

# INSIDE LABS

La recherche à l'INSA Rennes

## La recherche fondamentale au service du développement durable

### Dossier

L'hydrogène se met au vert

Les matériaux pérovskites,  
une révolution pour le photovoltaïque ?

Le streaming vidéo durable, vers une  
réduction de la consommation d'énergie

Un béton écologique

Une réalité virtuelle « tactile », portrait de Maud Marchal

Zoom sur le marquage des matériaux

# sommaire

## Dossier

La recherche fondamentale  
au service du développement durable

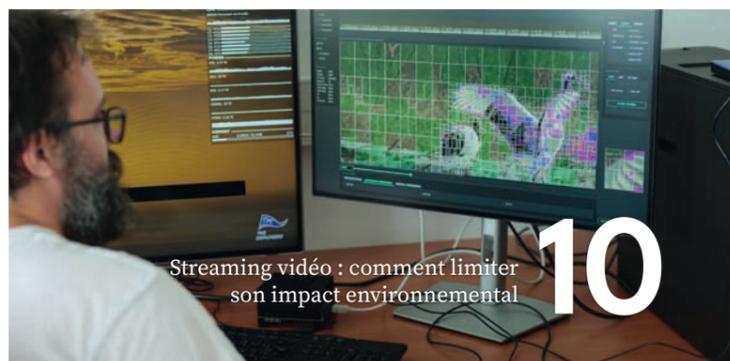
# 4

L'hydrogène se met au vert,  
grâce aux semi-conducteurs III-V



Les matériaux pérovskites vont-ils  
révolutionner le photovoltaïque ?

# 8



Streaming vidéo : comment limiter  
son impact environnemental

# 10

# 12

## Photo reportage

Un béton écologique  
à base de sédiments  
marins.



# 16

## Zoom sur

Marquage des matériaux :  
une réponse à la recyclabilité ?



# 14

## Portrait

Maud Marchal :  
rendre la réalité virtuelle plus « tactile »



# edito

par Vincent Brunie, Directeur INSA Rennes

### Une vitrine au service de notre excellence académique

J'ai le plaisir de lancer le premier numéro d'Inside Labs, le magazine de la recherche à l'INSA Rennes. Bi-annuel, ce magazine a pour objectif d'illustrer l'excellence académique et l'influence scientifique de notre institut. Au travers de ces pages, vous pourrez observer comment, en collaboration avec nos partenaires, notre établissement s'engage dans une recherche interdisciplinaire, spécifiquement adaptée aux besoins de la société et des entreprises.

Dans ce premier numéro, vous découvrirez ou redécouvrirez notamment des projets de recherche autour du numérique responsable et des matériaux pour une énergie durable, une recherche menée par des hommes et des femmes d'exception.

Je souhaite longue vie à ce magazine que vous aurez, je l'espère, autant de plaisir à feuilleter que moi.

Bonne lecture.

Directeur de la publication : Vincent Brunie

Comité de rédaction : Emilie Armand, Chloé Blais, Jeanne-Mathilde Chanoine, Olivier Durand, Hervé Folliot, Perrine Franca, Aurore Gouin, Olivier Guillou, Mounir Haddou, Kalua Tanguy

Rédaction : Emilie Armand, Mediathena, Victorine Vauquelin

Conception : Kalua Tanguy

Impression : Imprimerie Media Graphic - Label Imprim'Vert

Crédits photographiques : ©FranckBoisselier - ©AlexisChézière - ©KaluaTanguy - ©Solvalor - ©AdobeStock

# dossier

## Les sciences fondamentales au service du développement durable

### L'hydrogène se met au vert, grâce aux semi-conducteurs III-V

Quand, en 1994, des chercheurs de France Télécom décident de créer le laboratoire qui deviendra l'Institut Foton (Fonctions Optiques pour les Technologies de l'information), afin de développer une activité de recherche en télécommunication optique, ils choisissent les semi-conducteurs III-V en tant que sujet d'études. Depuis, ces matériaux ont été examinés sous tous les angles. Et pourtant, près de 30 ans après, ils n'ont pas fini de livrer tous leurs secrets. En 2022, l'équipe OHM (Optoélectronique, Hétéroépitaxie et Matériaux) de l'Institut Foton (UMR CNRS 6082 - Univer-

sité de Rennes 1, INSA Rennes, CNRS), localisée à l'INSA Rennes, leur a en effet découvert de très étranges propriétés, qui permettraient de produire de l'hydrogène qui respecte l'environnement. Explications par Charles Cornet, responsable de l'équipe.

Antimoniure d'aluminium, arséniure de bore, phosphure de gallium... Derrière ces termes obscurs, exceptés pour les chimistes, se cache une famille, la famille des matériaux III-V. Un nom de code qui s'explique sim-

plement, puisque ces composants sont formés d'éléments de la colonne III - aluminium, bore, gallium, indium, ou encore thallium - et de la colonne V - antimoine, arsenic, bismuth, ou encore phosphore - du fameux tableau périodique de Mendeleïev.

#### Une famille de composés bardée de qualités

« Les matériaux III-V sont bien connus pour leurs propriétés optiques performantes, que ce soit en émission ou en absorption de la

lumière, commente Charles Cornet. Ce sont les semi-conducteurs les plus utilisés dans l'industrie après le silicium, pour fabriquer des photodétecteurs par exemple, des diodes lasers destinées aux fibres optiques pour Internet, des capteurs environnementaux ou médicaux, ou encore des cellules solaires... » Mais s'ils sont très performants optiquement, les matériaux III-V sont chers, extrêmement chers, au moins 10 fois plus que leurs équivalents en silicium. Ils sont aussi plus rares, sachant que le silicium est le deuxième élément le plus abondant dans la croûte terrestre. Plus d'un quart de la masse de la croûte terrestre est effectivement constituée de silicium et, avec l'oxygène, les minéraux silicatés forment 90 % de la fine couche de roche flottant au-dessus du manteau terrestre.

#### Un micron de III-V sur 0,3 millimètre de silicium

« Depuis longtemps, les chercheurs tentent de réduire le coût de fabrication et l'empreinte environnementale des semi-conducteurs III-V, confie Charles Cornet, l'une des solutions étant de diminuer la quantité utilisée. » Les chercheurs de l'équipe OHM à l'Institut Foton ont justement développé une méthode rapide et performante pour déposer une fine couche d'un micromètre de matériau III-V sur un substrat de 300 micromètres de silicium. L'échantillon obtenu présente des qualités électro-optiques aussi bonnes que celles des semi-conducteurs III-V traditionnels avec un impact environnemental et un coût réduit.

