégrer notre solution dans des bâtiments anciens où il n'existe pas de système de gestion des

bâtiments », explique Benjamin Huber. C'est pourquoi les deux jeunes entrepreneurs ont décidé de mettre leur algorithme encore plus à l'épreuve après les tests réussis dans le NEST moderne. Pour cela, ils avaient besoin d'un objet expérimental plus ancien approprié et d'une entreprise partenaire qui propose des thermostats intelligents dans son portefeuille. La direction de l'Empa a mis le premier à disposition : le bâtiment administratif construit dans les années 1960 et rénové en 2009, qui constituait donc un objet d'expérimentation idéal. L'entreprise partenaire a égale-

ment été trouvée. « Avec Danfoss, nous avons pu nous associer à un fabricant international pour le projet, dont les thermostats de radiateur intelligents possédaient déjà une interface appropriée. Celle-ci permet de transmettre au matériel les valeurs de réglage calculées par l'algorithme Viboo à partir du cloud », explique Benjamin Huber.



Photos : Empa, AdobeStock

## LA CHALEUR INTELLIGENTE

Les coûts de chauffage augmentent et il devient de plus en plus important de réduire l'énergie de chauffage nécessaire. Le spin-off de l'Empa « Viboo » a développé une solution qui permet de réaliser cette économie.

Dans un premier temps, l'équipe a remplacé les 150 thermostats analogiques existants dans le bâtiment de l'Empa par la solution intelligente de Danfoss, le « Danfoss Ally ». Ensuite, le matériel a été connecté au cloud de Danfoss. Afin d'obtenir les valeurs de réglage pour les thermostats intelligents, le Danfoss Cloud a communiqué à son tour avec le Viboo Cloud, sur lequel fonctionnait l'algorithme d'autoapprentissage. La configuration était ainsi prête pour l'essai sur le terrain.

Les nouveaux thermostats ont régulé le climat intérieur de Noël 2021 à fin mars 2022. Afin de pouvoir établir une comparaison, les modes de fonctionnement ont été régulièrement changés, c'est-à-dire du régulateur Viboo au mode standard de Danfoss Ally et inversement. À la fin de l'essai, les utilisateurs ont en outre été interrogés afin de déterminer comment le confort de la pièce était perçu et si ces nouvelles solutions étaient en principe acceptées.

## WIN-WIN: MOINS D'ÉNERGIE, MEILLEUR CONFORT

Les résultats de ce projet pilote ont également été très positifs. Au total, la consommation d'énergie de chauffage a été réduite d'environ 23 % par rapport à la période de chauffage de l'année précédente, tout en maintenant, voire en améliorant le confort des utilisateurs. En comparaison, Danfoss Ally n'a permis d'économiser que 12 %. « Dans nos sondages, très peu d'utilisateurs se sont montrés sceptiques vis-à-vis de la nouvelle technologie. Cela nous rend confiants quant à l'adoption de notre solution par le marché », déclare Felix Bünning.

Et l'entreprise partenaire se montre également impressionnée par les premiers résultats. « Nous voyons un grand potentiel dans la collaboration avec Viboo et pensons que de telles solutions représentent l'avenir – non seulement pour la régulation d'un seul bâtiment, mais aussi pour des systèmes énergétiques entiers », estime Andrea Cannarozzo, directeur général de Danfoss AG. Pensé de manière visionnaire, l'algorithme Viboo pourrait en effet optimiser à l'avenir différentes intégrations smart home comme les pompes à chaleur ou les installations solaires, mais aussi contribuer à exploiter de manière plus durable le réseau électrique ou les réseaux de chaleur.

## PROCHAINS PROJETS EN COURS

Mais revenons à l'avenir proche. Afin de préparer davantage le terrain pour l'entrée sur le marché, Viboo mènera d'autres projets pilotes pendant la prochaine période de chauffage – en collaboration avec Danfoss, mais aussi avec d'autres fabricants comme ABB et Schneider Electric. L'objectif est de collecter des données supplémentaires et de mettre la solution à l'épreuve dans d'autres environnements. Parallèlement, les pouvoirs publics sont déjà intéressés



## PRATIQUE

Benjamin Huber montre que le passage des sondes thermostatiques traditionnelles des radiateurs aux thermostats intelligents « Danfoss Ally » est simple et ne prend que quelques secondes.

