

Tuyère de moteur d'hélicoptère
en composite céramique.

LES NOUVEAUX MATÉRIAUX

Ces dernières années, les revues centraliennes ont fait paraître des dossiers sur le big data, la blockchain, la voiture autonome, la santé, la silver économie, l'énergie... autant de sujets d'actualité sous-tendus par le développement du numérique, des outils informatiques et de la vitesse de traitement des données. Mais aucun de ces domaines ne pourrait se développer sans les matériels, les outils et les machines qui leur sont dédiés et qui font appel aux nouveaux matériaux ou aux matériaux anciens qui connaissent un nouvel usage grâce à un changement de leur élaboration et de leurs caractéristiques physiques.

Il s'agit – entre autres – des terres rares indispensables à la fabrication des téléphones et ordinateurs, des nanomatériaux pour l'électronique, des céramiques pour le médical et l'aéronautique, des matériaux composites pour le transport aérien et l'aérospatial, des matériaux métalliques et alliages de nouvelle génération, plus résistants et plus légers, pour l'automobile, le ferroviaire et les avions. C'est ce que vous découvrirez dans les articles qui suivent. La recherche est intense dans tous ces domaines et sans doute n'est-on qu'aux prémices de nouvelles découvertes et de nouvelles applications.

Mais il faut prendre en compte le coût énergétique et environnemental pour parvenir à l'objet fini ainsi que la possibilité de le recycler en fin de vie. On sait désormais que le progrès doit être soutenable et l'économie circulaire. Et c'est alors que l'on voit des matériaux anciens se mettre au service de l'innovation durable.



Roland Marcoin (ECLi 72)
Rédacteur en chef de
L'Ingénieur, secrétaire de
Centrale Lille Alumni



Céline Jacquot,
rédactrice en chef adjointe
de la revue *Centraliens*

Sommaire

- | | | | |
|-------------|---|-------------|--|
| p 18 | Entretien avec Danièle Quantin (76), présidente de Materialia | p 30 | Les matériaux composites à fibres discontinues Joël Henry (ECLy 14) |
| p 20 | Le Davos des matériaux Victoire de Margerie | p 32 | Les matériaux à changement de phase pour isoler les bâtiments Yann Randrianarison (ECM 18) |
| p 22 | Les composites à matrice céramique Marc Montaudon (87) | p 33 | Les terres rares Ulysse Vassas (20) |
| p 24 | Nouveaux matériaux pour l'aéronautique: la traque aux kilos Thibaut Caritey (11) | p 34 | Les nanomatériaux: quelles applications et pour quand ? Alice Pazat (ECM 13) |
| p 27 | L'acier, un matériau toujours d'avenir Fanny Langevin (ECLi 89) | p 36 | Les matériaux anciens au service de l'innovation durable Philippe Bihoux (96) et Laurent Castaignède (93) |
| p 28 | De nouvelles matières premières pour l'impression 3D Guillaume de Calan (08) et Guillaume Bouchet Doumenq (08) | | |

Entretien avec Danièle Quantin (76) présidente de Materialia

Basé pour des raisons historiques en région Grand Est, Materialia est un pôle de compétitivité leader dans le domaine des matériaux et des procédés innovants, au service de la performance industrielle. Danièle Quantin (76), présidente du pôle, nous en présente les missions et le rôle de facilitateur entre les différentes parties prenantes de la filière.



Danièle Quantin (76)

Danièle a effectué toute sa carrière dans la sidérurgie, les procédés, produits et solutions clients. Elle a été responsable France et Espagne des centres de recherche d'ArcelorMittal, ainsi que DRH de la R&D du groupe. Présidente depuis fin 2017 du pôle de compétitivité Materialia, elle a également été nommée en juin dernier à la présidence de la SF2M (Société française de métallurgie et de matériaux).

Nous jouons également un rôle d'agitateur : pour stimuler l'innovation, la recherche et le développement collaboratif entre les entreprises, Materialia organise des animations (séminaires, conférences, ateliers) sur des thématiques techniques (multimatériaux, écoconception, fabrication additive...) ou plus transversales (financement des projets européens, créativité...).

Quels sont vos domaines stratégiques et vos marchés cibles ?

Materialia travaille sur trois domaines d'activité stratégique – les matériaux, les procédés et les solutions – et sur les thématiques transverses de la transformation numérique et de la transition écologique. Le pôle se concentre sur les marchés cibles du transport, de l'énergie, de l'industrie et de la santé, un secteur dans lequel la région Grand Est est en pointe avec BioValley France, pôle de compétitivité santé avec lequel nous menons des projets par exemple. Nos travaux portent sur les technologies analysées comme les plus prometteuses : métallurgie, fabrication additive, nouveaux procédés de fabrication propres et durables, recyclage des matériaux, développement durable,

composites, industrie du futur, robotique... Le pôle délivre un label aux projets de R&D collaboratifs – industrie-recherche – faisant intervenir au moins un acteur du périmètre du pôle sur les thématiques matériaux et procédés. Cela permet aux projets d'accéder à des financements spécifiques tout en leur apportant un gage de qualité.

Quelles sont les demandes des industriels en matière de nouveaux matériaux ?

Avant toute chose, quand on parle d'un nouveau matériau, il faut savoir à quel stade il en est : la recherche ou l'application. Il se passe beaucoup de temps avant qu'un matériau devienne utilisable et rentable. Récemment, nous avons travaillé sur la labellisation d'un système utilisant du graphène, un matériau dont on parle depuis quarante ans.

S'agissant des demandes des industriels, elles ne concernent pas les matériaux à proprement parler mais les solutions impliquant l'utilisation de nouveaux matériaux. Par exemple, comment intégrer des microcapteurs dans des matériaux pour en suivre l'endommagement ou la durée de vie ?

Mais actuellement le principal défi des industriels est de savoir comment optimiser les solutions au travers d'un choix de matériaux variés. C'est le cas des constructeurs automobiles ou du bâtiment. Se posent alors les questions de recyclabilité mais aussi de récupérabilité. Ce qui n'est pas la même chose. Une solution technique est composée d'un ensemble de matériaux qui, en fin de vie, doivent être identifiables en nature, facilement séparables et triables pour être ensuite réutilisés et recyclés.

Nous recevons de nombreuses demandes

Pouvez-vous nous présenter Materialia ?

Comme tout pôle de compétitivité, Materialia a pour mission d'aider les entreprises à industrialiser leurs innovations en facilitant les contacts avec les centres de recherches industriels et académiques, les PME, les centres techniques, voire les organismes de formation. Au sein de cet écosystème, il a donc un rôle à la fois d'animateur et de facilitateur. Nous identifions les bons projets, aidons au montage de leur financement, puis en suivons l'exécution avant d'en faire le bilan : valeur ajoutée, retour sur investissement...

très variées concernant la tribologie, les traitements des surfaces, par exemple pour conférer des propriétés antibactériennes, intégrer des capteurs filmogènes. Materalia travaille beaucoup sur les questions de fabrication additive: réaliser des mélanges multimatériaux – insertion par exemple de poudre céramique au milieu de poudre de plastique –, les associer dans le corps d'une pièce, par couches ou en accrochant des pièces de matériaux différents voire modifier la surface. Dans ce domaine, Materalia a mis en place de nombreux projets transversaux. Le dernier en date, un projet européen « IAMRRI » démarré début 2019, implique quatorze pays. Il ne s'agit pas tant d'imaginer de nouvelles techniques de fabrication additive que de réfléchir à la façon dont cela va révolutionner la supply chain et impacter l'environnement.

Quels sont les défis à venir de la filière ?

Le premier défi concerne les coûts d'investissement, de fabrication ou de mise en œuvre. Le deuxième porte sur la performance et la durabilité du matériau dans la solution finale. On parle de plus en plus de matériaux intelligents, capables de détecter des anomalies, de collecter des données permettant d'anticiper la rupture,

voire de modifier leurs propriétés physiques – forme, connectivité, couleur, etc. – en réponse à des stimuli. Le dernier point concerne les questions de recyclage et de récupérabilité, un point essentiel compte tenu du coût et de la rareté des matières premières.

Preuve en est avec ce dossier, les jeunes ingénieurs s'intéressent beaucoup à ce domaine. Est-ce un signe positif pour vous ?

Oui, d'autant que les cours sur les matériaux ont souvent disparu des écoles d'ingénieurs généralistes. C'est regrettable dans un pays qui appelle à une réindustrialisation de son territoire. L'innovation, c'est bien, mais il faut des gens capables de travailler sur les matériaux et procédés pour passer de l'idée au concret. C'est un prérequis, sans quoi il est impossible de savoir si un projet est réalisable. Par « réalisable », j'entends aussi « écoconçu », car on ne peut plus travailler sans intégrer cette dimension: le recyclage en fin de vie. Il faut pouvoir couvrir la totalité de la filière, du berceau à la tombe, avant la reprise d'un nouveau cycle. ■

Propos recueillis par Céline Jacquot,
rédactrice en chef adjointe

→ Les chiffres-clés de Materalia

- 2005 : année de création
- 310 membres
- 3 collèges : les industriels (entreprises et fédérations d'entreprises), les centres scientifiques (laboratoires, centres techniques, universités et grandes écoles), les collectivités territoriales (communautés d'agglomération, métropoles)
- 4 domaines d'activité stratégiques : matériaux, procédés, solutions, thématiques transverses (transitions numérique et écologique)
- 515 projets labellisés
- 200 projets financés

→ Exemples de projets multisectoriels soutenus par Materalia



Prototype de ruban adhésif Rubatox.

RUBATOX, UN RUBAN ADHÉSIF INNOVANT POUR PROTÉGER LES SATELLITES

Fabriquer un ruban adhésif capable de prévenir les effets d'érosion subis par les satellites dans un environnement extrême tel que l'espace. C'est l'enjeu de ce projet lancé par Axon Cable, société champenoise leader mondial dans le domaine des connexions et liaisons sur mesure. Materalia a aidé au montage du projet pour trouver les partenaires français et étrangers. Après plus de trois ans de tests, la société a mis au point un film isolant de faible densité entraînant des niveaux d'érosion 100 fois inférieurs au témoin polyimide et plus de 10 fois inférieurs au FEP utilisé dans l'industrie spatiale!

RHARE: REVÊTEMENTS HYBRIDES ALTERNATIFS AUX RÉSINES FLUORÉES

C'est le nom du projet porté par l'entreprise Fluorotechnique, spécialiste des traitements de surfaces haute performance, et le laboratoire Chimie de la matière condensée de Paris. Son objectif est de trouver une alternative écoresponsable aux résines fluorées, des revêtements utilisés partout: aéronautique, nucléaire, armement, chimie, automobile, aérospatial... Grâce au soutien de Materalia, le projet a été sélectionné par l'Agence nationale de la recherche. Résultats : un LabCom financé sur trois ans à compter du 1^{er} janvier 2018, et une première avancée, la création de revêtements innovants sans microplastique.