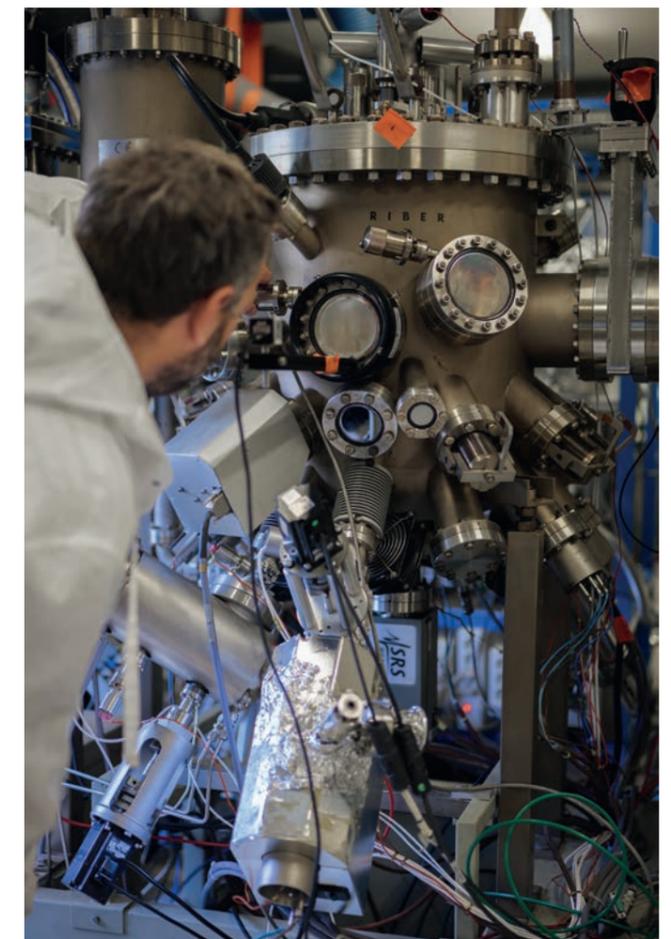
Reconnue à l'international pour cette expertise, l'équipe a alors été contactée à la fin de l'année 2018 par l'University College London (UCL), qui cherchait à concevoir une photo-électrode. Les chimistes londoniens ont effectué divers essais, constatant que l'échantillon confié par l'équipe OHM fonctionnait bien au-delà de leurs espérances. « Ils nous ont écrit dès janvier 2019 pour nous communiquer leur enthousiasme, se souvient Charles Cornet. Dès le lendemain, j'étais à Londres pour observer les performances étonnantes obtenues par l'University College London : plongé dans l'eau et soumis à la lumière, notre échantillon permettait de produire de l'hydrogène ! »

#### L'hydrogène, un vecteur énergétique idéal face à la situation climatique

Avec des résultats aussi prometteurs, Charles Cornet, Yoan Léger et Nicolas Bertru de l'équipe OHM, décident de s'engager pleinement dans l'étude des propriétés des semi-conducteurs III-V pour la production décarbonée d'hydrogène. « L'hydrogène offre un intérêt énergétique majeur, pour fournir de l'électricité et de la chaleur à la demande, avec un impact environne-

mental potentiellement faible, affirme Charles Cornet. Par exemple, en combinant l'hydrogène et l'oxygène, les piles à combustibles des véhicules électriques à hydrogène produisent le courant qui alimente le moteur électrique, en rejetant de l'eau simplement. »

Ainsi considéré comme le « carburant du futur », il peut aussi être utilisé pour les besoins de chaleur et d'électricité domestique, comme moyen de stockage des énergies renouvelables intermittentes, ou à grande échelle dans des centrales de production d'énergie. Mais actuellement, l'hydrogène est en grande partie fabriqué à partir de produits pétroliers et émet du CO<sub>2</sub>. « Il convient donc de trouver d'autres modes de production d'hydrogène, durables et décarbonés, par exemple en utilisant les rayonnements du soleil sur des cellules photo-électrochimiques plongées dans l'eau, qui cassent les molécules d'eau pour former des molécules d'hydrogène et d'oxygène. »



Chambre de croissance cristalline sous vide (« Epitaxie par jets moléculaire ») permettant d'élaborer les matériaux constituant les photoélectrodes.

## La reprise de 40 ans de recherche

En 2019, si l'idée convainc les chercheurs du groupe OHM, ils méconnaissent encore le domaine : ils sont physiciens, pas chimistes ! Or, à Rennes justement, des électrochimistes de renom travaillent à l'ISCR (Institut des Sciences Chimiques de Rennes, UMR 6226 - CNRS, Université de Rennes 1, ENSCR, INSA Rennes), dont les expertises sont très complémentaires de celles de l'équipe OHM. Ensemble, les physiciens et les chimistes rennais ont coconstruit un programme d'étude sur les semi-conducteurs III-V pour la production d'hydrogène propre, reprenant des recherches des années 1980 sur les dépôts de couches minces de ces matériaux sur des substrats de silicium.

L'un des principaux problèmes de cette technique était lié à l'apparition de défauts cristallins dans le semi-conducteur. « Alors que les matériaux III-V sont organisés très régulièrement



Tony Rohel, Technicien en charge de l'élaboration des matériaux par épitaxie pour la production d'hydrogène solaire (INSA Rennes, Institut FOTON), effectue la croissance cristalline de semi-conducteurs III-V sur des substrats (ou wafers en anglais) de Si, à partir desquelles sont fabriquées les photo-électrodes.