## UN TRAVAIL EXCELLENT

Différents jurys et comités spécialisés ont également été convaincus du potentiel de la solution Viboo. Les jeunes entrepreneurs ont donc reçu en 2022 diverses distinctions et contributions de soutien pour continuer à faire avancer leur solution. Ainsi, Viboo a remporté la finale Venture Kick, a reçu un « Inno-Booster » de la fondation Gebert Rüt et a été désigné vainqueur de la GreenTech Start-Up Battle de digitalswitzerland. Mais la spin-off a également été honorée en interne cette année, puisqu'elle a reçu le « Empa Innovation Award ».

par l'intégration de l'algorithme dans des bâtiments existants, par exemple l'Office fédéral des constructions et de la logistique (OFCL) et la commune de Männedorf. Mais le travail à l'Empa n'est pas encore terminé pour Viboo et Danfoss. Les entreprises équiperont à l'avenir d'autres bâtiments du campus avec leur solution intelligente. ■

Plus d'informations : <https://viboo.io/>

# UN MARATHON VERS LA MISE SUR LE MARCHÉ

Développer un produit à partir d'une technologie innovante prend des années, parfois des décennies. Gabor Kovacs a vécu ce processus avec sa spin-off CSystems AG et des polymères électroactifs à l'Empa. De l'idée à la reprise par une grande entreprise, en passant par des bricolages créatifs, des échecs, des progrès et le bon compagnon de route : expériences et bilan.

Texte : Norbert Raabe



## CHERCHEURS ET DÉVELOPPEURS

Gabor Kovacs (à gauche) et Lukas Düring dans leur laboratoire avec un actionneur de pile.

Photo : Urs Bünler / Empa

Les porteurs d'espoir sont insignifiants, minuscules, gris foncé : des plaquettes de silicone carrées ultrafines de 15 millimètres sur 15, posées sur une table dans la salle 024 de la Metallhalle, Empa, Dübendorf. Dans un carton à côté se trouve le produit fini, composé de centaines d'entre elles, empilées en « tourelles », avec des couches d'électrodes filigranes entre elles. Si l'on met de tels composants sous tension électrique, les disques de silicone se compriment ; l'actionneur « rétrécit » un peu – et peut aussi, vice versa, enregistrer électriquement lorsqu'il est comprimé.

## QUEL EST L'INTÉRÊT ?

De tels « actionneurs empilés » sont plus simples et moins chers que la technologie traditionnelle et pourraient être utilisés de diverses manières : pour l'entraînement de pompes, comme interrupteurs dans les volants, boutons de commande avec retour haptique et bien d'autres choses encore. Un potentiel que Gabor Kovacs a porté à maturité, d'abord à l'Empa, puis dans la spin-off CSystems de l'Empa, fondée en août 2012 – des premiers bricolages avec différents matériaux à l'annonce du succès il y a quatre mois : reprise par le groupe industriel Dätwyler, avec lequel l'équipe coopère déjà depuis 2018. Sur son site de Schattdorf, dans le canton d'Uri, une installation de production automatisée est en cours de construction et devrait être mise en service prochainement. En bref : le pas vers le marché est imminent.

## UN NOUVEAU DÉPART AVEC UNE GRANDE CURIOSITÉ

Cela a pris un certain temps : environ 22 ans depuis que l'ingénieur en construction mécanique Gabor Kovacs, alors responsable de la technologie des remontées mécaniques à l'Empa, s'est laissé inspirer par l'idée des polymères électroactifs (EAP) – par

exemple par des articles dans le magazine scientifique « Science ». Et comme l'Empa s'est transformé au tournant du millénaire d'un laboratoire d'essai traditionnel en un institut de recherche moderne, il a décidé de prendre un nouveau départ dans ce domaine.

Rétrospectivement, les débuts semblent aventureux : des premiers composants dont les couches ont été créées à partir de ruban adhésif acrylique disponible dans le commerce jusqu'aux muscles artificiels EAP pour un robot qui a participé à un concours de « bras de fer » au « Jet Propulsion Laboratory » de l'agence spatiale américaine NASA à San Diego. Résultat : deuxième place. « C'était notre premier moment fort ! », dit Gabor Kovacs en riant.