R2I2, IMAGINER LA ROTULE AUTOMOBILE DE DEMAIN

La société VT2i, équipementier automobile spécialiste des fonctions de liaison au sol, et le Laboratoire d'étude des microstructures et de mécanique des matériaux (LEM3) ont initié dès 2015 un partenariat pour concevoir les rotules automobiles du futur. Grâce à ce projet, VT2i développe des éléments de pointe bénéficiant d'un haut niveau de performance et de fiabilité tout en répondant aux contraintes du marché. Cette étude permet également de tester l'intégration de nouveaux matériaux, émergents ou déjà utilisés dans d'autres domaines de l'automobile, permettant d'améliorer les tenues des rotules face à l'environnement routier.

Le Davos des matériaux

Lancé en 2015 par Victoire de Margerie et Philippe Varin, le World Materials Forum prend place chaque année à Nancy, réunissant des patrons d'entreprises de toutes tailles venant du monde entier pour débattre avec les plus grands représentants académiques, politiques et ONG. Victoire de Margerie est également présidente de la start-up de deep-tech Rondol Industrie et administratrice des groupes Arkema, Babcock et Eurazeo. Elle nous explique les tenants et aboutissants de cet événement devenu une référence dans le monde des matériaux et du développement durable.



D'où est venue l'idée du WMF ?

De plusieurs discussions avec Philippe Varin – ancien président du directoire de PSA Peugeot Citroën, aujourd'hui président de France Industrie et du conseil d'administration d'Orano –, durant lesquelles nous nous inquiétions de la polarisation des positions vis-à-vis des matériaux. D'un côté on trouvait les partisans d'un retour en arrière général, considérant par exemple qu'il faut bannir tous les emballages plastique, malgré le rôle majeur qu'ils jouent dans la lutte contre la malnutrition. Et de l'autre ceux pour qui le rejet de montagnes d'emballages dans la mer ne pose aucun problème. Nous étions – et sommes toujours – pour notre part persuadés qu'il est possible de créer des solutions gagnant-gagnant, qui permettent au maximum de gens d'accéder aux avantages de la classe moyenne tout

en étant respectueux de l'environnement. Nous sommes partis du principe que c'était possible, et c'est ainsi que nous avons créé le forum. Et André Rossinot nous a proposé le site de Nancy, qui s'est révélé idéal.

À quel public vous adressez-vous ?

Au départ, nous avons réuni autour de la table une dizaine de grands patrons mondiaux pour réfléchir au problème, définir les priorités... Aujourd'hui, le WMF réunit des industriels producteurs de matériaux, des utilisateurs, des start-up, des organisations non gouvernementales, des politiques, des centres de recherche... Avec une ambition : utiliser les matériaux de manière plus intelligente, en moindre quantité et plus longtemps – *smarter, less and longer!*

Quelles réalisations le forum a-t-il à son actif ?

Dès le départ nous avons voulu lancer des actions phares qui permettraient d'obtenir des résultats rapides. Nous avons ainsi créé en 2016 un indice de criticité des matériaux ou « *criticality assessment* ». C'est un indice fondé sur plusieurs critères, technologiques, économiques, géopolitiques... définissant pour chaque élément de la table périodique un niveau de criticité. À titre d'exemple, le plus haut niveau est actuellement atteint par le cobalt : c'est un matériau crucial pour la sécurité des batteries électriques, il ne reste que 70 ans de réserve au mieux, et au moins 60 % des ressources minières sont en République démocratique du Congo, un

pays à la stabilité non garantie. Cet indice est établi tous les ans par le WMF, le Bureau de recherches géologiques et minières, CRU et McKinsey, et il est devenu une véritable référence dans l'industrie.

Nos séances plénières thématiques – recyclage des plastiques, gestion de l'eau, batteries électriques, etc. – aboutissent toujours à des propositions d'action ou à des engagements concrets. En 2019, les grands groupes – Arkema, BASF, BMW, Faurecia, JX Nippon Mining & Metals, Renault, Solvay, Suez, Umicore... –, startups et académiques présents se sont ainsi engagés à :

- réduire de deux tiers les pertes d'eau au niveau mondial en réduisant de 50 % les coûts d'énergie associés d'ici à 2030 ;
- diviser par deux le temps de charge jusqu'à 80 % des nouvelles batteries pour véhicules électriques d'ici à 2030 – de 30 à 15 minutes ;
- augmenter de 40 % la densité énergétique des nouvelles batteries au niveau cellule – de 700 à 1 000 Wh/L ;
- collecter et recycler ou réutiliser 80 % des batteries de véhicules électriques et de téléphones portables d'ici à 2035.

Depuis 2017, vous avez mis l'accent sur les indicateurs clés de performance, ou KPI...

Nous avons tous les ans une séance plénière sur le sujet qui permet à de grands acteurs industriels de venir présenter les critères qu'ils suivent et les actions qu'ils ont mises en place pour améliorer la performance : Airbus avec le Buy to Fly ou l'optimisation du temps d'utilisation des avions, PSA avec l'incorporation de matériaux recyclés dans la fabrication de nouvelles voitures, Mitsubishi avec moitié moins de consommation d'énergie et de déchets de production grâce à la coulée continue de l'acier.

Il y a également un concours annuel de start-up.

Dès l'origine nous envisagions le forum comme un nouveau « Davos » – dans sa configuration du début, non commerciale, en petit comité et avec un focus sur l'action –, et nous avons donc invité surtout des grands patrons. Or ceux-ci nous ont vanté les mérites de leur R&D, mais en admettant leur manque de réactivité. Nous



Le forum a lieu tous les ans à Nancy, et réunit tous les acteurs du monde des matériaux, producteurs, utilisateurs, chercheurs...

avons donc lancé ce concours de start-up, qui ont plus de flexibilité et peuvent disposer des solutions rapides que les grands comptes recherchent. On en présélectionne en général une cinquantaine, du monde entier, et une quinzaine sont nominées au concours et invitées à tenir un stand pour se présenter aux grands patrons présents lors de l'événement de juin. Le vainqueur emporte un prix de 50 000 euros et une étude de marché. J'appelle d'ailleurs les startups centraliens à candidater, ils sont toujours les bienvenus. Nous avons également développé une appli qui met en relation les CEO de start-up et de grandes entreprises, afin de fluidifier les relations.

Comment s'annonce la prochaine édition ?

Le thème sera « *sound and fast* » – sûr et rapide – et les partenaires et intervenants ont déjà répondu à 80 %. Le programme sera finalisé en décembre, ce qui est très tôt pour ce type d'événement. Puis nous réunirons au téléphone tous les intervenants, dès janvier, pour préparer les tables rondes de juin. Au début, comme d'habitude, personne ne sera d'accord, mais à force de discussions, nous finirons par définir et présenter des solutions « gagnant-gagnant ».

Peut-on identifier des tendances dans le domaine des nouveaux matériaux ces dernières années ?

Difficile de répondre de manière exhaustive... je citerai le graphène, dont la liste d'applications n'en finit plus d'être mise à jour tant elle s'étend à l'infini, que ce soit en tant que matériau pur ou qu'additif. Et les composites assemblant plusieurs polymères comme les vitrimères, qui permettent de réaliser des matériaux aux caractéristiques physiques inédites. Et l'on peut aussi s'attendre à des percées significatives dans les nouveaux procédés permettant de fabriquer des matériaux classiques : électrolyse de l'aluminium totalement décarbonée, transformation à l'hydrogène du minerai de fer (- 80 % émissions de CO₂), électronique de spin qui permet de diviser par dix la consommation d'électricité pour le stockage des données par exemple. ■

Propos recueillis par Julien Meyrat

1. Le site du WMF regroupe tous les comptes rendus des séances : <https://worldmaterialsforum.com>

→ Le forum en quelques chiffres

Depuis 2015, 5 éditions et 1 300 participants venus de 30 pays :

- 80 patrons de multinationales et 280 membres de comités exécutifs
- 200 patrons de start-up
- 200 institutions publiques
- 400 chercheurs et experts

→ Quelques start-up nominées au WMF

- **Cuberg** (2018, États-Unis) : électrolyte liquide ininflammable pour batteries.
- **Imagine** (2018, Australie) : formulation à base de graphène pour transformer les textiles en capteurs intelligents afin d'identifier les fuites lors de l'installation de barrages.
- **Mallinda** (2018, États-Unis) : composites entièrement recyclables à base de vitrimères, permettant des cycles de fabrication d'une minute ou moins.
- **Rein4Ced** (2018, Belgique) : fibres de carbone et d'acier pour un nouveau composite alliant la légèreté du carbone et la résistance de l'acier.
- **Aeronautical Services** (2019, Italie) : matériaux nanostructurés pour performances extrêmes dans le domaine du blindage haute température et anti-incendie, l'absorption d'ondes électromagnétiques et l'isolation acoustique.
- **Aligned Carbon** (2019, États-Unis) : nanotubes de carbone alignés permettant d'intégrer les transistors dans le procédé de fabrication des semi-conducteurs.
- **Demeta** (2019, France) : nouveau polymère à partir d'un dérivé secondaire sous-exploité de l'industrie pétrolière (dicyclopentadiène) avec une faible empreinte carbone et énergie et des performances supérieures à l'époxy, le polyester ou le polyuréthane.
- **Membrasenz** (2019, Allemagne) : nouveau matériau composite utilisé pour les membranes de séparation gazeuses, générant 30 % de réduction de coût dans la production d'hydrogène.
- **Nawa** (2019, France) : nouveau matériau d'électrode pour une batterie emmagasinant l'électricité plus rapidement.

Les composites à matrice céramique

Les céramiques sont plus légères et plus résistantes en température que les meilleurs alliages métalliques. Une élaboration sous forme de matériau composite permet d'éliminer leur fragilité naturelle. De tels matériaux sont désormais largement utilisés sur les lanceurs spatiaux et les freins d'avions, et sont en passe de devenir le standard pour réduire la consommation des moteurs aéronautiques. Explications avec Marc Montaudon (87), directeur général de Safran Ceramics.

Les composites céramiques, ou CMC, constituent une famille de matériaux récente, développée à partir des années 1970. C'est dans l'industrie aéronautique et spatiale que cette révolution s'est préparée: l'impérieuse nécessité d'alléger les lanceurs, missiles et aéronefs a incité les ingénieurs à rechercher des matériaux moins lourds que les alliages métalliques et capables de résister à des températures très élevées, qui s'étalent entre 1 000 et 3 000 °C selon l'application.

Quoi de plus naturel alors que de se tourner vers les carbones ou les céramiques, légers et tout à fait réfractaires. Hélas, leur limite apparaît vite: ces matériaux sont fragiles, les chocs mécaniques ou thermiques provoquent des ruptures rapides.

D'où l'idée d'armer ces matières avec des renforts fibreux pour contrecarrer cette fragilité naturelle, à la manière du béton armé ou plus généralement d'un matériau composite. Ces renforts sont eux-mêmes en carbone et en céramique. Une gestion fine de leur liaison avec la matrice permet aux matériaux composites ainsi obtenus d'être résiliants, robustes et plastiques, bien que leur nature chimique avoisine celle... d'une mine de crayon en graphite ou qu'une thière en porcelaine!