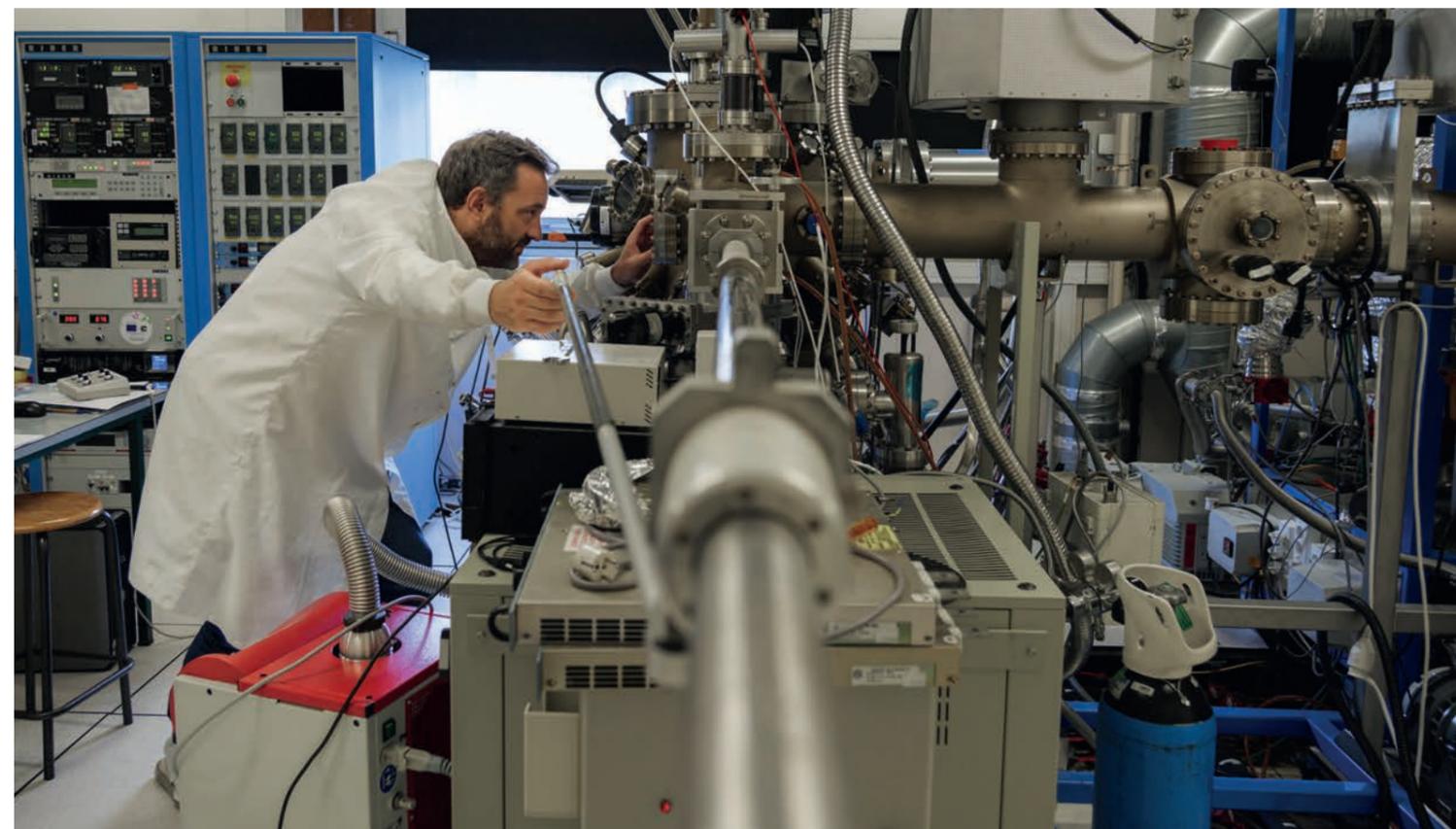
plan III, puis V, etc., décrit Charles Cornet, les défauts dans le cristal sont constitués des mêmes atomes, mais avec un ordre différent, en particulier deux plans d'éléments V à la suite, collés l'un à l'autre. » Or, depuis des années, ces irrégularités sont considérées comme réhibitoires pour les applications, parce qu'elles entraînent par exemple la dégradation des performances des cellules photovoltaïques faites de matériau III-V sur substrat de silicium. Les scientifiques du monde entier tentent alors de se débarrasser à tout prix de ces défauts cristallins.

## Les qualités étonnantes des défauts cristallins

Les physiciens et les chimistes de Rennes ont opté pour une autre voie de recherche. Ils ont étudié ces irrégularités dans le matériau, ont découvert pourquoi elles apparaissaient et ont décrit comment les contrôler. Ils se sont ensuite aperçus que certaines d'entre elles présentaient un comportement singulier, notamment qu'elles pouvaient conduire le courant électrique. Ce réarrangement atomique (qu'on peut qualifier de « paroi d'antiphase » puisqu'on n'est plus en phase avec le reste du semi-conducteur III-V) ne peut donc plus être considéré comme un défaut, mais bien comme un nouveau matériau avec de nouvelles propriétés... aussi nombreuses qu'étonnantes ! « Ainsi, les matériaux sont d'ordinaire soit des métaux, soit des semi-conducteurs, soit des isolants, affirme Charles Cornet. Or, la paroi d'antiphase se comporte localement comme un métal dans un semi-conducteur. C'est comme si le matériau III-V, avec ses inclusions réorganisées, présentait à la fois un caractère métallique et semi-conducteur. À ma connaissance, cette propriété est inédite ! » Il est surtout très intéressant d'ajouter des propriétés électriques aux excellentes propriétés optiques d'origine du matériau III-V.

## Comme le soleil de l'aube activant la photosynthèse

Et ce n'est pas tout ! Le nouveau matériau avec ses « défauts » est susceptible de conduire des charges à la fois positives et négatives. « Dans un semi-conducteur, le transport du courant électrique s'effectue soit via les électrons, soit, à l'inverse, via une absence d'électron, décrypte Charles Cornet. Ce qui est surprenant, c'est que notre matériau fait les deux à la fois, fonctionnant aussi bien en tant que cathode qu'en tant qu'anode. On peut alors imaginer créer une



Plateau technique de croissance cristalline à l'Institut FOTON (plate-forme technologique Renatech + Nano-Rennes, bâtiment 10 INSA Rennes)

«feuille» artificielle avec un seul échantillon de notre matériau, placée dans l'eau sous le soleil, pour fournir simultanément des molécules d'hydrogène et d'oxygène, imitant ainsi les végétaux qui activent la photosynthèse, lorsque le soleil se lève à l'aube. » Autre fait inattendu : les charges électriques se déplacent verticalement, à travers le micron de matériau III-V sur le substrat de silicium. Il semblerait donc que les échantillons soient isolants horizontalement et conducteurs verticalement. On dit qu'ils sont anisotropes, c'est-à-dire qu'ils changent de propriété selon la direction.

Ce nouveau matériau n'a sans doute pas fini de révéler d'autres secrets, que les chercheurs rennais vont tenter de percer, avant de pouvoir l'utiliser pour convertir à grande échelle l'énergie solaire en hydrogène. « Nous sommes sur la bonne voie, conclut Charles Cornet. Nous avons fait de nombreux essais sur des photo-électrodes fabriquées à partir de notre matériau : celles-ci fonctionnent efficacement sous illumination et pourraient tout à fait être intégrées dans des cellules photo-électrochimiques pour une produc-

tion d'hydrogène solaire à plus grande échelle. Notre solution est très prometteuse et intéresse les instances scientifiques, qui nous ont accordé des financements importants pour creuser encore le sujet et améliorer la stabilité de nos cellules, dans un objectif industriel. »

Déjà, les chercheurs voient plus loin, imaginant développer d'ici cinq ans un démonstrateur tout intégré, une petite cellule dotée de photo-électrodes composées de couches minces de matériaux III-V déposées sur silicium, sous un filet d'eau, capable de produire de l'hydrogène et de l'oxygène sous l'effet d'un rayon de soleil. À suivre !

# Les matériaux pérovskites vont-ils révolutionner le photovoltaïque ?

À l'Institut Foton<sup>1</sup>, les matériaux III-V ne sont pas les seuls semi-conducteurs étudiés. Les pérovskites cristallisent aussi de grands espoirs en vue d'applications photovoltaïques performantes et à bas coût. La recherche, amorcée il y a une décennie, a déjà fait des progrès considérables et l'horizon d'une industrialisation se rapproche. Jacky Even, physicien à l'INSA Rennes, en est convaincu.