Le deuxième fut le dirigeable « Blimp », développé par une équipe de spécialistes de l'Empa autour de Silvain Michel : un engin flottant rempli de gaz, dont les gouvernes de profondeur et de direction étaient actionnées par des polymères électroactifs. Il en est finalement résulté un démonstrateur de 8 mètres de long qui, grâce aux « cordons musculaires » de l'EAP sur les côtés et la queue, se déplaçait dans l'air en courbant le fuselage et en donnant un coup de nageoire – comme un poisson dans l'eau.

## TENTATIVES RATÉES, PROGRÈS, RAFFINEMENTS

Des expériences instructives qui ont également profité à la technologie elle-même. La bande adhésive acrylique des débuts a été remplacée au bout de quelques années par du silicone qui, après réticulation par vulcanisation, présente de nombreux avantages : facile à travailler, stable pendant d'innombrables cycles de mouvement et durable même à des températures élevées et basses. « C'est essentiel, notamment pour l'utilisation dans la construction

## SPIN-OFF : OBSTÉTRIQUE DE L'EMPA

La création d'une entreprise spin-off est un outil éprouvé pour promouvoir des technologies prometteuses. Dans le cas présent, l'actuelle CSystems AG a été fondée en août 2012 en tant que « Compliant Transducer Systems GmbH » et spin-off de l'Empa par Gabor Kovacs et Lukas Düring. Outre le savoir-faire déjà acquis et des droits de licence avantageux pour deux brevets, la spin-off a obtenu l'accès à l'infrastructure de l'Empa et à l'installation de laboratoire de fabrication existante, ainsi qu'un soutien supplémentaire.

automobile », explique le développeur Gabor Kovacs, « peu de matériaux élastiques ont de telles propriétés ».

Après le silicone courant, on utilise désormais une recette spéciale – l'une des nombreuses étapes de développement auxquelles a également participé l'ingénieur mécanicien Lukas Düring, 40 ans, qui est venu à l'Empa en 2008 pour un travail de diplôme et qui est resté comme chercheur : une aide talentueuse avec un apport précieux qui est finalement devenu un compagnon. « Il a beaucoup bricolé et testé – avec un grand succès », dit Gabor Kovacs, « c'est un vrai « Daniel Düsentrleb » ! »

Les développeurs n'ont toutefois pas été épargnés par les revers. Des matériaux qui n'étaient soudainement plus disponibles, des pièces de rechange manquantes ou des défauts sur la machine d'empilage humide de haute précision pour les couches de silicone finies : l'installation brevetée de l'Empa, qui sert également de modèle pour la production future chez le fabricant Dätwyler.

Mais les chances de voir apparaître des produits commercialisables sont désormais bonnes, estime Gabor Kovacs : ▶

la technologie est facile à utiliser, robuste et – contrairement aux moteurs électriques comparables – silencieuse. Mais des garanties de succès? Non, il n’y en a pas. Même lors du passage à la production de masse, des détails restent à régler, par exemple le matériau des électrodes entre les disques de silicone. Des idées et du cœur à l’ouvrage sont donc toujours nécessaires – à l’avenir, davantage de la part de Lukas Düring, déjà employé chez Dätwyler, que de Gabor Kovacs, aujourd’hui à la retraite.

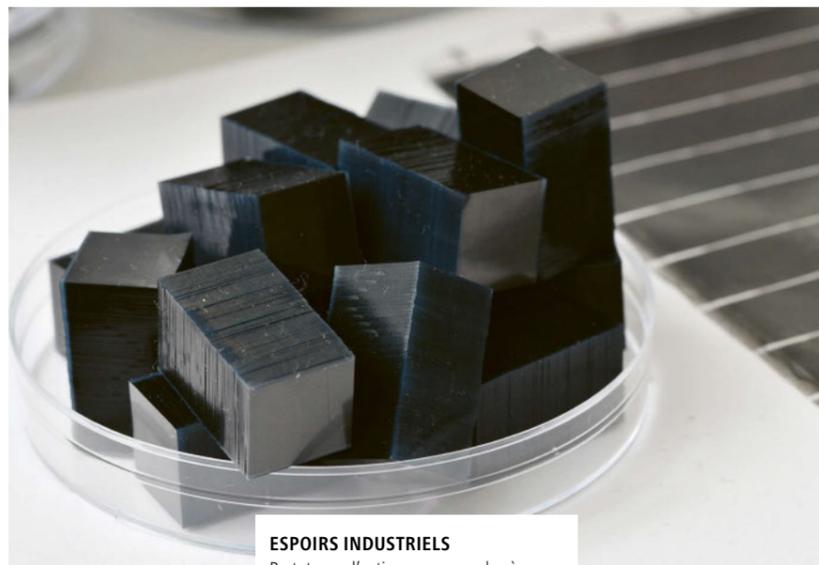
#### LES VERTUS DU DÉVELOPPEUR? BIEN SÛR!