Une gamme en évolution

Ces matériaux composites ont évolué tout au long de ces dernières décennies. Il y a eu tout d'abord le carbone-carbone.

Apparus dans les années 1960 et développés en France par Safran, ces matériaux composites à renforts et matrice de carbone sont désormais largement utilisés en série, pour des pièces de tuyères de moteurs spatiaux, des disques de frein d'avions (leur principale application) ou sous forme d'outillages pour la métallurgie, la chimie, etc. Ils ont permis des gains de masse d'un facteur 4 à 10.

Il faudra attendre près de vingt ans avant l'apparition du composite carbone-céramique. Le premier composite à matrice céramique au monde a en effet été réalisé en 1977 dans un laboratoire de l'université de Bordeaux, dans le cadre d'une collaboration avec Safran. Les céramiques pertinentes peuvent être le carbure de silicium ou l'alumine. Plusieurs applications industrielles ont vu le jour pour ce matériau moins sensible à l'oxydation que le carbone: tuyère du chasseur Rafale (Safran), pièces de moteurs de lanceurs spatiaux ou boucliers thermiques pour véhicules de rentrée atmosphérique (ArianeGroup), freins d'hélicoptères ou de véhicules terrestres (Safran, Brembo SGL, etc.)...

Nés à l'orée du siècle avec la mise au point et l'industrialisation de filaments en céramique (carbure de silicium ou alumine), les composites céramique-céramique sont surtout développés par les motoristes aéronautiques pour contribuer à la réduction de la consommation du trafic aérien. Leurs constituants sont peu sensibles à l'oxydation et à la corrosion, et offrent donc des durées de vie très longues. Le moteur LEAP, conçu



© Christophe Reprimel / Herakles



© Laurent Pascal / Capa / Safran

Marc Montaudon (87)

Après avoir exercé plusieurs fonctions au sein du groupe

Safran depuis 1988, Marc dirige la société Safran Ceramics, plateforme de recherche et technologie du groupe dédiée aux matériaux composites haute température et aux céramiques avancées. Il est en outre vice-président du Pôle européen de la céramique.

et réalisé par General Electric et Safran pour propulser les Airbus 320neo et Boeing 737 Max, bénéficie ainsi d'une pièce en composite céramique-céramique, une première mondiale.

Les procédés d'élaboration

La première étape consiste à confectionner une préforme fibreuse, dont la géométrie



Tuyère de moteur d'hélicoptère en composite céramique.

approche celle de la pièce visée et au sein de laquelle les renforts sont orientés dans les directions voulues. Plusieurs procédés textiles sont envisageables : drapage, tressage, aiguilletage, tissage – éventuellement tridimensionnel.

Reste à déposer la matrice dans les interstices de cette préforme. À la différence d'un composite classique, où la matrice est souvent une résine polymérisée, le carbone n'existe pas sous forme liquide, et les températures de fusion des céramiques sont bien trop élevées : il faut donc confectionner la matrice par réaction chimique *in situ*. Deux grandes familles de technologies ont été développées et sont mises en œuvre industriellement. D'une part l'infiltration en phase vapeur (CVI), où la réaction de gaz dépose progressivement la matrice autour des renforts fibreux. D'autre part, la siliciuration en phase liquide, où du silicium fondu pénètre par capillarité dans une préforme préalablement chargée en poudre de carbone, pour réagir avec celle-ci et

produire du carbure de silicium. Les autres étapes de fabrication ont bien entendu dû être adaptées : procédés d'usinage (le carbure de silicium est plus dur que la plupart des outils de coupe), stratégie et procédés de contrôle non destructifs (tomographie, thermographie infrarouge), etc.

Enjeu pour l'aéronautique

L'aéronautique est aujourd'hui le marché principal qui tire le développement des composites céramique-céramique.

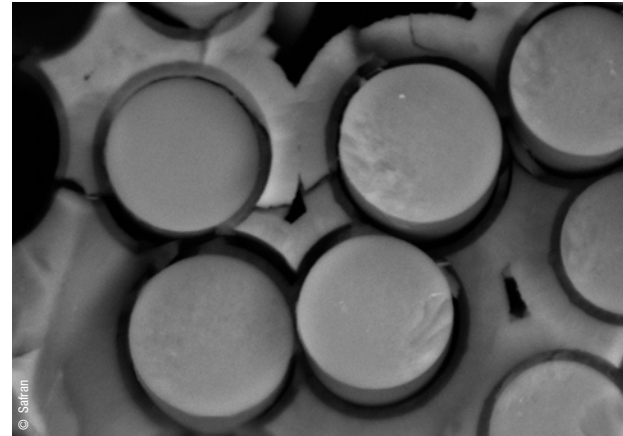
Les alliages métalliques utilisés pour les parties internes des turboréacteurs ont une température maximale admissible bien inférieure aux gaz qui les baignent (jusqu'à 1 600 °C). Il est donc indispensable de refroidir ces pièces, en faisant circuler à l'intérieur des débits contrôlés de gaz frais, comprimés : ces débits de refroidissement sont autant de pertes d'énergie, qui ne participe pas à la propulsion. Disposer de matériaux plus

réfractaires, comme les composites céramique-céramique, permet de les réduire voire de les éliminer et ainsi de réduire significativement la consommation de kérosène des avions. L'enjeu, évalué par la NASA, est un gain d'au moins 5 % en consommation spécifique et une réduction de 30 % des émissions d'oxydes d'azote.

Bénéfice supplémentaire, un gain de masse d'un facteur 2 à 3 est systématiquement obtenu, compte tenu de la densité plus faible des céramiques.

Enjeu pour le nucléaire

Les composites céramiques à base de carbure de silicium possèdent des propriétés d'insensibilité à l'irradiation qui les qualifient pour la réalisation de gaines de combustible dans les centrales nucléaires. Les études conduites après la défaillance de Fukushima soulignent l'aptitude du matériau à supporter des élévations de température accidentelles pendant des durées significatives, qui auraient permis



Microscopie d'un CMC, qui montre la structure du matériau grossi.



Chargement d'un four de CVI.

aux gaines de conserver leur rôle de confinement de l'uranium.

Autres applications

Les débouchés possibles sont multiples, et reposent généralement sur plusieurs facteurs. Les propriétés de ces matériaux sont insensibles en température : ils ne fondent pas et ne fluents pas. Leur masse spécifique est faible, ils sont de plus résilients et capables de supporter des chocs thermiques ou mécaniques sans rupture fragile. Enfin ils disposent de certaines caractéristiques particulières, comme une faible réactivité en présence de nombreuses espèces chimiques, des coefficients de frottement réglables dans une large plage, des coefficients d'expansion thermique très faibles ou une conductivité paramétrable.

Aussi commencent-ils à être utilisés pour des applications très précises dans des domaines aussi variés que la sidérurgie, la trempe thermique, la chimie corrosive, les structures de satellites ou d'instruments d'optique. ■

Nouveaux matériaux pour l'aéronautique : la traque aux kilos !



Hélicoptère Boeing Apache AH64 et le rotor de queue.

L'industrie aéronautique a toujours été en quête de matériaux innovants afin de réduire la masse des machines volantes. Sachant que le carburant représente environ 30 % des coûts d'exploitation d'une compagnie aérienne, on comprend pourquoi Airbus et Boeing ont un intérêt économique évident à construire un aéronef le moins gourmand et le plus léger possible. Le point avec Thibaut Caritey (11), ingénieur grands comptes dans l'aéronautique.

Parmi les matériaux métalliques les plus utilisés en aéronautique, on trouve les alliages d'aluminium. Avec une densité de $2,7 \text{ g/cm}^3$, c'est l'un des alliages métalliques de structure les plus légers qui soient. À titre de comparaison, la densité du titane est de $4,5$ et celle de l'acier de 8 g/cm^3 . Toutefois, il existe des matériaux moins connus du grand public et pourtant encore plus légers : les alliages de magnésium. Avec une densité de $1,8 \text{ g/cm}^3$, ils offrent des perspectives extrêmement intéressantes pour la conception de nouveaux programmes aéronautiques. De nombreux alliages de magnésium ont été développés depuis les années 1930 mais n'ont jamais vraiment réussi à se démocratiser. Après un âge d'or dans les années 1950, ils ont décliné. Les propriétés mécaniques étaient médiocres, avec notamment de faibles performances lors des tests de fluage. De plus la principale difficulté, qui semblait alors insurmontable, était d'élaborer des alliages résistants à la corrosion et pouvant passer les tests au feu des autorités de sûreté aérienne. En effet, le magnésium pur sous forme de poudre

s'enflamme violemment lors d'une réaction d'oxydation avec l'oxygène de l'air. Cette réaction exothermique produit une flamme vive qu'on retrouve dans les feux d'artifice ou dans les leurres d'autodéfense des avions militaires pour imiter la signature thermique des moteurs et tromper le tir adverse.

Même si c'est une autre paire de manches que d'enflammer un solide bloc d'alliage de magnésium, les accidents en lien avec ce dernier, bien que rarissimes, marquent les esprits. L'industrie aéronautique se souvient par exemple d'un départ de feu en 1967, sur le SR-71 Blackbird, l'avion de chasse le plus rapide du monde. À la suite de l'explosion des pneus du train d'atterrissage, les roues en magnésium, saturées de chaleur, se sont enflammées et ont propagé les flammes sur le reste de la carlingue.

De nouveaux alliages, plus résistants

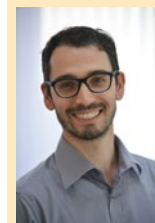
Ces quinze dernières années, de nombreux travaux de recherche ont permis la genèse de nouveaux alliages de magnésium à

hautes performances et compatibles avec ces exigences aéronautiques. Aujourd'hui, ils pointent le bout de leur nez et ouvrent de nouvelles perspectives. En particulier, certains alliages dopés aux terres rares (néodyme ou yttrium, par exemple) présentent une résistance à la corrosion dix fois supérieure aux anciennes générations. De plus, lors des tests au feu, ces terres rares semblent créer une couche d'oxyde protectrice qui réduit voire empêche la propagation des flammes. Ces alliages ont en outre l'avantage d'avoir une excellente tenue mécanique à des températures jusqu'à 200 °C alors que même les alliages d'aluminium s'affaiblissent progressivement au-delà de 150 °C .

Ils permettent désormais de produire des pièces aéronautiques complexes en fonderie au sable ou en usinant un bloc de métal à l'aide de machines à commande numérique à cinq axes. Cela permet un gain de masse significatif, de l'ordre de 20 à 30 % comparé aux alliages d'aluminium en conservant des procédés de fabrication traditionnels.

Les principales applications aujourd'hui sont des pièces de moteurs d'avion à réaction ou à pistons ainsi que des carters de boîtes de transmission d'hélicoptère.