Exotique, la pérovskite ? Au contraire. Cette structure cristalline est l'une des plus communes sur terre. « On savait que les pérovskites halogénées étaient sensibles à la lumière, mais les premières cellules photovoltaïques à base de pérovskites ont été réalisées en 2009 seulement, à l'université de Tokyo, confie Jacky Even. Les résultats étaient décevants, avec 3,8 % de conversion en électricité et une dégradation en quelques secondes. Le travail du chimiste japonais Tsutomu Miyasaka n'a donc pas attiré l'attention qu'il méritait ! »

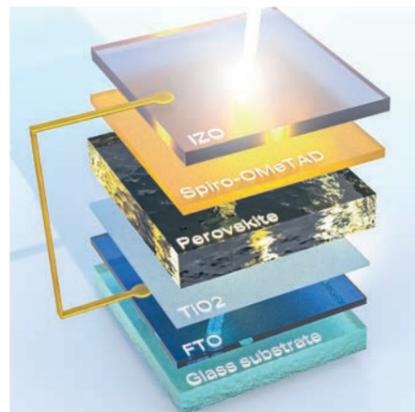
## L'intuition d'une avancée majeure

Celui-ci en parle néanmoins à des chercheurs européens. Bingo : deux articles sur le sujet sortent en 2012 à Oxford et à Lausanne, qui démontrent le bénéfice des pérovskites pour le photovoltaïque, avec un rendement de conversion dépassant 10 %. « On était encore loin des 26 % constatés avec le silicium en laboratoire, note Jacky Even, mais le fait de générer un fort courant électrique avec un matériau encore très perfectible nous a mis la puce à l'oreille. C'était déjà synonyme d'avancée majeure ! »

Le physicien rennais avait monté en 2010 un groupe de simulation sur le sujet avec Claudine Katan, directrice de recherche à l'Institut des Sciences Chimiques de Rennes<sup>2</sup>. Ils travaillent depuis plusieurs années avec trois laboratoires américains : Los Alamos National Lab au Nouveau Mexique, Rice University à Houston, et Northwestern University à Chicago.

## Des rendements proches des cellules silicium

L'intuition de Jacky Even et Claudine Katan sur l'intérêt des pérovskites s'est révélée juste. Les pérovskites agitent la communauté scientifique et suscitent des milliers de publications par an. Les rendements de conversion des cellules photovoltaïques ont décollé, avec un record actuel à 25,6 %, en consommant peu de matériaux.



Les couches de pérovskites mesurent ainsi 300 nm, soit 1 000 fois moins que celles de 300 µm basées sur le silicium. Le coût de fabrication est limité, car la température de production des cellules de pérovskites

tourne autour de 100°C. Résultat : les cellules en pérovskites seraient 20 fois moins chères ! Et pour améliorer encore les rendements, des équipes explorent la voie des "tandems" de cellules de natures différentes. En combinant une couche de pérovskites, qui capture la partie haute énergie du spectre solaire, avec le silicium, qui capture la partie infrarouge de basse énergie, le rendement atteint 32,3 % en 2022 !

## Des obstacles abattus les uns après les autres

Les pérovskites se confrontent néanmoins à des obstacles. Leur instabilité d'abord, que le groupe de Jacky Even étudie depuis plusieurs années : « Nous avons déjà montré avec nos collègues américains que les pérovskites s'autoréparent, en les plongeant dans le noir. Dans un travail à paraître prochainement, les cellules tiennent 2 000h sous rayonnement et humidité contrôlée, en combinant deux couches de pérovskites, dont l'une est dérivée de recherches publiées dans Nature en 2016. Souvenez-vous qu'en 2009 les cellules de Tsutomu Miyasaka se dégradaient en quelques secondes ! »

Le second challenge à relever est d'agrandir les cellules photovoltaïques. En laboratoire, elles font moins d'1 cm<sup>2</sup>. Or, l'augmentation d'échelle abaisse les rendements : de 26 à 16 %. « Nous avons observé que la variété de pérovskites utilisée pour allonger la photostabilité est compatible avec les méthodes de dépôt grande surface et prometteuse pour éviter la diminution des rendements. »

Reste le problème du plomb, ingrédient de la structure des pérovskites offrant les conversions de 26 %. « Les quantités de plomb sont minimes, de l'ordre de 0,5 g par m<sup>2</sup> de panneau solaire. Le hic, c'est que la réglementation européenne interdit toute nouvelle technologie intégrant du plomb, alors qu'il y en a quelques grammes dans 1 m<sup>2</sup> de panneau en silicium actuels. » Mais l'interdiction de l'usage du plomb n'est

sans doute pas inéluctable. Le groupe de Jacky Even et Claudine Katan contribue par ailleurs au programme européen DROP-IT visant à remplacer le plomb par d'autres composés dans les cellules photovoltaïques du futur. Résultats attendus pour 2023 !

## Des articles dans des revues prestigieuses

La collaboration franco-américaine s'est concrétisée par des articles dans les revues prestigieuses Nature et Science et a permis à Jacky Even d'intégrer le classement Web of Science des chercheurs les plus cités au monde.

<sup>1</sup> Institut Foton : UMR CNRS 6082 - Université de Rennes 1, INSA Rennes, CNRS.

<sup>2</sup> ISCR : UMR 6226 - CNRS, Université de Rennes 1, ENSCR, INSA Rennes.



Laurent Pedesseau, Maître de conférences à l'INSA Rennes et Jacky Even, Professeur des Universités à l'INSA Rennes et membre senior de l'Institut Universitaire de France

# Streaming vidéo : comment limiter son impact environnemental

Plus de 300 millions de tonnes de CO2 par an : c'est ce qu'émet la vidéo en ligne, soit autant que toute l'Espagne, selon le think tank "The Shift Project". Pis encore, le trafic internet lié à la vidéo a quadruplé au cours des cinq dernières années. Face à cette situation intenable, l'Institut d'Électronique et des Technologies du numÉrique<sup>1</sup> cherche à réduire la consommation d'énergie du streaming vidéo.

Consacrez-vous plus d'une heure par jour au visionnage de vidéo sur votre ordinateur ou votre smartphone ? Sachez que cette activité a un fort impact sur votre empreinte carbone ! « L'usage des vidéos explose, confie Daniel Ménard, sous-directeur de l'IETR en charge du site de l'INSA Rennes, avec l'émergence de nouveaux services, comme la vidéo à la demande (VOD), les sites de partage tels YouTube ou TikTok, et de nouveaux médias augmentant le

volume de données d'une vidéo : 4K, 8K, HDR<sup>2</sup>, HFR<sup>3</sup>... Or, ces services exploitent des datacenters, des réseaux et des terminaux, très énergivores et émetteurs de CO2. »

## À chaque nouveau standard, une réduction de l'énergie consommée

L'IETR travaille justement sur l'optimisation de la consommation d'énergie des systèmes de codage et de transmission de vidéo, souvent en collaboration avec des entreprises rennaises. « En particulier, Wassim Hamidouche, aujourd'hui membre du comité international de standardisation ITU/MPEG<sup>4</sup>, a développé une expertise sur la normalisation du codage vidéo », précise Daniel Ménard.