Que conseille le senior aux jeunes chercheurs qui souhaitent suivre une voie similaire? Une attitude optimiste? «Oooh oui!», répond Gabor Kovacs en hochant la tête. De la persévérance? «Oooh oui!», dit-il, «il faut cette persévérance inflexible». Et en plus des idées de solutions, il faut aussi avoir le sens des réalités nécessaire pour évaluer lesquelles sont réalisables au regard du marché.

Un marathon donc, et en même temps un combat de boxe entre la vision et la réalité, qui dure plusieurs tours – et qui a déjà été perdu même par des spécialistes compétents. En Allemagne par exemple: «Là-bas, de nombreuses institutions se sont penchées pendant des années sur la manière de fabriquer de tels actionneurs empilés», raconte Gabor Kovacs, «sans succès jusqu’à présent».

Qu’est-ce qui a fait la différence? Le fait que cela se soit mieux terminé chez CSystems est aussi dû à une circonstance simple, mais que Gabor Kovacs trouve décisive. Les derniers quelques pourcents sur le chemin du succès, «c’est le fait de prendre personnellement le risque», dit-il, «que cela doit simplement fonctionner.» ■

Plus d’informations: <https://ct-systems.ch/>



**ESPOIRS INDUSTRIELS**  
Prototypes d'actionneurs en polymères électroactifs empilés.



**CAS D'APPLICATION**  
Un actionneur d'empilage dans l'entraînement d'un dispositif de pompage.

# Aide au démarrage pour les talents de demain.



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

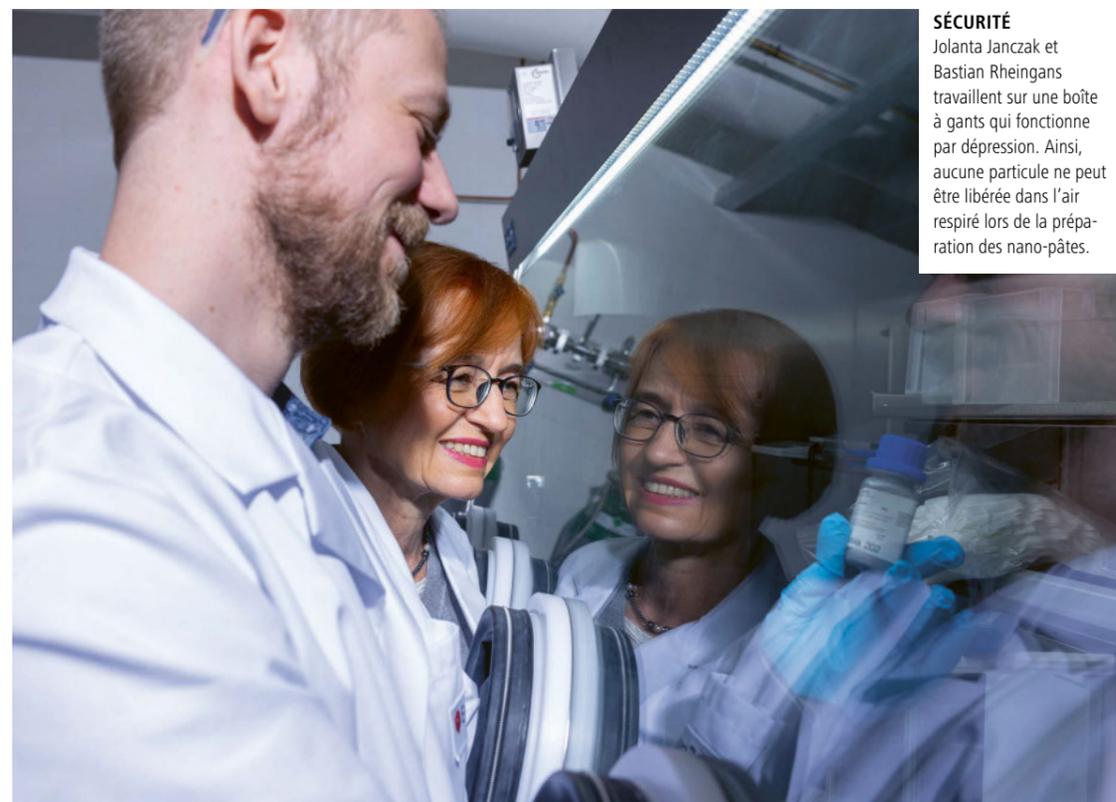
 **Empa**  
Zukunftsfonds

Photos: Dätwyler Holding Inc., Urs Bünler / Empa

# LA MINIATURISATION DE SOUDURE

Les composants électroniques deviennent de plus en plus petits, complexes et performants – ce qui exige de nouvelles solutions pour l'assemblage des pièces. Une équipe de l'Empa fait des recherches sur des matériaux d'assemblage nanostructurés pour la prochaine génération de microélectronique et d'autres applications exigeantes.

Texte: Rainer Klose



## SÉCURITÉ

Jolanta Janczak et Bastian Rheingans travaillent sur une boîte à gants qui fonctionne par dépression. Ainsi, aucune particule ne peut être libérée dans l'air respiré lors de la préparation des nano-pâtes.