Demain, de nombreuses pièces en alliages de magnésium équiperont les futurs aéronefs hybrides ou électriques et permettront l'essor de ces nouvelles technologies. ■



Thibaut Caritey (11)

Originaire d'un petit village d'irréductibles Franc-Comtois, Thibaut a commencé sa carrière

sur le site d'Airbus Helicopter pour ensuite s'expatrier quatre ans à Singapour au sein de Naval Group. Aujourd'hui basé à Toulouse, il conseille les bureaux d'études aéronautiques dans leur choix de matériaux.

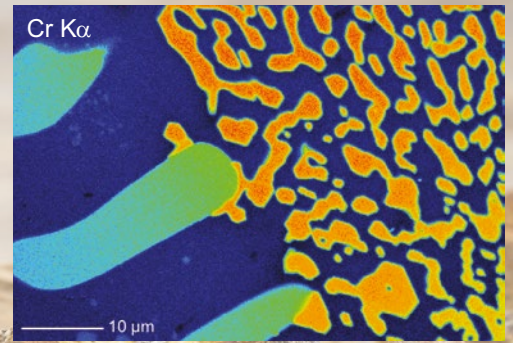
Leader Mondial en Micro & NanoAnalyse

EPMA



SX Five ^{tactis}

- Microsonde de Castaing: cartographie X et analyse quantitative d'éléments trace.
- Nombreuses applications en sciences des matériaux, métallurgie, géologie et géochronologie.



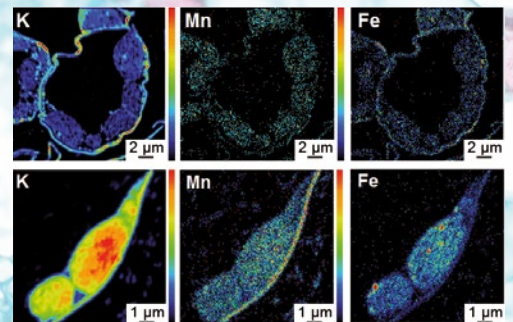
Cartographie élémentaire dans un alliage ternaire (VCoFe).

SIMS



NanoSIMS 50L

- Spectromètre d'émission d'ions secondaires avec résolution latérale jusqu'à 50nm.
- Analyse élémentaire & isotopique avec multicollecion pour 5 ou 7 masses.
- Applications en sciences des matériaux, géologie, astrophysique, microbiologie et biologie cellulaire.



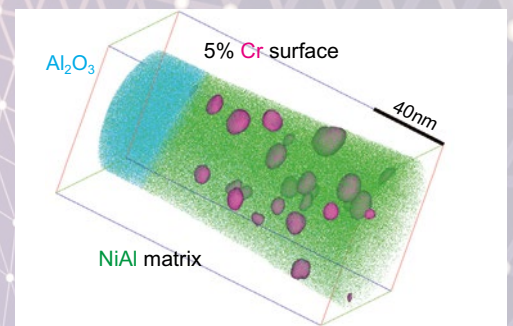
Localisation d'éléments-traces métalliques dans les plantes. En haut: cellules complètes. En bas, chloroplaste d'*Arabidopsis Thaliana*. Crédit: Dirk Schaumlöffel, IPREM, Pau, France.

APT



LEAP[®] 5000

- Sonde Tomographique Atomique: analyse élémentaire et imagerie 3D à l'échelle atomique.
- Applications en science des matériaux, métallurgie, nanotechnologie, semiconducteurs.



Etude des interfaces enterrées dans un alliage de construction. Crédit: Pr. Krystyna Stiller, Chalmers University, Sweden.

Pionnier de l'instrumentation SIMS, EPMA et APT,
à la pointe de la technologie depuis 1929.

Tous nos instruments sur www.cameca.com

En 2019, j'adhère à l'Association

AU MENU CETTE ANNÉE

Réseau

- Get Together
- E-Get Together
- Afterwork
- Les groupements
- Ta promotion





Information

- People of Centrale
- Le buZZ de la semaine
- Que faire cette semaine ?
- La Newsletter
- La revue
- Le site

Cycles

- Europe
- Face à Face
- Gestion-Finance
- Leadership
- Ma Com'
- Manager 4.0
- Osez l'international
- Remue-Méninges
- Théo & Sophie

Réseaux sociaux

-  Association des Centraliens
-  @assoccentraliens
-  AIESEC Association des Centraliens
-  assoccentraliens
-  Association des Centraliens
-  AssoCentraliens



Pack carrières

- Junior
- Tout nouveau manager
- Envie de changer de job
- En recherche active
- Devenir entrepreneur



BULLETIN D'ADHESION 2019



OUI, j'adhère à l'Association des Centraliens pour un **montant de 180 €**.

Je préfère devenir membre «premium» pour un **montant de 360 €** et je recevrai alors gratuitement la revue Centraliens ainsi qu'un cadeau membre «premium».

OUI, je m'abonne à la revue **Centraliens** et recevrai 6 numéros dans l'année.

40 € membres

54 € non-membres

Montant total : €

À découper et à nous retourner accompagné du règlement à :
Association des Centraliens - 8 rue Jean Goujon - 75008 Paris

Mes coordonnées :

M Mme - Nom : _____

Prénom : _____ Promotion : _____

Adresse : _____

Code Postal : _____ Ville : _____

E-mail : _____

Tél. : _____

Je règle par :

Chèque bancaire à l'ordre de l'Association des Centraliens

Je préfère adhérer à l'Association des Centraliens et/ou m'abonner à la revue via le formulaire en ligne : www.centraliens.net

L'acier, un matériau toujours d'avenir



**Fanny Langevin
(ECLi 89)**

Fanny a fait l'ensemble de sa carrière chez ArcelorMittal. Après une quinzaine

d'années en usine à différents postes de production à Montataire, dans l'Oise, elle intègre les équipes européennes de R&D dédiées aux composites puis aux aciers prélaqués. En 2010, elle rejoint l'équipe commerciale de l'agence de vente française dédiée aux clients industriels pour conseiller ces derniers sous l'angle technique.



Production de tôle en acier prélaqué.

L'acier traverse le temps en regardant vers l'avenir. Recyclable à l'infini, il dispose de propriétés qui nous apportent au quotidien allègement, résistance et durabilité. Nombreux sont les exemples qui montrent comment l'acier continue à se transformer pour participer à notre quotidien. Fanny Langevin (ECLi 89), responsable technique en clientèle pour ArcelorMittal Europe, nous en donne quelques-uns.

Un des matériaux anciens les plus indémodables reste et restera sans doute l'acier, éternellement recyclable, léger, résistant et durable. Dans la construction, les poutrelles Jumbo, dont la section peut aller jusqu'à 140 mm d'épaisseur, sont des prouesses technologiques qui poussent les architectes à rêver d'immeubles de plus en plus près des nuages : du Shanghai World Financial Center (492 mètres) au Burj Khalifa à Dubaï (828 mètres) en passant par le One World Trade Center de New York (526 mètres). Les compositions et formes de ces poutres permettent des réductions de poids des structures de l'ordre de 24 %.

Les revêtements métalliques à base de zinc et de magnésium augmentent les performances anticorrosion des éléments internes aux bâtiments (gaines d'aération, faux-plafonds, supports de cloison) tout

en réduisant l'épaisseur du revêtement. Bien sûr l'enveloppe de nos bâtiments n'est pas en reste avec des aciers revêtus pour la toiture ou les façades, permettant des couleurs chatoyantes, versatiles ou même des peintures entièrement élaborées à base de plantes. D'autres produits à surface fonctionnalisées les rendent antitaches, prêts à recevoir des traitements complémentaires comme l'émaillage...

Un matériau incontournable

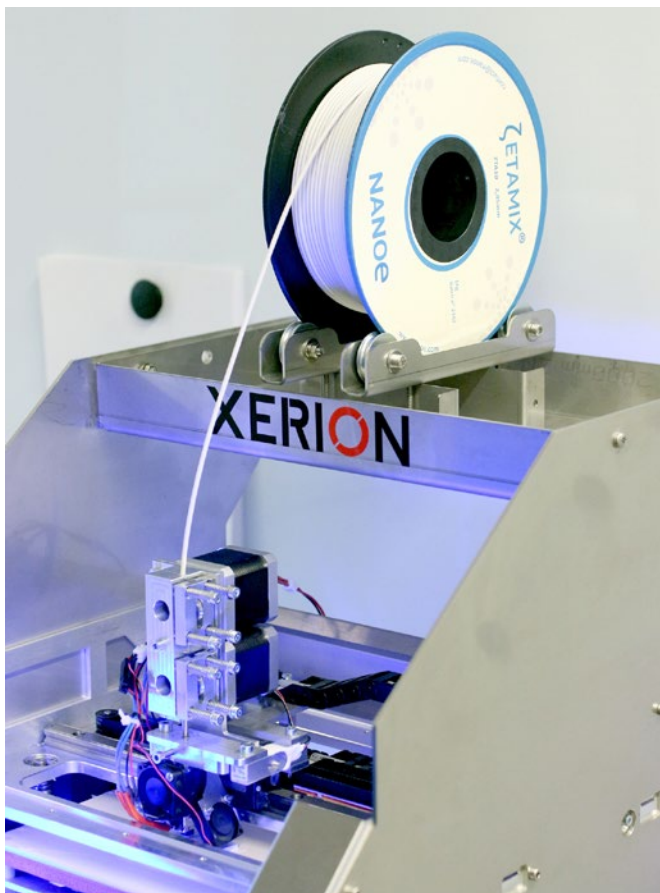
Le secteur automobile continue l'allègement de ses véhicules pour atteindre les engagements de réduction des émissions de CO₂. L'acier y participe par de nouvelles nuances mais aussi par des process en évolution tels que l'emboutissage à chaud et les flancs raboutés. Ces flancs à épaisseurs et nuances variables seront ensuite emboutis, mettant la « bonne »

matière seulement là où c'est nécessaire. Dans l'emballage, les canettes, boîtes de conserve et autres contenants métalliques sont aussi des condensés de nouveautés. Les aciers à haute résistance et très faible épaisseur (0,13 à 0,10 mm) renforcent les fonds à ouverture rapide. Les revêtements se sont bien sûr adaptés aux réglementations en s'affranchissant du chrome VI et du bisphénol A.

Enfin les énergies renouvelables ne sont pas en reste, des panneaux solaires directement intégrés à la toiture jusqu'aux éoliennes. Ces dernières consomment quelques milliers de tonnes d'acier par unité au niveau des fondations (dans une alternative possible au béton), mais aussi pour la pièce de transition, la tour tubulaire ou la nacelle. L'acier d'hier n'est pas celui de demain mais il est toujours au service de tous. Il est produit en France à hauteur de 1,3 million de tonnes par an, soit 40 kg par seconde. ■

De nouvelles matières premières

Si l'impression 3D métal et céramique connaît un fort développement avec 30 % de croissance annuelle, l'industrie peine encore à l'adopter. En cause, notamment, des coûts d'investissement importants et un design des pièces mal adapté à cette technologie. Pour répondre aux besoins de ce marché, Guillaume de Calan (08) et Guillaume Bouchet Doumenq (08), cofondateurs de Nanoe, ont développé des solutions d'impression 3D adaptées aux contraintes des industriels.