Chaque nouveau standard permet de diviser par deux la quantité de données par rapport à la précédente norme, avec la

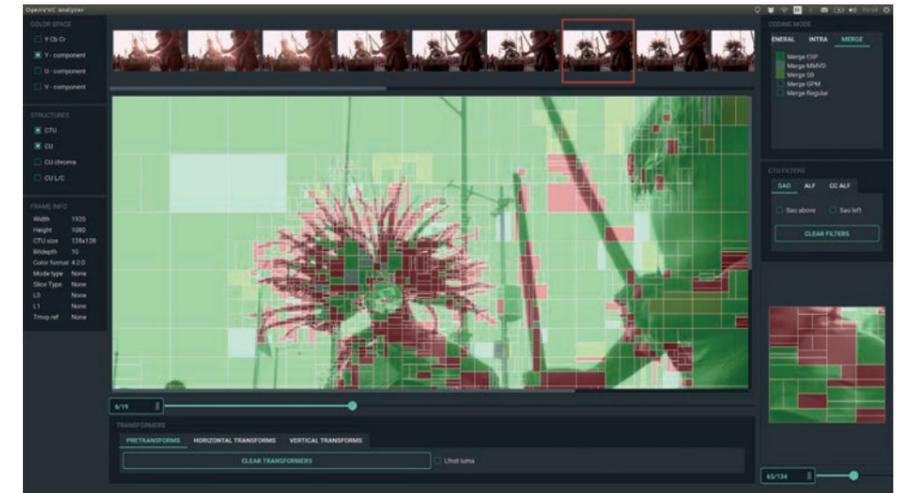
même qualité d'image. Le standard VVC (Versatile Video Coding), publié en juillet 2020, permettra ainsi de réduire la consommation d'énergie de la partie transmission dans les réseaux.

Pour décoder cette norme vidéo VVC, l'équipe VAADER (Video Analysis and Architecture Design for Embedded Resources) de l'IETR, sous l'impulsion de Wassim Hamidouche, a conçu un décodeur logiciel openVVC, accessible à tout utilisateur de smartphone, sans attendre que les futurs processeurs intègrent le décodeur matériel pour visionner un film. Toutefois, optimiser la consommation d'énergie de ce décodeur n'est pas aisé car la complexité du décodage varie fortement au fil du temps.

## Réduire la complexité du décodage et de l'encodage

En collaboration avec l'entreprise Interdigital, l'IETR a donc travaillé sur l'encodeur, chargé de compresser le flux vidéo, afin qu'il envoie des métadonnées pour estimer la complexité du décodage. De cette manière, le décodeur utilisera mieux les techniques de réduction de consommation d'énergie, par exemple le contrôle de la fréquence du processeur. « Souvenez-vous, dans les années 1990, les ordinateurs ne chauffaient pas

car les fréquences du processeur étaient plus basses, illustre Daniel Ménard. Évidemment, les performances étaient plus faibles. Aujourd'hui, l'objectif est de trouver la fréquence la plus basse pour assurer les performances nécessaires au décodage de chaque image. » Pour l'encodeur aussi, la complexité bondit : 10 fois plus que le

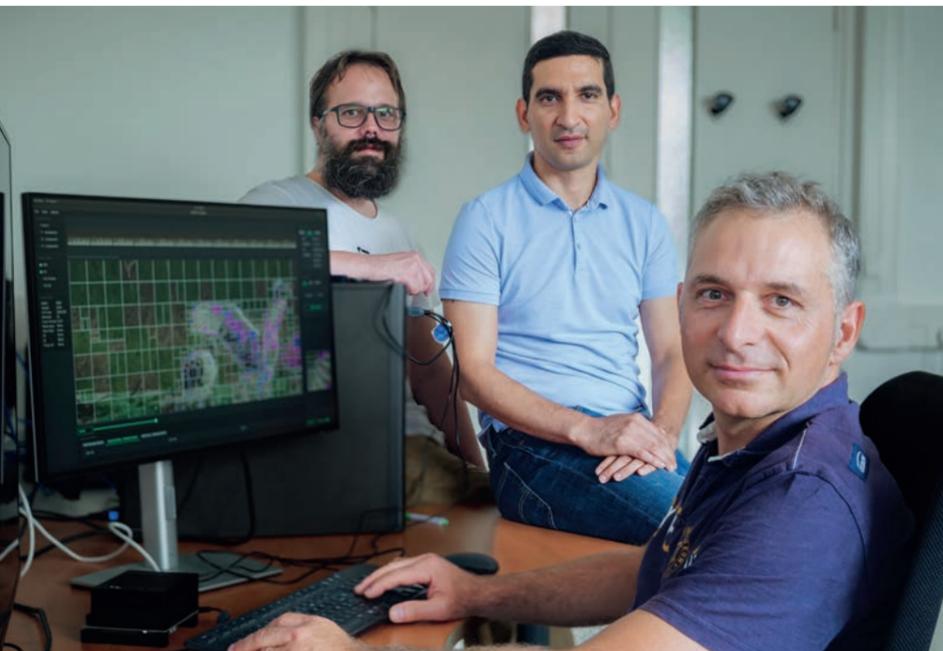


standard précédent HEVC ! L'équipe a donc cherché à la réduire, en diminuant l'espace de recherche des paramètres de codage vidéo à l'aide de technologies d'intelligence artificielle, les moins complexes possibles.

Aujourd'hui, l'IETR veut définir un modèle énergétique sur l'ensemble de la chaîne de diffusion des vidéos, de la caméra qui filme au smartphone qui visionne, en passant par le datacenter et le réseau. L'idée est d'estimer ce que chaque partie consomme, pour réduire l'empreinte environnementale au global.

« Au-delà des progrès techniques, il conviendrait aussi de changer les comportements, pour que chacun réduise ses usages vidéo, conclut Daniel Ménard. Il est effectivement étonnant d'observer que la quantité de données vidéo qui transitent sur internet ne faiblit pas, alors que les normes successives réduisent les débits. Pour éviter cet effet rebond, la solution sera-t-elle celle d'une prise de conscience sociétale ou d'une action forte du législateur ? Le débat est ouvert ! »

« Le visionnage de 10h de vidéo haute définition utilise davantage de données que l'ensemble des articles en anglais de Wikipédia. »



<sup>1</sup> IETR : UMR 6164 - CNRS, CentraleSupélec, INSA Rennes, Nantes Université, Université de Rennes 1;

<sup>2</sup> High Dynamic Range, avec une gamme de couleurs et de luminosité plus étendue.

<sup>3</sup> High Frame Rate, augmentant le nombre d'images par secondes.

<sup>4</sup> Union Internationale des Télécommunications et Moving Picture Experts Group.