**G**ordon Moore avait raison. En avril 1965, l'ingénieur américain et futur cofondateur d'Intel prédisait que le nombre de transistors sur une puce doublerait environ tous les deux ans. Jusqu'à aujourd'hui, cette évolution se poursuit presque

sans frein – notamment parce que les fabricants de puces du monde entier utilisent la loi de Moore comme base de leur planification stratégique. Ainsi, la prophétie se réalise d'elle-même.

Mais le doublement du nombre de circuits tous les deux ou trois ans frôle par-

fois les limites de ce qui est techniquement possible. Cela vaut également pour la technologie d'assemblage, qui doit suivre le rythme des exigences accrues. En effet, les composants électroniques de plus en plus petits et performants doivent toujours être intégrés dans des systèmes plus grands sans que les assem-

blages avec les dissipateurs thermiques ou les platines ne se désagrègent lors de changements de température ou de secousses, ou ne surchauffent pendant le fonctionnement. Une équipe dirigée par Jolanta Janczak-Rusch et Bastian Rheingans du laboratoire « Technologie d'assemblage et corrosion » de l'Empa se consacre à cette tâche.

## L'INDUSTRIE EN DIFFICULTÉ

« Nos partenaires et clients, pour lesquels nous étudions des solutions sur mesure, en veulent toujours plus, et de préférence tout à la fois », explique Jolanta Janczak-Rusch. Un assemblage pour un nouveau composant électronique haute performance doit par exemple être fabriqué à la température la plus basse et la plus douce possible – tout en devant résister aux températures les plus élevées possibles lors du fonctionnement du composant et dissiper efficacement la chaleur dégagée par les composants. C'est la seule façon de combiner miniaturisation et augmentation des performances.

De nouveaux matériaux et procédés sont donc recherchés pour répondre aux exigences de plus en plus complexes en matière d'assemblage. L'assemblage avec des nanomatériaux, appelé nano-assemblage, offre un grand potentiel. L'industrie utilise déjà des nano-pâtes d'argent, c'est-à-dire des matériaux d'assemblage composés de nanoparticules d'argent. L'avantage : si le point de fusion de l'argent pur est de 962 degrés Celsius, les nano-pâtes d'argent permettent déjà de réaliser des assemblages à très bonne conductivité électrique et thermique à moins de 250 degrés Celsius. Et mieux encore : une fois fabriqués, ces assemblages résistent même à une température de fonctionnement supérieure à leur température de fabrication.