Les filaments céramique développés par Nanoe pour l'impression 3D.

Le marché de l'impression 3D métal et céramique est en pleine expansion, avec un volume qui devrait atteindre les 3 milliards de dollars en 2025 et une croissance de plus de 30 % par an. L'adoption de cette technologie dans l'industrie connaît néanmoins de nombreux freins : investissement important, coût des pièces plus élevé que par les procédés traditionnels, design des pièces mal adapté à l'impression 3D, qualification des produits, notamment pour le médical ou l'aéronautique...

Un point en particulier bloque l'adoption de ces technologies par les PME et ETI :

le niveau d'investissement élevé nécessaire pour se lancer dans l'impression 3D, couplé à un manque d'application à court terme. En effet, à l'inverse des imprimantes 3D plastique, un système complet d'impression 3D métal ou céramique coûte généralement entre 300 000 et 1 million d'euros.

Des filaments pour l'impression 3D

C'est pour répondre à ce problème que Nanoe a lancé en 2018 une nouvelle technologie d'impression 3D céramique et métal à partir d'une ligne de filaments constitués de poudres liées par un liant thermoplastique (photo ci-contre). Ces filaments permettent d'imprimer n'importe quelle pièce d'après un fichier CAO. Cette technologie est la méthode d'impression 3D la plus abordable et la plus

développée dans le monde, avec plus de 1 million d'imprimantes déjà installées et plus de 400 000 nouvelles installations par an depuis 2018. Les filaments sont conçus pour être compatibles avec toutes ces imprimantes, avec peu ou pas de modifications nécessaires.

L'impression 3D de matières premières techniques représente un potentiel énorme. La gamme de filaments développée par Nanoe a notamment été pensée pour des applications de prototypage et de fabrication d'outils sur mesure. Cette nouvelle technologie pour l'impression 3D métal et céramique

possède plusieurs avantages qui la rendent complémentaire à d'autres procédés d'impression 3D : coût d'investissement très faible, large choix de matériaux, possibilité d'imprimer des pièces creuses à forte complexité et sans supports et des multimatériaux, et rapidité du procédé.

Un procédé en trois étapes

Similaire aux procédés industriels d'injection CIM et MIM (*Ceramic Injection Molding* et *Metal Injection Molding*), le procédé développé par Nanoe compte trois



Guillaume de Calan (08)

Président et directeur commercial de Nanoe, qu'il a cofondée en 2008 au sein de la

filiale Centrale entrepreneur. Il a depuis emporté plusieurs prix, notamment le concours du ministère de la Recherche pour la création d'entreprise innovante (i-Lab), et a développé sa société pour en faire l'un des leaders européens des matières premières avancées pour les céramiques techniques.



Guillaume Bouchet Doumenq (08)

Cofondateur et directeur technique de Nanoe, il est l'inventeur principal de la technologie Zetamix.

Il a mis au point la formulation des filaments céramique, désormais protégée par un brevet.

pour l'impression 3D

étapes (voir schéma ci-contre) :

- la pièce est d'abord imprimée sur n'importe quelle imprimante à filaments ;
- elle est ensuite déliantée: par trempage dans un solvant, le liant plastique présent dans la pièce est retiré ;
- enfin la pièce est cuite à haute température afin d'opérer le « frittage », qui la rend plus dense et plus solide. Cette opération entraîne un retrait de la pièce d'environ 20 %.

À l'issue de ces trois étapes, on obtient donc des pièces totalement métalliques ou céramiques, et ayant des propriétés très proches des matériaux obtenus par procédé traditionnel.

Un large choix de matériaux

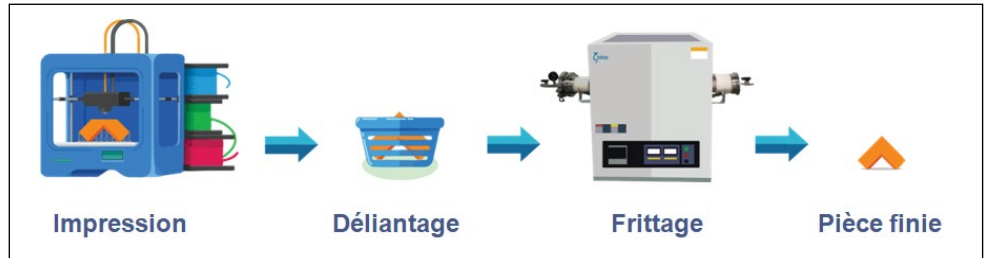
Les premiers filaments disponibles sont fabriqués en utilisant les matières premières de Nanoe: alumine et zircone principalement. Cependant, un des principaux avantages de cette technologie est sa capacité à imprimer un large choix de matériaux, céramique ou métal. L'entreprise a donc très rapidement lancé le développement d'une large gamme de filaments: en acier 316L, carbure de silicium, carbure de tungstène, inconel, titane, cuivre... Ces nouveaux matériaux seront progressivement mis sur le marché en 2019 et 2020.

Des applications prometteuses

Comme toutes les autres techniques d'impression 3D, cette nouvelle technologie devra passer par des phases de redesign et de validation avant d'être utilisée sur des applications réelles.

Plusieurs secteurs se sont montrés intéressés – aéronautique, spatial, médical, télécommunications – mais les horizons de mise sur le marché restent assez lointains. Aussi, à court terme, Nanoe vise principalement des applications de prototypage et d'outillage rapide. En effet, l'impression 3D de pièces d'usure ou de résistance aux températures semble particulièrement intéressante, typiquement pour des buses, des brûleurs, des supports de résistance, des matrices d'extrusion ou de pressage, des outils de coupe...

La fabrication des noyaux céramique pour la fonderie à cire perdue offre également à Nanoe des débouchés intéressants. Il en



Le procédé en trois étapes.



Exemples de pièces imprimées pour les démonstrations clients.

va de même pour la production de pièces allégées aux structures internes optimisées. Ainsi Nanoe a déjà imprimé quelques démonstrateurs avec des structures internes en nid d'abeilles (ou autres remplissage type gyroïde, tétraèdre...) qui permettent de produire des pièces très rigides et à densité très faible, avec des applications dans l'aéronautique, le spatial et la défense.

Des impressions à la demande

Afin d'aider ses clients à adopter cette technologie, Nanoe a également lancé un service d'impression 3D sur mesure, permettant de mener à bien des preuves de concept. Prérequis pour certains de ses clients, ce service permet de valider la compatibilité du procédé avec leurs objectifs en termes de qualité matière, précision dimensionnelle et reproductibilité. Nanoe peut gérer l'ensemble du procédé, en partant d'un fichier 3D jusqu'à la pièce imprimée, déliantée et frittée. Une fois les pièces validées, l'entreprise transfère au client l'ensemble du savoir-faire lié à leur impression (photo ci-dessus).

Fort de ce savoir-faire et sûre du potentiel de cette technologie, Nanoe souhaite la développer en nouant des partenariats avec des fabricants de machines, des utilisateurs finaux, des clients potentiels et ainsi élargir son champ d'application. ■

→ L'allègement de pièces, une application prometteuse

L'une des applications les plus prometteuses de l'impression 3D en général reste l'économie de matière et donc l'allègement de pièces pour des domaines comme le spatial, l'aéronautique et le transport en général.

En s'affranchissant des règles habituelles de design, et notamment de l'obligation de créer des pièces pouvant ensuite être produites par fonderie ou usinage, les ingénieurs peuvent générer des gains de masse importants en n'utilisant que la matière où elle est utile. Cela a notamment permis le développement de logiciels d'optimisation topologique qui, à partir des contraintes appliquées à la pièce (forces, enveloppe extérieure à respecter, points d'accroche), vont calculer la pièce optimale.

En impression FDM, on utilise aussi plus simplement la possibilité d'imprimer des pièces creuses ou partiellement remplies afin de fabriquer séparément l'enveloppe et le contenu. On peut alors jouer sur le type de remplissage en fonction de l'application: linéaire, en nid d'abeilles, en tétraèdre... On recourt également beaucoup aux remplissages en forme de gyroïdes: un type de motif assez complexe, présentant une forme organique et très utilisée en impression 3D pour effectuer un remplissage des pièces avec de bonnes propriétés mécaniques. C'est aussi une forme assez optimale pour le design d'échangeurs thermiques passifs.



Les matériaux composites

Malgré leur légèreté et leurs propriétés mécaniques élevées, les composites conventionnels restent des matériaux fragiles, ce qui restreint leur utilisation dans de nombreux domaines. L'utilisation de fibres discontinues modifie le mode de défaillance du composite, et permet d'augmenter considérablement sa ténacité. Le point avec Joël Henry (ECLy 14), docteur en matériaux composites à fibres discontinues à l'Imperial College London.

La réussite des matériaux composites est principalement due à leurs propriétés mécaniques hors du commun, incluant une résistance et une rigidité très élevées. De plus, la densité des fibres ainsi que celle de la matrice sont très faibles. Cette combinaison de hautes propriétés mécaniques et de faible densité rend les matériaux composites très populaires et explique leur succès pour les applications à toutes sortes de structures.

Cependant, on trouve parmi les désavantages principaux des matériaux composites leur fragilité et leur faible ténacité, dues au fait que l'endommagement d'un composite a tendance à être localisé à un seul endroit dans le matériau, ce qui déclenche une fracture fragile et catastrophique de celui-ci. Cet inconvénient aboutit à un surdimensionnement des pièces en composite et limite les applications dans des secteurs nécessitant une forte ténacité, comme par exemple le bord d'attaque des ailes du Boeing 787, qui est encore fait en aluminium.