De gauche à droite :

**Pierre-Loup Cabarat**, Ingénieur de Recherche, principal développeur du logiciel open source openVVC ;

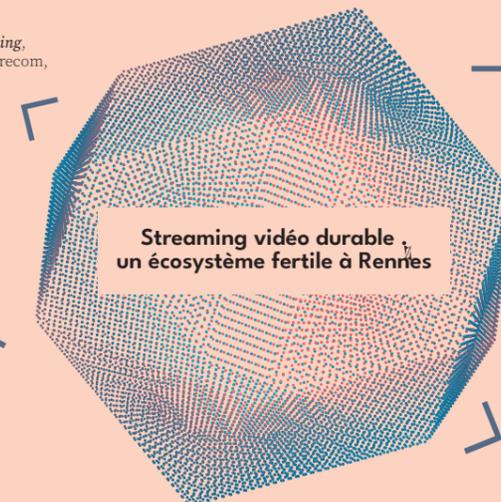
**Wassim Hamidouche**, Maître de Conférences, HDR, responsable du projet open-source openVVC et de la thématique Codage Vidéo au sein de l'équipe Vaader de l'IETR ;

**Daniel Ménard**, sous directeur de l'IETR - responsable du site INSA de l'IETR et responsable de l'axe transversal Systèmes Embarqués au sein de l'équipe Vaader de l'IETR.

Les recherches de l'IETR sont généralement réalisées dans le cadre de collaborations étroites avec des industriels de la vidéo, souvent rennais. Les projets suivants ont ainsi permis de mener ces travaux axés sur la consommation d'énergie pour la vidéo, depuis 2017.

**EFI**, Efficient Future & new Generation Video Coding, avec Thales SIX GTS, Vitec, ATEME, Ektacom, Eurecom, videoLabs, LabStic, et financé par BPI France et la Région Île-de-France.

**3EMS et 3EMS2**, Energy Efficient Enhanced Media Streaming, avec Interdigital, ATEME, ENENSYS Technologies, et financé par la Région Bretagne - FEDER (UE).



**DEEPTC**, Delivery Over Energy-Efficient Processing and Transcoding in Edge Computing, avec TDF, Aviwest, et financé par la Région Bretagne - FEDER (UE).

**NESTED 5G**, New vidEo STandards for Enhanced Delivery, avec ATEME, Orange, Viaccess-Orca, ENENSYS Technologies, et financé par la Région Bretagne - FEDER (UE).

**TRISTRAM**, TRansmission Intelligente et STreaming vidéo Robuste pour les Applications de la Mer, avec Ektacom, IMSolution, et financé par la Région Bretagne - FEDER (UE).

# Un béton écologique à base de sédiments marins

## photo reportage

Siham KAMALI-BERNARD, Maître de conférences HDR au Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique\* à l'INSA Rennes participe actuellement, avec son équipe, au projet Eco-Béton de Sédiments Marins (EBSM) dans des applications marines et urbaines. Ce projet est porté par l'entreprise Solvalor Atlantique, en collaboration avec Celtismar, l'INSA Rennes et le Muséum National d'Histoire Naturelle-station marine de Concarneau. Il vise à développer un béton écologique biocompatible avec le milieu marin tout en revalorisant et inertant les sédiments de dragage du port de Vannes dont le traitement est une problématique prégnante pour les gestionnaires concernés. Avec ce béton écologique de sédiments marins, Solvalor Atlantique et ses partenaires souhaitent concevoir et réaliser des récifs artificiels, des mouillages écologiques, des tétrapodes et aussi des bancs de mobilier urbain en béton pour l'aménagement du port de Vannes. L'équipe INSA apporte son expertise dans la valorisation des sédiments en Génie Civil et dans la caractérisation physico-chimique et mécanique des bétons. La réussite du projet constituera en Bretagne une avancée majeure dans cette thématique nationale de valorisation des sédiments et plus globalement celle des déchets.

Ce projet a été labellisé en 2021 par le Pôle Mer Bretagne-Atlantique et bénéficie du soutien de la Région Bretagne et des Collectivités partenaires ainsi que de la BPI.

\* LGCGM : Unité de recherche INSA Rennes, Université de Rennes 1



Bassin de stockage des sédiments de dragage du port de Vannes gérés par la société Solvalor



Sédiments de dragage du port de Vannes



Échantillons de sédiments au laboratoire



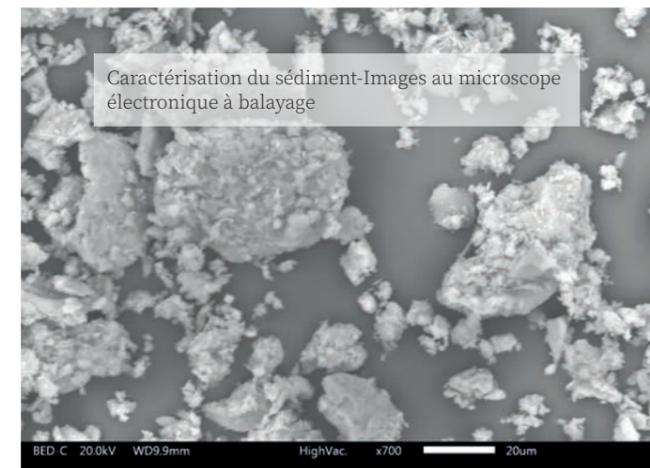
Équipe INSA du projet EBSM  
De gauche à droite : Franck Pavoine, Valentin Georges, Christian Garand, Jean-Yves Brossault, Siham Kamali-Bernard, Jean-Luc Metayer



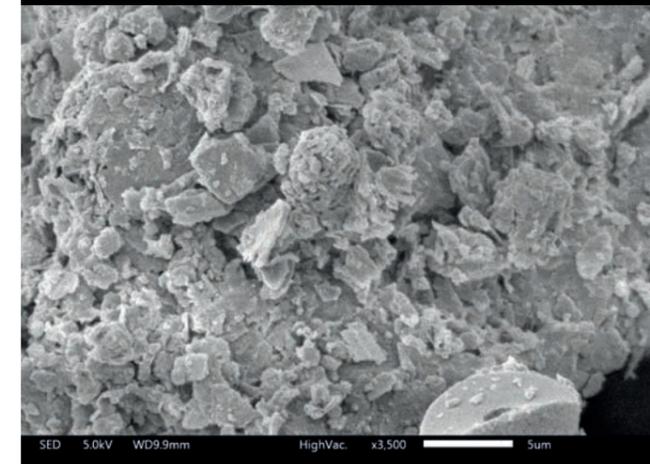
Éprouvettes de béton EBSM à base de sédiments du port de Vannes et de granulats issus de terres traitées



Mesure de la consistance du béton



Caractérisation du sédiment-Images au microscope électronique à balayage



### Le saviez-vous ?

Plus de 30 millions de tonnes de sédiments marins et fluviaux sont dragués annuellement en France.

## Maud Marchal : rendre la réalité virtuelle plus « tactile »

Peut-on faire ressentir la pression, la vibration, la température ou la texture dans les univers de réalité virtuelle ? C'est l'objet des travaux de Maud Marchal, professeure des universités à l'INSA Rennes et chercheuse au laboratoire IRISA\*. Elle s'intéresse à la conception de nouvelles interfaces haptiques et aux algorithmes associés pour interagir avec les mondes virtuels.