Photo: Gian Vaitl / Empa

## UTILISER LES NANO-EFFETS

Derrière cette solution innovante se cache un grand savoir-faire en science des matériaux. « Nous remplaçons ici un processus de brasage classique par un processus de frittage », explique Bastian Rheingans, chercheur à l'Empa. Cela signifie que les particules dans la zone d'assemblage ne sont pas fondues, mais qu'elles s'agglomèrent par diffusion pour former des particules et des grains plus gros, réduisant ainsi leur énergie de surface. La diffusion, c'est-à-dire le mouvement des atomes individuels, se produit particulièrement rapidement au niveau des surfaces et des interfaces. Comme les nanoparticules présentent une très grande surface par rapport à leur volume, le frittage est particulièrement prononcé à l'échelle nanométrique et peut déjà être exploité à des températures relativement basses.

Dans le cas de très petites nanoparticules ou de fines nanocouches, la proportion d'atomes de surface « liquides » et facilement mobiles devient même si importante que le point de fusion s'abaisse de quelques centaines de degrés en dessous du point de fusion du matériau massif. Les chercheurs appellent cet effet MPD (« Melting Point Depression ») – et l'utilisent pour développer des processus d'assemblage innovants et efficaces.

## LA COURSE CONTINUE

« Nous travaillons sur des nano-pâtes à plusieurs composants afin d'optimiser les propriétés de l'assemblage et d'ouvrir de nouveaux domaines d'application », explique Bastian Rheingans. « Nous étudions par exemple les nano-pâtes de cuivre et les nano-pâtes de nickel. » Ces métaux sont moins chers que l'argent et présentent des propriétés électriques et thermiques très intéressantes – mais comme ce sont des métaux moins nobles, ils s'oxydent beaucoup plus facilement. Il s'agit d'éviter cela dans le

processus d'assemblage. « Nous plaçons donc les nanoparticules dans une pâte composée d'adjuvants organiques qui s'évaporent lors du processus d'assemblage et réduisent l'oxydation à la surface des particules. Ou nous recouvrons les particules d'un revêtement protecteur », explique le chercheur de l'Empa. Grâce à des méthodes d'analyse spéciales comme la diffraction des rayons X (XRD) ou la spectroscopie électronique des rayons X (XPS), les chercheurs peuvent vérifier si la méthode testée pour protéger les nanoparticules fonctionne comme prévu.

## UN FOUR À L'ÉCHELLE NANOMÉTRIQUE

Pour les composants particulièrement sensibles à la température, les chercheurs disposent d'une autre méthode de nano-jointage qu'ils continuent de développer : l'assemblage réactif. Les films réactifs remplacent le four à souder comme source de chaleur locale. Elles se composent d'une multitude de nanocouches individuelles, par exemple en nickel ou en aluminium. Lorsque ces nano-multicouches sont allumées, le nickel et l'aluminium réagissent et forment une nouvelle liaison chimique – ce qui libère une très grande quantité de chaleur qui fait avancer le processus et le fait se déplacer sur toute la surface à une vitesse pouvant atteindre 50 mètres par seconde. Seules les épaisseurs de couche à l'échelle nanométrique permettent ici une réaction rapide et autoprogressive. Localement, on atteint jusqu'à 1000 degrés Celsius, mais en raison de la faible épaisseur du film réactif, la quantité totale de chaleur générée reste faible et se limite aux couches de soudure adjacentes. Il est ainsi possible d'appliquer des éléments électroniques sensibles sur des dissipateurs thermiques en cuivre en les ménageant et en les maintenant en place. ■

Plus d'informations : [www.empa.ch/web/s202](http://www.empa.ch/web/s202)

## VISITE DE CÉLÉBRITÉS CHEZ LES JUMEAUX NUMÉRIQUES

### EN VEDETTE

René Rossi, chercheur à l'Empa, Beat Tinner, conseiller d'État, Roland Ledergerber, président du CA du Parc d'innovation Est, Ignazio Cassis, président de la Confédération, Marc Mächler, conseiller d'État, Maria Pappa, maire de la ville, Paola Cassis, Tanja Zimmermann, directrice de l'Empa, Hans Ebinger, CEO Switzerland Innovation Park Ost.