Les avantages des composites à fibres discontinues

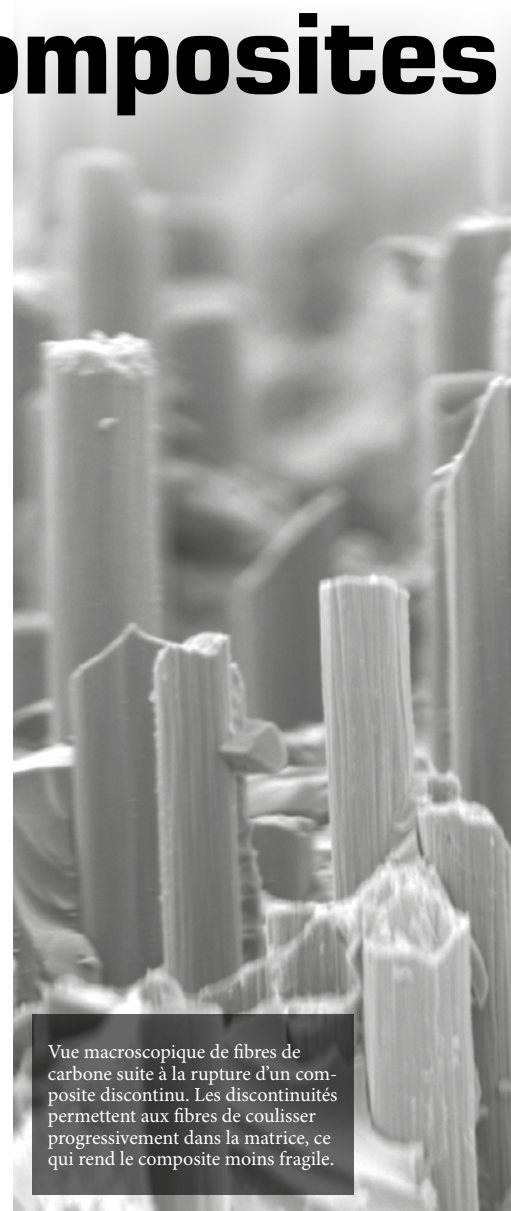
Les matériaux composites à fibres courtes (inspirés de la nature) répondent à ce manque de ténacité en permettant une déformation plus ductile avec plus de cisaillement dans la matrice. En effet, l'introduction de discontinuités dans le matériau permet d'initier l'endommagement de la matrice sur l'ensemble du matériau et non plus uniquement à l'endroit le plus faible. Dans la nacre par exemple, l'ajout de 5 % de matière organique dans 95 % de plaquettes minérales rigides permet de multiplier

par 3 000 la ténacité du matériau, tout en conservant une rigidité et une résistance raisonnable.

Les discontinuités créées par ce type de fibre accroissent les différents modes de défaillance possibles (illustrés par la figure 1), réduisant ainsi la fragilité du matériau :

- soit par rupture cohésive: le chargement en tension des fibres génère de forts cisaillements dans les régions entre les fibres, ce qui provoque une fracture à l'intérieur de la matrice (figure 1.1) ;
- soit par rupture adhésive: il peut arriver que l'interface fibre/matrice se rompe lorsque l'adhésion entre la matrice et les fibres est plus faible que la cohésion de la matrice (figure 1.2) ;
- soit par arrachement: les discontinuités permettent également aux fibres de sortir de la matrice qui les entoure. La friction générée lors de ce processus est un autre moyen de dissiper de l'énergie de façon stable avant la rupture finale (figure 1.3).

Les discontinuités permettent de dissiper plus d'énergie lors de la rupture, ce qui la rend plus prévisible et moins catastrophique. De plus, le cisaillement de la matrice permet une plus grande déformation du matériau avant la rupture, ce qui le rend moins fragile. Grâce aux discontinuités,



Vue macroscopique de fibres de carbone suite à la rupture d'un composite discontinu. Les discontinuités permettent aux fibres de coulisser progressivement dans la matrice, ce qui rend le composite moins fragile.

les possibilités de design, déjà vastes pour les composites conventionnels, deviennent pratiquement illimitées. La présence de fibres courtes offre également un meilleur procédé de fabrication, car cela permet aux fibres de circuler plus librement durant la cuisson du composite. Enfin, les matériaux composites recyclés ont par nature des fibres discontinues.

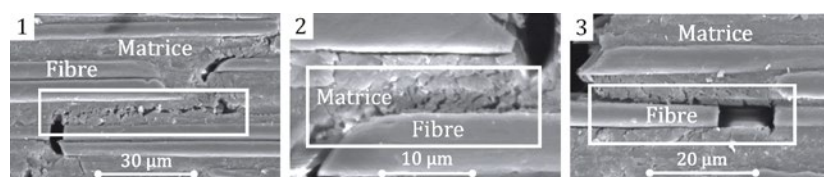


Figure 1. Différents modes de défaillance possibles observés avant la rupture finale d'un composite. 1: fracture de la matrice, 2: décollement de l'interface fibre/matrice, 3: fracture/arrachement des fibres.

à fibres discontinues

→ Les différentes utilisations des composites

Le transport aérien et l'aérospatial font partie des principaux secteurs utilisant les avantages des matériaux composites car ceux-ci participent à l'optimisation de la réduction de la masse de la structure (avion, fusée...).

Dans l'automobile, les voitures de course et les voitures réalisées en peu d'exemplaires utilisent également abondamment les composites, afin de maximiser les performances. Dans les modèles de série, leur utilisation est moins fréquente mais est en pleine croissance, grâce à la réduction des coûts de production.

Les composites sont également utilisés dans le domaine de l'énergie (éolienne) et des sports et loisirs (ski, cyclisme, raquettes...) où leur légèreté permet d'obtenir de meilleures performances et un meilleur confort.

taille plus petite (voir figure 2). La nature est pleine de composites présentant différents niveaux hiérarchiques. Par exemple, on compte environ trois ou quatre niveaux dans la nacre, et sept dans les os. Ces niveaux hiérarchiques sont partiellement responsables de la forte ténacité de ces matériaux, ce qui a poussé les chercheurs à essayer d'appliquer ce concept aux composites synthétiques. La présence de niveaux hiérarchiques a permis de créer des composites où l'endommagement n'est plus localisé à un seul endroit, mais dans toute la structure.

Les composites forgés (*tow-based discontinuous composites*) constituent une classe grandissante de matériaux à haute performance dont la méthode de fabrication, qui utilise un moule similaire à l'emboutissage à très haute pression et température, permet de créer des géométries inexplorées jusqu'à présent avec les méthodes de production conventionnelles, comme des bras de suspension. De plus, le temps de production est réduit de plusieurs heures à environ trois minutes seulement, grâce à un cycle à haute pression et haute température. Enfin, la forte fraction volumique des fibres ainsi que la nature aléatoire de la microstructure permettent au matériau de présenter de très bonnes propriétés mécaniques. Par exemple, l'aspect aléatoire du matériau empêche l'apparition de « routes » pour la propagation de fissures, ce qui le rend plus tenace que des matériaux plus structurés, comme les composites tissés par exemple, où une fissure peut plus facilement se propager dans les directions du tissage. Cela permet l'utilisation du composite dans des parties qui étaient jusqu'alors fabriquées en métal comme les châssis. ■



Joël Henry (ECLy 14)

Joël Henry a effectué sa dernière année d'études en échange à l'Imperial College London. Il y a par la suite passé un doctorat durant lequel il a développé de nouveaux matériaux composites bio-inspirés.

Il a récemment rejoint Monolith AI, une start-up basée à Londres, spécialisée dans l'utilisation de l'intelligence artificielle dans l'ingénierie.

Les différents types de matériaux composites discontinus

L'hybridation consiste à combiner différents types de fibre dans un matériau (par exemple: fibres de carbone et fibres de verre, ou deux types de fibres de carbone différentes). Des effets de synergie, appelés effets hybrides, permettent d'obtenir des propriétés mécaniques plus élevées que la simple combinaison des deux fibres, et ces effets sont renforcés avec l'utilisation des fibres courtes. De plus, l'introduction de fibres moins chères peut permettre de réduire le coût du matériau.

Un composite hiérarchique est un matériau dans lequel les inclusions sont elles-mêmes un composite constitué d'inclusions de

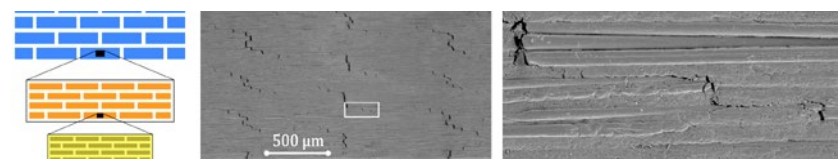


Figure 2. À gauche: représentation d'un composite discontinu hiérarchique avec trois niveaux. Au milieu: composite hiérarchique à deux niveaux. L'énergie est dissipée de façon stable dans toute la structure (fissures au 1^{er} niveau), avant la rupture du composite. À droite: zoom sur une des fissures dans la matrice (au 2^e niveau).

Les matériaux à changement de phase pour isoler les bâtiments

Aujourd'hui, l'isolation thermique des bâtiments apparaît comme une solution naturelle et intuitive pour garantir le confort des occupants et réduire les factures de chauffage. Des aspects auxquels de nouveaux matériaux apportent notamment des solutions. Le point avec Yann Randrianarison (ECM 18), double diplômé de la Technical University of Denmark.

L'isolation thermique de l'habitat au cœur des problématiques d'économies d'énergie.



Yann Randrianarison (ECM 18)

Double diplômé de la Technical University of Denmark, Yann est spécialisé dans le domaine des énergies renouvelables et économies d'énergie. Il a été vice-président de KSI Junior-Entreprise 2015.

Aujourd'hui, le secteur du bâtiment en Europe représente, devant le secteur des transports et de l'industrie, environ 40 % de la consommation d'énergie finale, dont près de la moitié pour le chauffage et la climatisation¹ des maisons individuelles. Il s'agit donc d'un gisement potentiel d'économies d'énergie remarquable, qui se retrouve devant un défi autant qu'une opportunité.

Les matériaux à changement de phase

Parmi les solutions permettant d'optimiser l'isolation thermique des bâtiments, on trouve les matériaux à changement de

phase (MCP ou *phase change materials*). Ceux-ci fonctionnent sur un principe d'absorption, stockage et relargage de chaleur par changement d'état.

L'idée consiste à exploiter les propriétés physico-chimiques de composés organiques et inorganiques (dits « eutectiques ») afin de réguler les flux de chaleur. Lorsque le MCP passe à l'état gazeux, il opère un changement de phase en absorbant la chaleur de son environnement, qu'il refroidit en conséquence. Inversement, lorsque le MCP se condense ou se solidifie, il restitue de la chaleur et réchauffe son environnement. Ces matériaux présentent de multiples intérêts pour des applications dans le bâtiment car ils rendent possibles le stockage de chaleur et donc la décorrélation temporelle entre besoins de consommation et de production, été comme hiver. On trouve aujourd'hui sur le marché différents produits à base de MCP : cire de paraffine encapsulée dans des polymères au sein de murs ou intégrée dans des plaques de plâtre, enduits pour une utilisation en surface, matériaux de type béton cellulaire, ou encore des panneaux-sandwichs pour les façades. Autre avantage des MCP : leur grande *compacité*, c'est-à-dire leur aptitude à stocker beaucoup d'énergie dans un faible volume. Elle permet d'augmenter l'inertie des bâtiments, c'est-à-dire les possibilités de réponses aux sollicitations thermiques

intérieures ou extérieures (lissage des pics de température).

Ces matériaux restent aujourd'hui moins diffusés que les solutions d'isolation thermique plus classiques, comme la laine de verre ou laine de roche. C'est notamment dû à des limites liées à leurs propriétés intrinsèques, comme leur durée de vie et le phénomène de surfusion (le matériau peut rester liquide au-delà de son point de solidification).