Originaire de Rennes, Maud Marchal a quitté sa ville pendant huit ans, le temps d'un cursus d'ingénieur, d'une thèse et de deux postdocs. Puis elle est revenue sur ses terres en 2008, pour intégrer l'IRISA\* et l'INSA Rennes. « L'école a l'avantage de réunir de multiples disciplines, dont la mécanique et l'électronique qui sont indispensables à mes travaux. Pour moi, c'est un écosystème très riche ». Maud Marchal collabore aussi avec des chercheurs en neurosciences, cette fois au niveau international.

La recherche sur les interfaces haptiques et leurs algorithmes s'est renouvelée en profondeur ces dernières années. Jusque-là, elle se focalisait sur les bras à retour d'effort, de coûteux systèmes industriels qui reproduisaient des forces et des couples ; ce qu'on appelle la dimension « kinesthésique » du toucher.

### Simuler le toucher, un défi complexe

Puis l'arrivée de casques de réalité virtuelle, contrôleurs de jeux vidéo et autres interfaces accessibles au grand public a démocratisé ce domaine, qui s'est aussi ouvert à l'ensemble du monde professionnel. Ce qui favorise de nouvelles avancées, notamment vers une réalité virtuelle plus « tactile », comme l'explique Maud Marchal : « Il s'agit de stimuler les mécanorécepteurs placés sous la peau, pour simuler la pression, la vibration, la température ou la texture. Mais ces sensations sont très fines, et les mécanorécepteurs sont présents sur tout le corps. Les interfaces haptiques sont donc bien plus complexes à concevoir que celles pour la vue ou l'ouïe. »

Exemple d'une nouvelle interface haptique attachée à la main d'un utilisateur immergé en réalité virtuelle afin de recréer la sensation de toucher pour des objets virtuels.

Selon l'objectif visé, ces interfaces peuvent prendre la forme d'une bague, d'une veste, d'un support posé au sol qui donnera l'illusion de marcher sur du sable ou sur une surface humide... Grâce à l'impression 3D, Maud Marchal et ses collègues peuvent fabriquer facilement des prototypes pour les évaluer, les améliorer et les soumettre à des tests utilisateurs.

Elle conçoit également les algorithmes associés à ces nouvelles interfaces. « Ils sont très spécifiques. En particulier, si on veut simuler un « vrai » toucher, ils doivent être quatre à vingt fois plus rapides que ceux employés pour le rendu visuel ». La difficulté est encore plus grande si on cherche à saisir et à manipuler virtuellement des objets déformables comme des tissus humains, des fruits ou des vêtements : ils ne sont pas homogènes et leurs propriétés changent selon la façon dont ils sont tenus et sollicités !

### Les applications : médecine, robotique industrielle...

Maud Marchal s'intéresse beaucoup à cette simulation d'objets déformables qui ouvre à la réalité virtuelle tactile des débouchés prometteurs. En chirurgie par exemple, elle pourrait aider le praticien novice à s'entraîner à un geste opératoire, ou offrir à son confrère expérimenté la possibilité de comparer plusieurs options avant une intervention risquée. « Ce domaine me parle, confie la chercheuse. J'ai consacré ma thèse à une application médicale et j'avais pensé un moment à la médecine avant de m'orienter vers l'informatique. »

Autre débouché, la robotique industrielle, avec de futurs robots dotés d'un sens du toucher aiguisé. Ils pourraient manipuler avec délicatesse des objets déformables tels que des fruits, des pâtisseries, des câbles électroniques ou des costumes de prix...



### Des recherches largement reconnues

Ces travaux sont largement reconnus. Maud Marchal est ainsi depuis 2018 membre junior du prestigieux Institut Universitaire de France. Elle coanime le Groupement de recherche du CNRS Informatique graphique et réalité virtuelle, fort de 500 chercheurs. La chercheuse contribue aussi à l'organisation de grandes conférences internationales.

Son agenda, bien chargé, comprend enfin des cours d'informatique, d'informatique graphique et de réalité virtuelle dispensés aux étudiants de l'INSA Rennes. « J'aime transmettre et j'aime cette activité d'enseignement. Je regrette juste qu'il y ait si peu de filles qui choisissent l'informatique. »

### Le parcours de Maud Marchal en six dates

- 2003 : double-diplôme d'ingénieure ENSIMAG (Grenoble) et master de recherche (Université Joseph Fourier, Grenoble)
- 2006 : docteur en informatique (Université Joseph Fourier, Grenoble)
- 2008 : maîtresse de conférences à l'INSA Rennes, chercheuse à l'IRISA
- 2014 : habilitation à diriger des recherches 2018 : membre de l'Institut Universitaire de France (IUF)
- 2020 : professeure des universités à l'INSA Rennes

\* IRISA : UMR 6074 - CentraleSupélec, CNRS, ENS Rennes, IMT Atlantique, Inria, INSA Rennes, Université Bretagne Sud, Université de Rennes 1

# zoom sur

## Marquage des matériaux : une réponse à la recyclabilité ?



Carole Daiguebonne et Olivier Guillou travaillent ensemble sur le marquage des matériaux

## QUESTIONS *à*

*Carole Daiguebonne, Maître de Conférences et Olivier Guillou, Professeur des Universités à l'INSA Rennes*

Olivier Guillou et Carole Daiguebonne, enseignants-chercheurs à l'INSA Rennes\* ont fondé avec Nicolas Kerbellec, en 2010, la société Olnica autour des propriétés de marqueurs luminescents à base de terres rares. En quelques années, l'entreprise est devenue spécialiste en matière de lutte contre la contrefaçon, les malfaçons ou le vol dans le secteur industriel. La collaboration entre l'équipe de recherche et l'entreprise prend un nouveau tournant en 2021, lors du lancement de leur laboratoire commun ChemInTag (Chemical Inorganic Taggants). Deux objectifs sont alors définis : la compréhension des mécanismes qui régissent la luminescence des polymères de coordination à base de terres rares et la recherche de nou-

veaux systèmes performants ; mais aussi le transfert de technologie et le développement des systèmes les plus prometteurs en vue de leur commercialisation. L'intégration d'Olnica, il y a quelques mois, au sein du Groupe SOCOMORE, leader dans le domaine de la chimie de spécialité pour l'industrie, donne à cette collaboration de longue date de nouvelles perspectives. C'est aujourd'hui face à la pénurie de matériaux et aux problèmes de recyclabilité que la société Olnica et les chercheurs tentent de répondre au travers de nouvelles applications. Regards croisés sur ces nouveaux enjeux.

### *Vos travaux de recherche évoluent aujourd'hui vers d'autres applications. Pouvez-vous nous en dire un peu plus ?*

Nos travaux de recherche portaient au départ sur la lutte contre la contrefaçon. Aujourd'hui, avec les problèmes de recyclabilité des matériaux, un autre marché se révèle prometteur : le marquage des matériaux. Le même type de marqueur peut en effet être utilisé puisque nos marqueurs ont la spécificité de pouvoir être intégrés dans le matériau brut, pas seulement en étiquette ou en peinture. Le marquage dans la masse, que nous sommes peu à proposer, prend ici tout son sens si l'on souhaite assurer leur recyclabilité.