Grande affluence à l'OLMA de St-Gall : le président de la Confédération Ignazio Cassis, très accompagné, a visité le stand commun de l'Empa et du Switzerland Innovation Park Ost pour s'informer sur les recherches actuelles. Dans le cadre d'un projet, les chercheurs des institutions participantes ont montré comment le « food waste » pouvait être réduit à l'aide de capteurs et de simulations informatiques – à l'aide de jumeaux numériques de fruits. En outre, les spécialistes ont fait la démonstration d'une ceinture thoracique pour la surveillance à long terme des patients cardiovasculaires. Elle a été validée avec des médecins dans le laboratoire du sommeil de l'hôpital cantonal de Saint-Gall ; la spin-off Nahtlos AG de l'Empa va la commercialiser. Outre le président de la Confédération et son épouse, les conseillers d'État saint-gallois Beat Tinner et Marc Mächler, la présidente de la ville de Saint-Gall Maria Pappa et d'autres acteurs du monde politique étaient présents, ainsi que la directrice de l'Empa Tanja Zimmermann et Roland Ledergerber, président du conseil d'administration de l'Innovationspark Ost.

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

## OLMA : LA MOBILITÉ SUR DE NOUVELLES VOIES

Comment ferons-nous le plein dans 20 ans ? Et avec quel type de voitures ? En ces temps où l'approvisionnement en pétrole, gaz et carburants est remis en question, le stand commun de l'Empa, de l'association Avenergy Suisse, qui représente les intérêts des importateurs de combustibles et carburants liquides, et de l'entreprise Osterwalder St. Gallen AG était au centre de l'intérêt du public. Des modèles de voitures entièrement électriques et des véhicules à propulsion hybride ont attiré les regards curieux – et des informations claires sur la production et les avantages environnementaux de l'hydrogène comme carburant ont incité les visiteurs à poser de nombreuses questions aux experts présents.

[www.empa.ch/web/s504](http://www.empa.ch/web/s504)



### QUIZ SUR LA TECHNIQUE

Beaucoup de questions, beaucoup de réponses – et une chance de gagner : les invités curieux ont pu tester leurs connaissances grâce à un quiz doté de prix attrayants.

Photos : Empa

## L'EMPA SUR LA SCÈNE POLITIQUE NATIONALE



### ÉCHANGE

Peter Richner s'entretient avec la ministre sortante de l'énergie et conseillère fédérale Simonetta Sommaruga.

Fin septembre, les groupes parlementaires du Palais fédéral ont effectué leurs excursions annuelles et visité différents coins de Suisse. Les parlementaires du centre, accompagnés du président du parti Gerhard Pfister et du président du groupe Philipp Matthias Bregy, se sont rendus à l'Empa à Thoun où la directrice Tanja Zimmermann leur a présenté les dernières innovations en matière de recherche sur les matériaux et de « fabrication avancée ». Pendant ce temps, l'excursion du groupe PS a conduit les conseillers nationaux et les conseillers aux États, accompagnés de la conseillère fédérale sortante Simonetta Sommaruga, au parc d'innovation de Dübendorf. À l'invitation de l'ETH Zurich, ils y ont discuté des défis de l'approvisionnement en énergie – avec eux, le vice-directeur de l'Empa Peter Richner et les équipes de move, de la spin-off Viboo de l'Empa et du « Materials and Technology Center of Robotics ».

Photo : Empa

## SÉMINAIRES DE L'ACADÉMIE DE L'EMPA

(en allemand et en anglais)

19. JANUAR 2023

NABEL Tagung : Luftqualität und Gesundheit

Zielpublikum : Industrie und Wirtschaft

[www.empa-akademie.ch/Nabeltagung](http://www.empa-akademie.ch/Nabeltagung)

Empa, Dübendorf

15. MÄRZ 2023

Kurs : Additive Fertigung von Metallen

Zielpublikum : Industrie und Wirtschaft

[www.empa-akademie.ch/addfert](http://www.empa-akademie.ch/addfert)

Empa, Dübendorf

23. MÄRZ 2023

13<sup>th</sup> VERT Forum

Zielpublikum : Industrie und Wirtschaft

[www.empa-akademie.ch/vert23](http://www.empa-akademie.ch/vert23)

Empa, Dübendorf

04. APRIL 2023

Kurs : Polymerwerkstoffe für technische Anwendungen

Zielpublikum : Industrie, Wirtschaft und Wissenschaft

[www.empa-akademie.ch/polymerwerkstoffe](http://www.empa-akademie.ch/polymerwerkstoffe)

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

THE PLACE WHERE INNOVATION STARTS.



Materials Science and Technology