D'autres enjeux dans le bâtiment

De nombreux enjeux transverses gravitent autour de l'usage de nouveaux matériaux dans le bâtiment, notamment liés à la consommation et aux usages. Les solutions devront obligatoirement reposer sur une compréhension clairement identifiée de nos usages réels. Leur emploi devra également s'inscrire dans le cadre réglementaire et normatif : l'arrivée de la RT 2020, qui vise à imposer la construction de bâtiments à énergie positive, invite par exemple à se questionner sur le développement de nouveaux matériaux qui pourront effectivement répondre à ces nouvelles attentes. ■

1. Tian Z. *et al.*, Towards adoption of building energy simulation and optimization for passive building design: A survey and a review. *Energy and Buildings*, 2018. 158: p. 1306-1316.

Les terres rares

Le néodyme est indispensable à la réalisation d'aimants permanents utilisés dans les rotors d'éolienne.

Numérique et environnement : voilà les enjeux du XXI^e siècle. Qu'est-ce qui relie ces domaines ? Quels matériaux sont communs à une éolienne et à une batterie de téléphone ? Ces éléments sont connus depuis longtemps : il s'agit des terres rares. Explications avec Ulysse Vassas (20), actuellement en double diplôme de recherche en sciences politiques de l'environnement au Japon.

Les terres rares. Derrière cette appellation se trouvent dix-sept éléments (*voir encadré*) dont les propriétés chimiques, magnétiques et physiques ont fait exploser la demande dans le domaine des high-techs : le numérique principalement et, dans une moindre mesure, les énergies renouvelables.

Dans le numérique, on trouve des métaux rares en abondance : dans les batteries, toujours plus miniaturisées, mais aussi les écrans et les lasers. La majeure partie de ces terres est utilisée pour des alliages métalliques largement présents dans l'industrie.

Si les terres rares ne sont pas toujours nécessaires au développement des énergies renouvelables, on en trouve néanmoins de plus en plus dans l'éolien. Des métaux comme le néodyme sont par exemple indispensables à la réalisation d'aimants permanents utilisés dans certains rotors. Pour l'instant ces technologies ne représentent qu'environ 5 % de la puissance éolienne installée mais elles sont prisées pour leur faible coût de maintenance, particulièrement dans l'éolien offshore, un secteur en pleine croissance. Dans le domaine du photovoltaïque, l'usage des métaux rares est inutile à l'exception des panneaux à couches minces, une branche également en croissance, qui en nécessitent de grandes quantités.

La mine de Mountain Pass aux États-

Unis était historiquement la plus grande productrice de terres rares. Elle a fermé il y a vingt ans pour des raisons environnementales. Aujourd'hui 97 % de ces terres sont extraites par la Chine alors même que le pays ne possède qu'un tiers des ressources minières. Une situation de monopole, avec les risques géopolitiques associés, qui menace l'approvisionnement à long terme de ces ressources. Les conditions environnementales d'extraction de ces matériaux soutenant notre croissance verte y sont désastreuses : dégagements de gaz toxiques, eaux acides et déchets radioactifs couplés aux conditions de travail inhumaines pour les mineurs chinois.

Des ressources à gérer

Que faire pour réduire les impacts de nos consommations ? La première solution industrielle à développer massivement est le recyclage de ces matériaux. Actuellement, la collecte des appareils usagés en France est inférieure aux objectifs fixés par le pays et les filières de recyclage sont quasi inexistantes, particulièrement dans le cas d'alliages complexes.

Il n'est toutefois pas toujours possible de recycler : certains usages sont dispersifs donc irrécupérables, dans d'autres les terres rares sont incluses dans des alliages trop complexes pour être extraites. De même,

→ La liste des terres rares

Cérium (Ce), dysprosium (Dy), erbium (Er), europium (Eu), gadolinium (Gd), holmium (Ho), lanthane (La), lutécium (Lu), néodyme (Nd), praséodyme (Pr), prométhium (Pm), samarium (Sm), scandium (Sc), terbium (Tb), thulium (Tm), ytterbium (Yb), yttrium (Y). Leur utilisation concerne les moteurs électriques, les aimants permanents, certaines turbines éoliennes, les disques durs, les portables électroniques, les microphones, les enceintes, les batteries, les lasers, l'imagerie médicale...

→ Ressources

« Comment le numérique pollue dans l'indifférence générale », S. Rolland, *La Tribune*, 18 déc. 2018.

« Pourquoi il ne faut pas investir dans les terres rares », J.-F. Faure, *L'Or et l'Argent*, 25 sept. 2015.

« La rareté de certains métaux peut-elle freiner le développement des énergies renouvelables ? », *Décrypter l'énergie*, decrypterlenergie.org, 19 nov. 2015.

Critical Materials for the Transition to a 100% Sustainable Energy Future, Ecofys, 2014.

« Métaux rares et gros mensonges : la face cachée des high-tech », G. Bès, *Limite*, revuelimite.fr, 11 avr. 2018.

La Guerre des métaux rares, G. Pitron, Les Liens qui Libèrent, jan. 2018.

L'Âge des low tech, P. Bihouix (96), Seuil, 2014.



Ulysse Vassas (20)

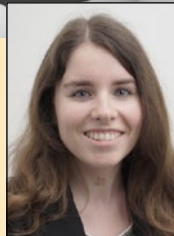
Ulysse est actuellement en double diplôme de recherche en sciences politiques de l'environnement au Japon. Il milite pour une transition durable, écologique et sociale.

le recyclage industriel est trop cher pour pouvoir satisfaire de nombreuses autres utilisations. Or la demande de métaux rares explose. Pour certains, il est prévu qu'elle double ou quadruple (voire soit multipliée par 24, comme dans le cas du cobalt). Ces données sont à prendre en compte quand on sait qui produit toutes nos ressources et à quel prix.

Ces matériaux ne sont pas nouveaux mais leurs usages le sont. Et ce sont eux que nous devons interroger si nous voulons tendre vers un mode de vie plus soutenable à l'échelle du globe. ■

Les nanomatériaux : **quelles**

Encore peu développés dans l'industrie en raison de propriétés mal caractérisées, les nanomatériaux laissent néanmoins entrevoir des possibilités exceptionnelles pour de nombreux domaines : santé, électronique, aéronautique, automobile, construction... Ingénieure optimisation au sein d'Ineos¹, Alice Pazat (ECM 13) nous en présente les propriétés et les applications à plus ou moins long terme.



**Alice Pazat
(ECM 13)**

Titulaire d'un double diplôme de KTH (Stockholm), Alice a réalisé une thèse en contrat Cifre avec le LRCCP sur la préparation de nanocomposites performants élastomère-graphène. Après une expérience de rédactrice scientifique chez Innovatech Conseil, elle met à profit son savoir-faire dans le domaine des oléfines et polymères au sein d'Ineos en tant qu'ingénieur optimisation.

Structure d'un feuillet de graphène.

Connus des laboratoires de recherche depuis de très longues années, les nanomatériaux sont des matériaux dont une des dimensions au moins est de taille nanométrique (1 à 100 nm). Leur intérêt réside principalement dans leur petite taille et dans les propriétés potentielles que des arrangements d'atomes organisés en structures aussi fines peuvent présenter. Parmi ces nanomatériaux à fort potentiel, on peut citer notamment les nanotubes de carbone, le graphène ou encore les nanoargiles.

Cependant ces nanomatériaux sont encore mal connus des industriels, pour lesquels le niveau de maturité des recherches est encore trop faible pour envisager une utilisation à

grande échelle. Les coûts de production sont trop élevés, leur manipulation est délicate et leur impact sur la santé et l'environnement encore très peu étudié.

Du potentiel mais aussi des défis

La plupart représente néanmoins une grande opportunité pour de nombreux domaines, notamment pour la nanoélectronique.

Ainsi, les nanotubes de carbone possèdent par exemple une conductivité électrique très élevée (capacité de transport d'électrons mille fois supérieure à celle du cuivre) et de très faibles dimensions qui peuvent permettre des applications nouvelles, en ligne avec la miniaturisation toujours plus importante des systèmes électroniques.

L'industrie exprime également un fort intérêt pour une utilisation plus large de ces nanomatériaux en tant « qu'additifs » (appelés « charges ») pour les matériaux conventionnels tels que les polymères (polypropylène, polyuréthane, résines époxy, etc.) afin d'en améliorer les propriétés.

Parmi les nanomatériaux prometteurs pour ces différentes applications, le graphène

applications et pour quand ?

(graphite séparé en couches élémentaires appelées « feuillets », chaque « feuillet » correspondant à du graphène) possède un potentiel intéressant en tant que nanocharge multifonctionnelle, qui pourrait à terme venir suppléer, voire remplacer des charges traditionnelles telles que le noir de carbone, très largement utilisé dans les élastomères pour pneumatiques par exemple, en permettant d'obtenir des propriétés largement supérieures, à des taux de charge très faibles (moins de 1 % au lieu de 30 % ou plus). Ainsi, il a été montré dans de nombreuses publications que le graphène permettait d'améliorer les propriétés mécaniques (par exemple pour conférer une plus grande résistance à la traction), de conductivité thermique et de conductivité électrique, et de diminuer fortement la perméabilité des matériaux dans lesquels cette charge est dispersée. Cela permet par exemple de rendre un élastomère conducteur par l'ajout d'un faible pourcentage d'un nanomatériau. On peut également imaginer des films plastique très fins, moins perméables à l'air, des pièces polymères légères pouvant offrir des applications structurelles (particulièrement intéressantes dans le domaine de l'aéronautique), des pneumatiques permettant une plus grande dissipation thermique, etc.

Le verrou technologique principal à l'essor de ces technologies réside dans la capacité à disperser efficacement ces nanocharges dans des matériaux. En effet, les feuillets de graphène ont une très forte tendance à s'agglomérer pour former des structures

proches de celle du graphite, aux propriétés nettement moins impressionnantes. Le défi pour les chercheurs et les industriels réside donc essentiellement dans le développement de techniques de dispersion appropriées pour atteindre les propriétés tant espérées.

Un avenir très lointain ?

Bien que la perspective de produire des nanocharges en grande quantité et à de faibles coûts semble aujourd'hui lointaine, il existe déjà de nombreux développements visant à proposer des structures intermédiaires entre les nanocharges et les charges traditionnelles. Par exemple, les « nanoplaquettes de graphite » (« faibles » empilements de feuillets de graphène) commencent à arriver sur le marché, et sont abusivement qualifiées de graphène par les industriels bien que leurs propriétés lui soient largement inférieures, et elles se retrouvent déjà dans certains produits tels que les raquettes de tennis.

Néanmoins l'utilisation de charges réellement nanométriques semble aujourd'hui plutôt réservée à la nanoélectronique « high-tech », mais elle pourrait se généraliser à l'avenir selon l'avancée des études académiques dans ce domaine.

Quelle transition entre la recherche et l'industrie ?