### *Quels matériaux sont concernés ?*

Nos marqueurs brûlent et se décomposent à 500 C°. Il ne peut donc s'agir que de process industriels en dessous de cette température. Le plastique est par exem-

ple actuellement un immense enjeu tout comme le caoutchouc, le tissu ou encore le papier. Néanmoins, le créneau auquel nous croyons le plus est sans conteste le plastique. En effet, le mélange des différents plastiques entraîne une matière recyclée qui a perdu une part de ses propriétés et avec laquelle on réalise des produits à faible valeur ajoutée comme des sacs-poubelles, des tuyaux d'arrosage, du mobilier urbain... L'idée serait de réaliser du recyclage matière beaucoup plus fin afin d'avoir moins de produits à fabriquer.

### *Y a-t-il déjà des applications concrètes avec des entreprises ?*

Pour l'instant, nous ne sommes qu'au début de la prospection, prospection dont nous ne nous chargeons d'ailleurs pas. C'est en effet Olnica qui démarche les entreprises et revient ensuite vers nous avec les problématiques et les retours des

clients. Charge à nous de les transformer en une vraie problématique scientifique qu'il faut résoudre et à laquelle nous tâchons de répondre au mieux. C'est tout l'intérêt du laboratoire commun.

### *Vous avez l'ambition de monter une chaire sur ce sujet ?*

L'aspect sociétal de nos travaux est très important, c'est pourquoi nous envisageons de monter une chaire qui viendrait notamment convaincre le grand public de l'intérêt de la recyclabilité. Cette chaire transdisciplinaire pourrait faire appel à des spécialistes juridiques et des aspects sociétaux. Elle viendrait également expliquer aux étudiants l'intérêt de nos travaux pour la société. C'est le lien formation/recherche que nous tentons de développer via le laboratoire commun.

\*Equipe Chimie du Solide et Matériaux de l'Institut des Sciences Chimiques de Rennes (ISCR - UMR 6226 - CNRS, Université de Rennes 1, ENSCR, INSA Rennes)



## QUESTIONS à

Nicolas Kerbellec,  
chief operating officer chez Olnica

voir produire et pour pouvoir produire, il faut de la matière. Or, il est essentiel de garantir la qualité de ce que l'on produit. La vérité de demain, c'est de remplacer les matières utilisées par d'autres matières, moins impactantes pour l'environnement et davantage dégradables. Une matière qui sera peut-être réutilisée par un autre industriel qui va, lui, la valoriser.

### Comment Olnica s'intègre dans ce processus de recyclage ?

Un certain nombre d'industriels mettent en place des démarches RSE de recyclage privés afin de diminuer l'impact de leurs industries sur l'environnement. L'objectif est d'installer un processus de recyclage nécessitant de pouvoir marquer la matière au départ, la suivre, l'authen-

tifier et enfin garantir que c'est bien cette matière qui est recyclée. Les concentrations de traceurs y sont tellement faibles que cela n'est pas impactant.

### Le plastique est un secteur porteur ?

Il y a tellement de plastique que le sujet cristallise beaucoup autour de cette matière. L'amélioration de sa recyclabilité en vue de diminuer son impact environnemental et créer de nouvelles matières plastiques est aujourd'hui une nécessité. Quelle que soit la voie que prennent les plastiques (recyclage simple, recyclage de plastique innovant respectant mieux l'environnement, ou intégration dans un processus secondaire de recyclage), il faut pouvoir les différencier et les authentifier.

### Comment convaincre les industriels de la nécessité de réfléchir à cette question ?

Je suis en contact avec des syndicats professionnels, forces de diffusion auprès de leurs adhérents. C'est un des éléments clés. Mais il faut parfois du temps car si les syndicats sont des portes faciles à ouvrir, il est parfois plus complexe de faire bouger les industriels. Or, chacun peut, dans son domaine, son métier, créer un système permettant de mettre en place ce recyclage et diminuer son impact sur l'environnement. C'est tout l'enjeu de la traçabilité et de l'utilisation des traceurs. Et c'est nécessaire car il y a urgence.

*Vous travaillez avec ChemInTag sur la problématique du manque de matière première et la recyclabilité des matériaux.*

### Quelle est votre approche de ce sujet ?

Le recyclage est un domaine riche et vaste. Ce sera certainement l'un des sujets majeurs du salon mondial de la plasturgie à Düsseldorf en octobre auquel nous participons. En effet, les industriels manquent de matière première et il y a une énorme pression sur l'industrie car si l'on veut pérenniser l'emploi, il faut pou-

## À propos d'OLNICA

Expert de la traçabilité des produits de consommation, Olnica permet aux marques de garantir l'authenticité de leur produits et la transparence sur leur origine. Olnica propose des solutions technologiques uniques et innovantes capables de protéger la propriété des entreprises et des gouvernements, leurs marques, leurs produits et leurs chaînes d'approvisionnement, afin de lutter contre la contrefaçon, la fraude, le détournement de fonds et le vol. Traceur à code unique, fluorophores spécifiques, détecteurs connectés, cloud : Olnica fournit tous les systèmes d'authentification, visibles ou invisibles, du simple système de contrôle au traceur moléculaire, permettant d'apporter des preuves solides contre les contrefacteurs. En avril 2022, Olnica a rejoint le Groupe SOCOMORE, leader dans le domaine de la chimie de spécialité.

OLNICA

## en bref

### Une machine d'impression 3D métal

L'équipe Chimie-Métallurgie (C-Met) du laboratoire ISCR (UMR CNRS 6226 - CNRS, Université de Rennes 1, ENSCR, INSA Rennes) va être dotée d'une machine de fabrication additive métallique par fusion laser sur lit de poudres. Au travers de cette acquisition financée par une Acquisition Équipement Scientifique (AES) de Rennes Métropole, l'objectif est la fabrication additive d'alliages métalliques complexes.

### Les journées du Groupement De Recherche « Statistiques et Santé »

L'INSA Rennes accueille les 17 et 18 novembre les journées « Statistiques & Santé » 2022. Organisées conjointement entre le GDR « Statistiques et Santé », la Société française de biométrie et le groupe « Biopharmacie » de la Société française de statistiques, ces journées sont l'occasion d'échanges et de collaborations entre les nombreuses équipes de recherche travaillant autour de ces thèmes.

### Trois nouveaux professeurs émérites

L'INSA Rennes félicite ses trois nouveaux professeurs émérites : Bruno Araldi (IRISA), Mireille Ducassé (IRISA) et Fabienne Nouvel (IETR).

INSIDE LABS

INSIDE LABS

**INSIDE LABS**

RETROUVEZ DANS NOTRE PROCHAIN NUMÉRO  
UN DOSSIER THÉMATIQUE AUTOUR DE LA SANTÉ

INSIDE LABS

INSIDE LABS

INSIDE LABS

INSIDE LABS

INSIDE LABS