Bien que cet univers soit initialement plutôt réservé au monde académique, les opportunités importantes représentées

par le développement des nanomatériaux ont rapidement poussé les industriels à se lancer eux aussi dans de grands projets. De plus, étant à la frontière entre de nombreux domaines, les nanomatériaux ont donné lieu à la mise en place de larges programmes de financement, le plus emblématique et ambitieux étant le Graphene Flagship de l'Union européenne, lancé en 2013 et doté d'un milliard d'euros. L'objectif principal est d'encourager la recherche académique et les transferts de technologie vers l'industrie des travaux sur le graphène. Des programmes nationaux spécifiques aux nanomatériaux existent également, comme le plan Nano 2022 visant à soutenir la recherche dans le domaine de la nanoélectronique.

Ces financements viennent s'ajouter aux dispositifs existants tels que les projets ANR (Agence nationale de la recherche), FUI (Fonds unique interministériel) ou encore le CIR (Crédit impôt recherche). Ce dernier vise à soutenir l'effort de R&D des entreprises en France, en proposant un crédit d'impôt couvrant jusqu'à 30 % des dépenses de R&D éligibles quel que soit le domaine². Le CIR permet ainsi aux entreprises de se rapprocher des laboratoires académiques et d'accélérer leurs projets de R&D orientés vers l'industrie, notamment dans le domaine des nanomatériaux. ■

1. Ineos est un des leaders mondiaux de la fabrication de produits chimiques.

2. Plus d'informations : www.innovatech-conseil.fr/credit-impot-recherche/

Rejoins ton association sur les réseaux sociaux !



2 400 fans



7 413 membres
30 000 relations



2 612 followers



362 982 vidéos vues

Les matériaux anciens au

Les découvertes récentes ou à venir nous promettent encore de belles surprises : matériaux plus résistants, plus performants, plus légers, plus efficaces, plus « verts » (biodégradables, biosourcés, mieux recyclables, peu polluants, bas carbone...), et même « intelligents » ! De quoi les mettre, *a priori*, au service d'une économie véritablement durable, de la lutte contre le changement climatique et les pollutions de toute sorte, dans des domaines aussi variés que les transports, le bâtiment, la santé ou la consommation du quotidien.

L'histoire montre pourtant que la course en avant technologique ne nous rapproche pas d'un fonctionnement soutenable de nos sociétés. Force est de constater, malheureusement, que les « progrès » ou les découvertes permettent rarement d'abaisser notre empreinte environnementale globale à la hauteur des promesses ou des espoirs suscités. Les bienfaits escomptés des nouvelles technologies déployées sont souvent réduits pour différentes raisons.

La face cachée des nouvelles technologies

Il peut y avoir, d'abord, des effets indésirables, par exemple des coûts environnementaux cachés qui alourdissent le bilan. Pensons par exemple à la question des batteries des véhicules électriques. Il y a ensuite parfois des difficultés de prise en main ou des modifications intempestives par les usagers : ainsi certains smart buildings ultra-optimisés tournent-ils au cauchemar en phase de maintenance, avec à la clé une dépense énergétique bien supérieure aux estimations des thermiciens, sans parler des occupants qui ajoutent des climatiseurs ou des convecteurs d'appoint ! Dans les transports motorisés comme dans le bâtiment, il y a ainsi un décalage croissant entre émissions théoriques et réelles.

Il y a enfin, surtout, l'effet rebond : à chaque fois qu'une technologie permet un gain d'efficacité technique (donc aussi économique), le volume de la consommation globale augmente, ce qui annihile les gains ou empire la situation. Les nouveaux alliages au rhénium dans les turboréacteurs ont fortement réduit la consommation de carburant des avions... mais aussi permis l'essor de l'aviation low-cost. Les progrès réalisés dans l'architecture et la dépense



© Dauphins Architectes, Faïçal Oudbr Habitat Naturel

Et si les solutions aux désordres environnementaux gisaient dans les matériaux et les usages anciens, autant ou plus que dans l'innovation technologique ? C'est ce que proposent Philippe Bihoux (96) et Laurent Castaignède (93), tous deux apôtres d'une contre-culture allant à l'encontre du messianisme technologique.

énergétique des datacenters ont été énormes, mais ont fait chuter le prix de stockage des données numériques, qui doublent tous les 18 à 24 mois. Etc.

Après l'agriculture, le bâti raisonné

Si « solutions » il y a, elles ne seront pas techniques, mais sociotechniques, prenant en compte les usages et le facteur humain. C'est dans ce cadre que la réutilisation de matériaux anciens ou la redécouverte de savoir-faire ancestraux pourrait prendre tout son sens.

Ainsi dans le domaine du bâtiment, où les préoccupations pour un habitat plus sain, face aux menaces sanitaires et climatiques, questionnent le « tout-béton »¹ et font resurgir, chez les particuliers et les maîtres d'ouvrage soucieux de leur impact environnemental, des projets de murs de terre crue, en ossature bois et en isolation paille... de sérieux concurrents au « béton bas carbone » ou aux derniers « écomatériaux » technologiques proposés

par les industriels. Parallèlement, on redécouvre les vertus de la ventilation naturelle et de la gestion du flux hygrométrique (puits canadiens, ouvrants sur les façades opposées, isolants biosourcés...). Du côté des usages, les

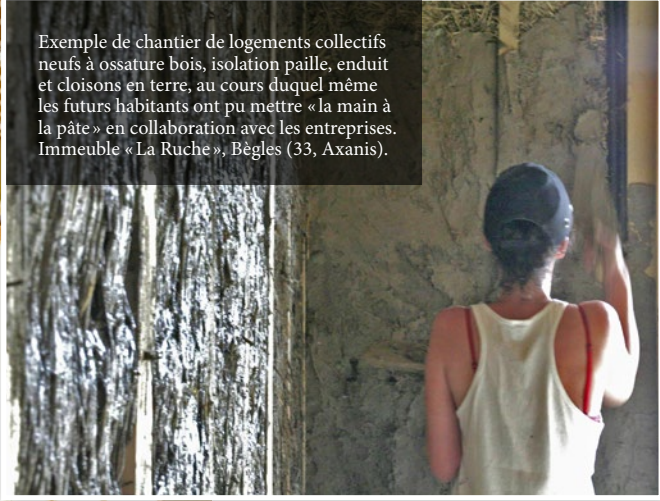


Philippe Bihoux (96)

Auteur de *L'Âge des low tech – Vers une*

civilisation techniquement soutenable (Seuil, 2014), *Le Désastre de l'école numérique, plaidoyer pour une école sans écrans* (avec Karine Mauvilly, Seuil, 2016) et *Le bonheur était pour demain – Les rêveries d'un ingénieur solitaire* (Seuil, 2019).

service de l'innovation durable



Exemple de chantier de logements collectifs neufs à ossature bois, isolation paille, enduit et cloisons en terre, au cours duquel même les futurs habitants ont pu mettre « la main à la pâte » en collaboration avec les entreprises. Immeuble « La Ruche », Bègles (33, Axanis).

matériaux anciens les plus pertinents pourraient bien être... le coton et la laine ! Pourquoi consacrer autant d'énergie à optimiser les enveloppes et les équipements sophistiqués des bâtiments pour garantir une fraîcheur agréable au cœur de l'été et

une douceur ouatée en plein hiver, sans se préoccuper de la tenue vestimentaire des occupants ? Il est en effet beaucoup plus simple, et beaucoup moins coûteux (à tous les points de vue), d'isoler ou de rafraîchir les corps que les bâtiments, en ajoutant ou en enlevant des habits. Par exemple, troquer son costume-cravate en été contre une chemise à manches courtes, un bermuda et des chaussures ouvertes permet de réduire l'isolation des corps de 0,4 clo² – soit un écart d'environ 4 °C sur la température ressentie³. En hiver, le pull-over permettrait de rapprocher la température de consigne des hypothèses des bureaux d'études (19 °C en logement, guère plus en tertiaire...).

Vers un retour aux sources

Dans le domaine de l'urbanisme, la terre végétale pourrait partir à la reconquête de l'asphalte, et la lignine des arbres⁴, partout où il est possible d'en planter, aider à lutter contre les îlots de chaleur urbains. L'énergie captée par la photosynthèse et le rafraîchissement de l'air par évapotranspiration en font des outils très efficaces, outre les autres avantages possibles d'une renaturation (biodiversité, reconnexion de proximité des citoyens à la « nature »...).

Dans le domaine des transports, c'est sans nul doute la fibre musculaire qu'il faut redécouvrir d'urgence avec la marche et le vélo, à assistance électrique si besoin. Certes, dans les pays émergents, les populations nouvellement aisées demeurent avides de

passer sur quatre roues, multipliant les embouteillages et augmentant les distances parcourues dans les nouvelles mégalopoles. Dans les pays occidentaux qui disposent d'une solide expérience en matière de congestion et d'étalement urbain, les grandes métropoles saturées déploient au contraire moult efforts pour encourager l'usage de la bicyclette, vecteur de fluidité comme de santé⁵.

Poussons le bouchon un peu plus loin. Pourquoi ne pas redécouvrir la craie⁶ à l'école ? Malgré la fascination exercée par les écrans scintillants, la numérisation de l'école n'a, à ce jour, démontré aucun bénéfice pédagogique, tandis que les conclusions d'études sur les risques psychosociaux, chez les tout-petits en particulier, s'enchaînent. Et que dire de notre engouement pour l'« intelligence » artificielle ? Au-delà des fantasmes ou des effets d'annonce destinés à capter des financements publics ou privés, ou à vendre un peu de temps d'attention médiatique, la matière grise a certainement de beaux jours devant elle. Et pour nos smart cities du futur, nous devrions d'abord compter sur l'intelligence des citoyens, plutôt que sur celle des machines : le bon sens, paysan si besoin, surpassera encore les algorithmes dans de nombreuses applications.

Il ne s'agit pas de renoncer à tout développement technologique. Certains « nouveaux » matériaux peuvent être intéressants, à condition d'analyser leur impact sur le cycle de vie complet, et d'assurer qu'une généralisation est possible sans effet pervers. Mais une autre innovation, centrée sur les usages, est désormais nécessaire : entre low-tech frugale et high-tech souvent insoutenable à grande échelle, notre avenir hésite. ■



Laurent Castaignède (93)

Fondateur du bureau d'études BCO2 Ingénierie (www.bco2.fr) et auteur de *Airvore ou la face obscure des transports, chronique d'une pollution annoncée* (Écosociété, 2018).

1. La fabrication du ciment représente à elle seule 6 à 7 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre.
 2. Abréviation de clothing : unité de calcul de l'isolation des corps par les vêtements.
 1 clo ≈ 0,155 °C.m²/W.
 3. Cf. la campagne Cool Biz lancée en 2005 au Japon et 2006 en Corée du Sud, redéfinissant le code vestimentaire pour l'adapter aux saisons, suivie au plus haut niveau (les ministres montrent l'exemple), accompagnée par de grandes marques de vêtements.
 4. Matériau apparu il y a 380 millions d'années (Dévonien).
 5. Effet positif sur la pollution de l'air ambiant, mais aussi la sédentarité qui n'a jamais été aussi grande du fait de l'assistante motorisée à la mobilité (véhicules, escalators, ascenseurs, etc.).
 6. « Seulement » 65 à 90 millions d'années (Crétacé).